

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de la Terre

Département des Mines

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Mines et
Environnement

Option : Valorisation des Ressources Minérales et Environnement

CARACTERISATION ET VALORISATION DES STÈRILES FRANCS DE LA MINE DE L'OUENZA

Présentée par :

BAALA Dirar

Devant le jury :

Président :	BOUNOUALA Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
Directeur de thèse :	IDRES Abdelaziz	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
Examineurs :	CHETTIBI Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar-Annaba
	GHEID Abdelhak	Pr.	Université M.C.M - Souk Ahras
	BOUZIDI Nedjima	M.C.A	Université Abderrahmane Mira-Béjaïa
	AIT BRAHAM née MAHTOUT Leila	Pr.	Université Abderrahmane Mira-Béjaïa

Année : 2019

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents

À mes frères et mes sœurs.

À mes amis.

*Et à ma grande famille, à tous ceux qui ont
aimé, aidé ou seulement connu.*

REMERCIEMENTS

Le présent travail n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de beaucoup de personnes. Et je ne suis pas non-plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous les sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Il m'est tout d'abord particulièrement agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance, mes plus sincères remerciements et ma gratitude à mon directeur de thèse IDRES Abdelaziz, Professeur à l'Université Badji Mokhtar - Annaba, qui a bien accepté de diriger mon travail, et qui n'a cessé de me prodiguer ses conseils judicieux et permanents qui m'ont été d'une aide précieuse. Je le remercie pour ses encouragements et pour le temps précieux qu'il m'a consacré toutes les fois que cela était nécessaire, sans oublier ses interventions pour me faciliter les démarches administratives de mes inscriptions annuelles. Je voudrais lui dire que je n'oublierai jamais ses marques de gentillesse, de générosité et sa disponibilité malgré ses multiples occupations.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer et examiner ce travail de recherche. Ainsi, j'adresse ma sincère reconnaissance au président du jury Pr BOUNOUALA M., et aux membres CHETTIBI M. de l'Université Badji Mokhtar - Annaba, Pr GHEID A. de l'université de Souk Ahras, Pr AIT BRAHAM née MAHTOUT Leila et Dr BOUZIDI Nedjima de l'université Abderrahmane Mira – Bejaia pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Je tiens à remercier le Professeur BOUNOUALA Mohamed, directeur du laboratoire de valorisation des ressources minières environnement qui m'a permis de réaliser ma thèse dans des conditions de travail idéales, ainsi que le directeur du laboratoire Centre de recherche nucléaire d'Alger.

Mes remerciements vont à l'ensemble des personnes qui m'ont soutenu, aidé et remonté le moral pendant les moments difficiles que j'ai pu traverser au cours de ces dernières années de recherche.

BAALA Dirar

Résumé :

La mine de fer de l'Ouenza produit annuellement deux Millions de tonne de stériles francs, ces derniers sont entreposés en surface sous forme d'empilements dans différentes décharges à proximité des sites d'exploitation de la mine à ciel ouvert. La gestion de ces stériles constitue un défi environnemental car il présente un danger pour la région car ils provoquent un problème de gestion et d'occupation de surface dans la mine.

La plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement résultent d'une combinaison de l'éventuel mouvement dans l'espace de ses particules solides et du potentielle de ses composants chimiques sur la pollution du site.

L'objectif de cette étude consiste à caractériser et valoriser ces stériles issus des différentes décharges par méthodes physiques et par voie sèche. Cependant des échantillons représentatifs sont prélevés sur site pour connaître et identifier les différents composants constituant les stériles francs de la mine de l'Ouenza et leurs propriétés physico-chimiques. L'observation macroscopique révèle trois catégories de matériaux constituées de fer hématitique représentant 15%, de marne 35%, et de calcaire 50%.

Pour identifier ces stériles, une caractérisation est réalisée par DRX des différentes catégories et de l'échantillon initial, l'analyse chimique des trois catégories de matériaux issus des stériles francs de la mine de fer de l'Ouenza par FX. Les résultats obtenus montrent que la composition minéralogique comporte : la calcite, le quartz et l'hématite. Des essais de mesure du coefficient d'atténuation massique des échantillons des stériles francs par transmission d'un faisceau gamma en géométrie mince sont réalisés. L'atténuation est étudiée pour les énergies 122 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV émises par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs respectivement.

Les meilleurs résultats sont atteints avec l'épaisseur des échantillons comprise entre 50 et 90 mm et une gamme des énergies comprise entre 122 et 661 KeV, ceci contribue fortement à la séparation radiométrique des stériles francs de la mine de fer de l'Ouenza. De ce fait, ce travail de recherche réside dans la possibilité d'application du procédé radiométrique utilisant les rayons gamma. Par conséquent, la teneur en fer dans le minerai de fer traité par ce procédé peut atteindre 67.13%.

Mots clés : minerai de fer, Ouenza, stériles francs, radiométrie, rayons gamma.

ملخص

ينتج منجم الوزنة للحديد مليوني طن من نفايات الصخور كل عام، والتي يتم تخزينها على السطح في شكل أكوام في مدافن مختلفة بالقرب من عمليات المناجم السطحية. تشكل إدارة نفايات الصخور هذه تحديًا بيئيًا لأنها تمثل خطراً على المنطقة لأنها تسبب مشكلة في الإدارة واحتلال السطح في المنجم.

تتجم معظم التأثيرات التي يمكن أن تحدثها بقايا التعدين على البيئة عن مزيج من الحركة المحتملة في الفضاء لجزيئاتها الصلبة وإمكانات مكوناتها الكيميائية على تلوث الموقع.

الهدف من هذه الدراسة هو توصيف واستعادة صخور النفايات هذه من مدافن النفايات المختلفة بالطرق الفيزيائية والعملية الجافة. ومع ذلك ، يتم أخذ عينات تمثيلية في الموقع لمعرفة وتحديد المكونات المختلفة التي تشكل صخرة النفايات من منجم الوزنة وخصائصها الفيزيائية والكيميائية. تكشف الملاحظة العيانية عن ثلاث فئات من المواد المكونة من الحديد المكون من 15% و مارل 35% و 50% من الحجر الجيري.

لتحديد هذه النفايات الصخرية ، يتم إجراء توصيف بواسطة DRX لمختلف الفئات ، وفي العينة الأولية ، التحليل الكيميائي للفئات الثلاث من المواد من صخور النفايات من منجم الوزنة للحديد بواسطة FX. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن التركيبة المعدنية تشمل: الكالسيت والكوارتز والهيمايت. يتم إجراء اختبارات لقياس معامل التوهين الشامل لعينات من صخور النفايات الصريحة عن طريق نقل حزمة أشعة جاما. تتم دراسة التوهين من أجل الطاقات 122 KeV و 244 KeV و 344 KeV و 661 KeV المنبعثة من المصادر النقطية لـ ^{152}Eu و ^{137}Cs على التوالي.

يتم تحقيق أفضل النتائج من خلال سماكة العينات بين 50 و 90 ملم ومجموعة من الطاقات بين 122 و 661 كيلو فولت، وهذا يساهم بشكل كبير في الفصل الإشعاعي لصخور النفايات من منجم الحديد الوزنة. لذلك، يكمن هذا العمل البحثي في إمكانية تطبيق العملية الإشعاعية باستخدام أشعة جاما. لذلك، يمكن أن يصل محتوى الحديد في خام الحديد المعالج بواسطة هذه العملية إلى 67.13%.

الكلمات الرئيسية: معدن الحديد، الوزنة، الصخور العقيمة، قياس الإشعاع، أشعة جاما.

ABSTRACT

The Ouenza iron mine produces two million tonnes of waste rocks each year, which are stored on the surface in the form of stacks in various landfills near the surface mine operations. The management of these waste rocks constitutes an environmental challenge because it presents a danger for the region because they cause a problem of management and surface occupation in the mine.

Most of the impacts that a mining residue can have on the environment result from a combination of the possible movement in space of its solid particles and the potential of its chemical components on the pollution of the site.

The objective of this study is to characterize and recover these waste rocks from the various landfills by physical methods and by dry process. However, representative samples are taken on site to know and identify the various components constituting the waste rocks from the Ouenza mine and their physico-chemical properties. Macroscopic observation reveals three categories of materials consisting of hematitic iron representing 15%, marl 35%, and limestone 50%.

To identify these waste rocks, a characterization is carried out by DRX of the different categories and of the initial sample, chemical analysis of the three categories of material from the waste rocks from the Ouenza iron mine by FX. The results obtained show that the mineralogical composition includes: calcite, quartz and hematite. Tests to measure the mass attenuation coefficient of samples from waste rocks by transmission of a gamma beam in thin geometry are carried out. The attenuation is studied for the 122 KeV, 244KeV, 344 KeV and 661 KeV energies emitted by the point sources of ^{152}Eu and ^{137}Cs respectively.

The best results are achieved with the thickness of the samples between 50 and 90 mm and a range of energies between 122 and 661 KeV, this greatly contributes to the radiometric separation of the waste rock from the Ouenza iron mine. Therefore, this research work lies in the possibility of applying the radiometric process using gamma rays. Therefore, the iron content in the iron ore processed by this process can reach 67.13%.

Key words: iron ore, Ouenza, waste rocks, radiometry, gamma rays.

TABLE DES MATIERES

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
ملخص.....	IV
Abstract.....	V
Table des matières.....	VII
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux.....	X
Introduction.....	1

Chapitre I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

I.1. Cadre géographique de Djebel Ouenza.....	3
I.2. Géologie Régionale	4
I.3. Lithostratigraphie.....	5
I.4 Type du gisement	11
I.5 Minéralisation	12
I.6 Conditions minières	13
I.7 Etat des réserves	15
I.7.1 Nature de substance extraite.....	16
I.7.2 Méthode d'exploitation	17
I.7.2.1 Travaux d'abattage	17
I.7.2.2 Foration.....	17
I.7.2.3 Tir.....	18
I.7.2.4 Chargement et transport	19
I.7.2.5 Préparation du minerai	20
I.7.2.6 stériles francs	21
I.7.2.7 Etat Actuel de la mine	22

Chapitre II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. La mine : Activité génératrice des résidus miniers.....	23
II.2 Gisement et stérile	24
II.3 Types d'exploitation minière.....	25
a) Mines à ciel ouvert.....	26
b) Mines souterraines.....	26
II.4 Phases et opérations d'exploitation.....	26

II. 5 Principaux types de résidus miniers.....	28
II. 5.1 Les stériles francs de découverte.....	28
II. 5. 2 Les déchets d'exploitation (stériles de sélectivité).....	28
II. 5. 3 Les déchets de traitement.....	29
II. 5. 4 Autres types de déchets.....	29
II. 6 Stériles francs de la mine de l'Ouenza.....	29
II. 7 Stériles francs à travers le monde	31

Chapitre III TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES STERILES FRANCS

III.1 Définition du traitement des minerais.....	39
III.2 Techniques minières.....	40
III.2.1 Extraction du minerai de fer.....	40
III.2.2 Enrichissement des minéraux.....	40
III.3 Techniques de traitement du minerai.....	41
III.3. 1 Évaluation de la technologie d'enrichissement du minerai de fer.....	41
III.4. Procédés d'enrichissement des minerais de fer.....	41
III.4.1 Séparation magnétique.....	42
III.4.2 Flottation	42
III.4.3 Procédé de séparation gravimétrique.....	43
III.4.4 séparation électrostatique.....	43
III.4.5 Séparation optique.....	43
III. 4.5.1 Principe de tri optique.....	44
III.4.6 Séparation radiométrique	44
III.4.6.1 Tri automatique.....	44
III.4.6.2 Bases physiques du processus.....	44
III.7 Technique d'utilisation pour l'enrichissement radiométrique.....	50
III.7.1 Tri radiométrique.....	50
III.7.2 Séparation radiométrique.....	50
III.7.3 Enrichissement radiométrique des minerais radioactifs.....	54
III.7.4 Enrichissement radiométrique de minerais non radioactifs.....	56
III.7.4.1 Méthode Photoneutron.....	57
III.7.4.2 Méthode par luminescence aux rayons X.....	57
III.7.4.3 Méthode photométrique.....	59
III.7.4.4 Méthode radiométrique par rayons X.....	60
III.7.4.5 Méthode d'absorption gamma.....	61

Chapitre IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

IV.1 Echantillonnage.....	66
IV.2 Caractérisation des stériles francs de la mine de l'Ouenza.....	68
IV.2.1 Préparations des échantillons pour l'analyse.....	68
IV.2.2 Détermination des éléments par Fluorescence X	68
IV.2.3 Caractérisation minéralogique	69
IV.2.3.1 Principe de la diffraction des rayons X.....	69
IV.2.4 Observation par lames minces	73
IV.2.4.1 Lame mince : Echantillon 1 (Calcaire).....	73
IV.2.4.2 Description pétrographique	74
IV.2.4.3 Lame mince : Echantillon 2 (Marne).....	75
IV.2.4.4 Description pétrographique	75
IV.2.4.5 Lame mince : Echantillon 3 (Fer).....	76
IV.2.4.6 Description pétrographique	76
IV. 3 Caractéristiques des rayonnements ionisants.....	77
IV. 3.1 Source des rayonnements ionisants.....	78
IV. 3. 2 Radioactivité gamma (γ).....	79
IV. 3. 3 Pénétration des rayonnements.....	79
IV.4 Interaction rayon gamma avec la matière.....	80
IV.4.1 Effet Photo-électrique.....	80
IV.4.2 Effet Compton.....	81
IV. 5 Mesure du coefficient d'atténuation des échantillons des stériles francs par transmission d'un faisceau gammas.....	82
III.5.1 Expérimentation.....	82
IV.5. 2 Chaîne de mesure.....	84
IV.5.3 Programme Xcom	89
III.5.4 Influence de l'épaisseur de l'échantillon sur le coefficient d'atténuation.....	91
III.5.5 Influence de la teneur en fer sur le coefficient d'atténuation.....	92

Chapitre V EFFETS DES STERILES FRANCS SUR L'ENVIRONNEMENT

V.1 Cadre législatif.....	94
V.2 Historique de la mine de l'Ouenza.....	97
V.3 Déformation du site naturel.....	98
V.3.1 Glissements de terrains du quartier Zerga.....	98
V.4 Climatologie.....	98
V.5 Nuisance particulière (poussière).....	99
V.5.1. Définitions et caractéristiques des poussières.....	99

V.5.1.2. Définition des poussières dans le domaine des granulats.....	100
V.5.1.2.1 Bruit de fond et le fond continu.....	100
V.5.1.2.2 Les caractéristiques des poussières.....	100
V.5.3. Importance des différentes sources de poussière.....	102
V.5.4. Analyse par secteur.....	102
V.5.4.1. Décapage de la découverte.....	102
V.5.4.2. Extraction des matériaux.....	103
V.5.4.2.1. Exploitation des roches massives.....	103
V.5.4.2.2. Foration.....	103
V.5.4.2.3. Tirs.....	103
V.5.4.3. Déplacement des matériaux.....	104
V.5.4.3.1. Utilisation d'une verse.....	104
V.5.4.3.2. Transport des matériaux par tombereaux.....	105
V.5.4.3.3. Transport des matériaux par convoyeurs à bande.....	105
V.5.4.4. Traitement des matériaux par concassage.....	106
V.5.4.4.1 Opérations de concassage.....	106
V.5.4.4.1.1. Facteurs aggravants.....	107
V.5.4.5. Stockage et la livraison.....	107
V.5.4.5.1. Mise en stock.....	107
V.5.4.5.2. Stocks.....	107
V.5.4.5.3. Chargement des matériaux pour l'expédition.....	108
V.5.4.5.4. Facteurs aggravants	108
V.5.4.5.5. Remise en état du site exploité.....	108
V.5.5. Facteurs influençant l'empoussièrement.....	108
V.5.5.1. Facteurs favorisant la formation des poussières.....	109
V.5.5.1.1. Friabilité de la roche exploitée.....	109
V.5.5.1.2. Etat de dessiccation de la roche.....	109
V.5.5.2. Facteurs influençant la dispersion des poussières.....	109
V.5.5.2.2. Forme de la poussière.....	109
V.5.5.2.3. Conditions météorologiques.....	109
V.5.5.2.4. Vent.....	110
V.5.5.2.5. Sécheresse.....	110
V.5.5.2.6. Précipitations.....	111
V.5.5.2.7. Implantation géographique du site.....	111
V.5.5.2.8. Type de gisement.....	111
V.5.5.2.9. Configuration du site.....	111
V.5.5.2.9. Facteur production.....	112
V.5.6. Impacts de l'empoussièrement dans la carrière et l'environnement.....	112

V.5.6.1. Sécurité sur l'exploitation et aux alentours.....	112
V.5.6.2. Riverains.....	112
V.5.6.3. Érosion des produits et perte de rentabilité.....	113
V.5.6.4. Impact visuel.....	113
V.5.6.5. Impacts sur le milieu naturel.....	113
V.5.6.6. Potentiel dangereux.....	114
V.5.6.7. Effets sur la santé.....	115
V.5.6.7.1. Voies d'exposition.. ..	115
V.5.6.7.2. Population concernée et populations sensibles.....	115
V.6. Drainages miniers.....	115
V.6.1. Alcalin.....	116
V.6.2. Neutre.....	116
V.6.3. Acide.....	116
V.7. Effet de tir à l'explosif sur l'environnement.....	116
V.7.1. Structures sensibles aux vibrations	116
V.8 Effets des rayonnements ionisants.....	117
V.8.1 Echelle de doses.....	118
V.8.2 Sievert : unité de dose biologique.....	119
V.8.3 Doses : limites légales.....	120
V.8.4 Principes de radioprotection.....	122
V.8.5 Effets de ^{152}Eu et de ^{137}Cs sur la santé.....	122
Conclusion Générale.....	124
Références Bibliographiques.....	125

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Situation géographique du gisement de l'Ouenza	04
Figure I.2 Carte géologique et structurale de la région de l'Ouenza	09
Figure I.3 Coupe lithostratigraphique des monts du mellègue d'après	10
Figure 1.4 disposition des gites métallifères de la mine de l'Ouenza.....	14
Figure 1.5 Mode de chargement d'un trou de mine.....	19
Figure I.6 Schéma représentatif des opérations minières au niveau de complexe de l'Ouenza	21
Figure II.1 : Travaux et opérations d'une exploitation minière.....	24
Figure II.2 Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants.....	27
Figure II.3 : Les stériles francs de la mine de l'Ouenza.....	30
Figure II.4 : Situation des stocks des stériles francs de la mine de l'Ouenza.....	31
Figure III.1 Principaux flux résultant de la séparation des minéraux du minerai brut.....	40
Figure. III.2 Schéma de passage des rayonnements à travers une roche.....	45
Figure III.3 Différentes méthodes de tri.....	46
Figure III.4. Courbes de contraste.....	49
Figure III.5 Formation déterministe de la trajectoire du matériau.....	52
Figure III.6 Formation statistique de la traversée du matériau.....	53
Figure III.7 Formation statistique de l'alimentation des matériaux soufflés à plat.....	53
Figure III.8 Formation statistique de l'alimentation avec lavage du matériau.....	54
Figure III.9 Schéma du séparateur LS-20-05H.....	59
Figure III.10 Schéma d'un circuit de séparation photométrique.....	60
Figure III.11 Schéma de fonctionnement du séparateur SRF.....	61
Figure III.12 Schéma du séparateur gamma-absorbant de bande RS-2ZH.....	63
Fig. III.13. Schéma de séparation radiométrique du minerai de fer.....	64
Figure IV.1 Points de prélèvement des échantillons.....	66
Figure IV.2 Etapes de la préparation des échantillons.....	68
Figure IV.3 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial des stériles francs.	70
Figure II.4 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de calcaire....	71
Figure IV.5 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Minerai de fer riche.....	71
Figure IV.6 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Marne....	72
Figure IV.7 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Fer pauvre.....	73
Figure IV.8 : lame mince de l'échantillon 1.....	74
Figure IV.8 : lame mince de l'échantillon 2.....	75
Figure IV.9 : lame mince de l'échantillon 3.....	76
Figure IV.10 Exemple de radioactivité gamma.....	79
Figure IV.11 Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants.....	79

Figure IV.12 Absorption d'un gamma par un atome.....	80
Figure IV.13 Collision d'un photon et d'un électron atomique.....	81
Figure IV.14 Echantillons du minerais de fer analysés.....	83
Figure IV.15 spectre analysé par le logiciel GENIE 2000.....	85
Figure IV. 16 Schéma du stand expérimental exploité durant les manipulations.....	87
Figure IV.17 Stand expérimental exploité durant les manipulations.....	87
Figure IV.18 Variation du coefficient d'atténuation massique en fonction de l'énergie.	89
Figure IV.19 Interface du programme Xcom.....	90
Figure IV.20 Variation du coefficient d'atténuation massique du Xcom en fonction de l'énergie.	90
Figure IV.21 Représentation graphique de μ en fonction de l'épaisseur pour chaque énergie.	91
Figure IV.22 Influence de la teneur en fer sur le coefficient d'atténuation pour différentes énergies.	92
Figure IV.23 Schéma de séparation radiométrique proposé pour les stériles francs de la mine de l'Ouenza.....	93
Figure V.1 : Schéma des effets environnementaux causés lors de l'exploitation de la mine de l'Ouenza	96
Figure V.2: Histogramme des précipitations et températures annuelles (Année 2011).	99
Figure V. 3 : Influence du vent sur la propagation des poussières.....	101
Figure V.4 : Modification du vent par un stock de matériaux.....	101
Figure V.5 : Foreuse avec tête aspiratrice.....	103
Figure V.6 : Nuage de poussières consécutif à un tir de mine.....	104
Figure V.7 Poussières soulevées par la circulation de l'engin.....	105
Figure V.8 : Convoyeur capoté.....	106
Figure V.8 : Alimentation d'un concasseur.	107
Figure V.11 Blanchiment de la végétation riveraine.....	114
Figure V.12 : Classement de doses (expositions aiguës)	118
Figure V.13 : Tests en boîte à gants.....	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : État récapitulatif des réserves exploitables actualisées au 30/12/13.....	15
Tableau I.2 : État récapitulatif des réserves géologiques actualisées au 31/12/2013.....	16
Tableau I.3 Paramètres d'exploitation de la mine de l'Ouenza.....	17
Tableau I.4 Chiffres prévisionnels de productions des sondeuses	18
Tableau I.5 Paramètres techniques d'abattage	19
Tableau I.6 Chiffres prévisionnels de productions des engins de chargement et de transport.....	20
Tableau I.7 : Production prévisionnel des concasseurs.....	21
Tableau III.1 Classification des méthodes radiométriques de traitement des minerais.....	47
Tableau III.2. Caractéristiques des modes de séparation radiométrique	51
Tableau III.3 Principales caractéristiques des séparateurs auto-radiométriques.....	56
Tableau III.4 Caractéristiques des séparateurs de photoneutrons.....	57
Tableau III.5 Séparateurs fluorescents à rayons X	58
Tableau III.6 Caractéristiques des séparateurs à absorption gamma.....	62
Tableau IV. 1 Coordonnées et descriptions des échantillons.....	67
Tableau IV.2 Résultats d'analyse par fluorescence X des échantillons initiaux.....	69
Tableau IV.3 Composition minéralogique de l'échantillon 1 (Calcaire).....	74
Tableau IV.4 Composition minéralogique de l'échantillon 2 (Marne).....	75
Tableau IV.5 Composition minéralogique de l'échantillon 3. (Fer).....	76
Tableau IV.6 Classification des rayonnements ionisants.....	77
Tableau IV.7 Epaisseurs moyennes $\bar{x} \pm \sigma_x$ des échantillons.....	83
Tableau IV. 8 : Exemple de calcul de coefficient d'atténuation μ pour l'échantillon du fer riche.....	86
Tableau IV. 9 Coefficient d'atténuation $\mu \pm \sigma_\mu$ des stériles francs du minerai de l'Ouenza.....	88
Tableau IV.10 Résultats de calculs du coefficient d'atténuation linéaire total.....	88
Tableau V.1. Distances parcourues par des particules minérales.....	101
Tableau V.2 : classement des activités en fonction de leur importance.....	102
Tableau V.3 : classement des grandes étapes de fabrication des granulats	102
Tableau V.4 : Limites annuelles pour la population d'exposition hors radioactivité naturelle et médecine.....	120
Tableau V.5 : Limites annuelles d'exposition pour les travailleurs.....	121
Tableau V.6 : Les énergies en mSv.....	123

CHAPITRE I

ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

Introduction

Afin de mieux connaître la géologie du gisement ainsi que les conditions minières qui caractérisent le complexe minier de l'Ouenza, un stage a été effectué sur le site. Il a permis de récolter quelques informations sur la géologie et les conditions minières de gisement en question. De ce fait, ce chapitre fait l'objet d'une présentation succincte des conditions géologiques (localisation, litho-stratigraphie, tectonique, etc.) et minières (méthode d'exploitation, état des réserves, etc.).

I.1. Cadre géographique de Djebel Ouenza

La région de Djebel Ouenza est située au Nord-Est de l'Algérie. Il se trouve à 160 km au Sud de la ville d'Annaba, à 50 km au Nord de la ville de Tébessa et à 15 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route nationale n°82 qui relie Tébessa à Souk-Ahras. Le massif de Djebel Ouenza est situé dans la région des monts de Mellègue, qui fait partie du diapyrisme triasique de l'Atlas Saharien oriental, formé dans son ensemble par une structure anticlinale orienté Sud-Ouest Nord-Est. Cette structure est formée par les sédiments du Mésozoïque du Tertiaire et du Quaternaire (figure I.1).

Le gisement ferri-fère de l'Ouenza repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à 1288 m au niveau du pic, il est d'environ de 12km de longueur et 5km de largeur. Les amas métallifères se présentent sous la forme de mamelons grossièrement elliptiques. Ils comprennent successivement du nord-est au sud-ouest : le Koudiat Douamis, Koudiat Hallatif, la région des conglomérats, le quartier Sainte-barbe, le gisement de Chagoura (Nord, Sud, Pic) et le Koudiate Zerga. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres, réalisant les conditions types pour l'exploitation à ciel ouvert (Lazizi M., 2012).

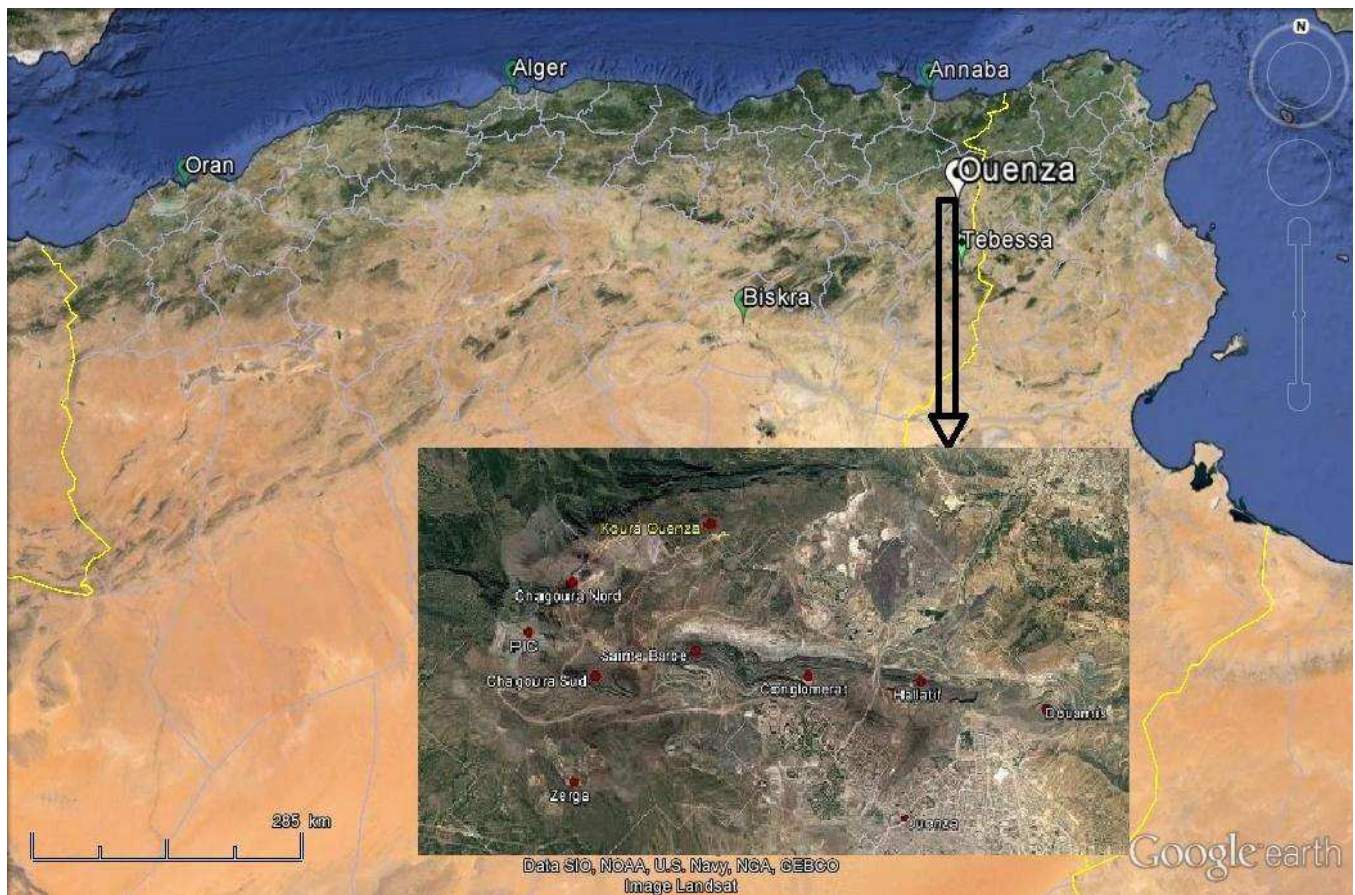


Figure I.1 Situation géographique du gisement de l'Ouenza.

I.2. Géologie Régionale

Le massif de l'Ouenza est compris entre le Tell et l'Atlas Saharien. Il appartient à la zone des hautes plaines, caractérisées par de gros massifs calcaires émergeant de 600 à 1200m. La géologie régionale du massif de l'Ouenza est présentée dans la figure I.2.

Les Monts constitutifs de cette région, sont dits « Monts de Mellègue » (Dubourdiou G., 1956). Ce sont des anticlinaux ou des synclinaux perchés. Ils ne constituent pas de chaînons continus mais des reliefs isolés et souvent escarpés. Ils surgissent comme des îles au-dessus des régions basses faiblement ondulées ou rigoureusement uniformes.

La région est caractérisée par des reliefs élevés. L'altitude maximale est observée au niveau du Djebel Ouenza qui culminait à 1288m avant l'exploitation. Elle avoisine actuellement les 1225m.

Le réseau hydrographique est assez dense, très développé, bien que peu abondant en eau. Les principaux cours d'eau sont Oued Mellègue qui limite la région au nord et Oued Kseub qui constitue la limite sud. Leurs débits en eau est très irréguliers et dépend beaucoup de la pluviométrie saisonnière.

I.3. Lithostratigraphie

L'échelle stratigraphique de la région de Djebel Ouenza a été établie par Dubourdiou G. (1956) et présent dans (la figure I.3). En se basant sur des travaux anciens, nous nous contenterons de donner un bref résumé sur la lithostratigraphie rencontrées dans les différents étages géologiques de cette partie des monts de Mellègue. Cette région est caractérisée par les formations datées du Trias, Jurassique, Crétacé, Éocène, Miocène et Quaternaire.

I.3.1 Trias

Dans la région des monts de Mellègue les formations les plus anciennes rencontrées à l'affleurement appartiennent au Trias. Il s'agit essentiellement des marnes bariolées à gypse qui renferment également des dolomies et calcaires dolomitiques, à fins lits micro-quartziques ainsi que des grès rouges. Les formations triasiques ont été remontées en surface grâce à des phénomènes diapiriques prenant une extension remarquable au Nord-Est du Djebel Ouenza où on peut les suivre sur près de Vingt Kilomètre. Dans ce Trias diapirique, il n'est pas possible d'établir de succession lithologique valable au sein des affleurements toujours disloqués et chaotiques. En certains endroits de la région, quelques éléments de roches éruptives de types « Ophite » se trouvent emballés dans les masses marno-gypseuses des structures diapiriques.

I.3.2 Jurassique

Les dépôts du Jurassique n'ont pas été observés jusqu'à présent dans la région de l'Ouenza. Toute fois Dubourdiou (1956) a signalé dans le « Socle » de la série carbonatée de l'Ouenza (secteur Conglomérat) la présence d'une brèche gypsifère sédimentaire renfermant de gros débris de calcaires dolomitiques avec des fossiles radiole que l'on peut dater du Jurassique ou au Crétacé inférieur.

I.3.3 Crétacé

I.3.3.1 Crétacé inférieur

Le Crétacé inférieur est représenté par les étages suivants :

I.3.3.1.1 Barrémien

Il affleure dans l'anticlinal de Sidi Embareka au Nord-Est de Djebel Ouenza (Dubourdiou, 1956). Il est constitué de marnes grises et jaunes non fossilifères, intercalés par des calcaires argileux, noduleux. Sa puissance est de 200m en moyenne (Dubourdiou ; 1956).

I.3.3.1.2 Aptien

Il affleure sur des vastes surfaces, et de ce fait il devient le plus remarquable dans la région. Les dépôts de l'Aptien sont distribués surtout dans les bandes soulignées par les diapirs, dans le noyau des anticlinaux, et dans d'autres horsts de la région. Ils sont étudiés en détail par rapport à leur rôle de milieu encaissant pour la mise en place de minéralisations polymétallique et ferrière.

L'étude lithostratigraphique de l'Aptien effectuée dans le massif de l'Ouenza a montré la succession suivante :

a. Aptien marneux

Il est remarquable par la dominance des marnes verdâtres qui se forment des pseudo-bancs. Elles représentent les termes les plus anciens de l'Aptien (Masse et Thieuloy, 1979) d'âge Aptien inférieur à moyen. Ces marnes alternent avec des calcaires gréseux ou des grès sur une vingtaine de mètres. Les grès sont à ciment sparitique et à oxydation partielle. L'ensemble est surmonté par des bancs de calcaires d'une épaisseur moyenne de 30m.

b. Aptien calcaire

Il surmonte l'Aptien marneux, renfermant le plus souvent des Miliolites, des Rudistes, des Orbitholines et des Lamellibranches (Chikhi-Aouimeur, 1980). Ces niveaux sont caractérisés par l'abondance du quartz automorphe, avec une épaisseur qui varie entre 108m et 172m. Ces calcaires sont considérés comme un métallotectite lithologique puisqu'ils encaissent l'essentiel de la minéralisation ferrière et/ou polymétallique (Dubourdieu, 1956; Bouzenoune, 1993).

I.3.3.1.3 Zone de Clansayes

Il affleure dans divers anticlinaux de la région étudiée, il s'agit des marnes grises, jaunes à Ammonites avec des calcaires gréseux (Dubourdieu, 1956). Sa puissance est de 100 à 200m. La formation aptienne présente une épaisseur totale qui varie de 250 à 600m (Dubourdieu, 1956).

I.3.3.1.4 Albien

L'Albien est marqué par une faune riche en Ammonites. Durant l'Albien supérieur, la couverture albo-aptienne est percée par le Trias, entraînant le redressement des couches et la complexité des structures (plis évases, plis en champignon, etc.), généralement scellées par le Vraconien (Othmanine, 1987 et Bouzenoune, 1993).

L'Albien se caractérise par des marnes argileuses dans la partie inférieure, des calcaires argileux dans la partie moyenne et des marnes noires dans la partie supérieure. Dubourdieu, (1956) a étudié plusieurs massifs de la région de l'Ouenza. Il a démontré que les calcaires aptiens sont surmontés par des marnes datées de l'Albien inférieur par des Ammonites. La puissance des dépôts albiens est d'environ 400 – 500 m.

I.3.3.1.5 Vraconien (Albien terminal)

Il est généralement transgressif sur le Trias à l'Ouenza (Thibieroz et Madre, 1976) et sur l'Aptien au Djebel Slata (Smati, 1986) et au Djebel Hmeimet. Il est composé totalement de marno- calcaires gris, bleus, séparant des petits bancs de calcaires et vers le bas des marno-calcaires très gréseux de 500m d'épaisseur.

I.3.3.2 Crétacé supérieur

Le Crétacé supérieur Il comprend les étages suivants :

I.3.3.2.1 Cénomanién

Il est constitué de marnes argileuses verdâtres, caractérisées par des intercalations de la calcite fibreuse.

Dubourdiou. (1959) a distingué la présence de deux assises : L'assise inférieure qui est formée par des marnes jaunes avec des marno-calcaires blancs feuilletés, et l'assise supérieure constituée des calcaires argileux, gris blancs avec quelques niveaux de calcaires gris noirs. La puissance du Cénomanién est de 600 à 900 m.

I.3.3.2.2 Turonien

Les formations du Turonien n'affleurent qu'à Koura Ouenza aux environs de l'Ouenza. Elles constituent les flancs des grands anticlinaux et synclinaux. Elles sont présentées par des calcaires marneux en plaquettes gris- foncé à noir, et à la base, avec de la matière organique et de rares concentrations pyritiques et marcacitiques.

Ces calcaires caractérisent stratigraphiquement le Cénomanién supérieur et le Turonien inférieur. Le Turonien supérieur est caractérisé par le développement des faciès marno-calcaires. La puissance totale du Turonien est de 150 à 250 m.

I.3.3.2.3 Coniacien

L'épaisseur des dépôts de cet étage varie de 270 à 280 m de marnes gris-bleu avec quelques intercalations marno-calcaires blanches qui contiennent des fragments de tests d'inocérames.

I.3.3.2.4 Santonien

Il est constitué de marnes de couleur gris-bleu, alternant avec de petits bancs de calcaires marneux blanc-ocres, un peu crayeux, qui contiennent des inocérames et des ammonites. Deux ou trois lentilles calcaires qui apparaissent dans le Santonien à l'Ouest du plateau d'El Guessâat, représentent un faciès calcaire de ce niveau.

I.3.3.2.5 Campanien

Le Campanien de la région de l'Ouenza est représenté par des marnes argileuses de couleur gris foncée, des calcaires blancs a intercalation de petits bancs de marnes gris claires, avec une puissance moyenne d'environ 500 à 600 m.

I.3.3.2.6 L'Eocène

L'Eocène inférieur et moyen sont représentés par des calcaires à silex et des calcaires à Nummulites, près des périmètres des Monts de Mellègue, avec une puissance de 200 m.

I.3.3.2.7 Miocène

Le Miocène inférieur et moyen présente des dépôts qui reposent transgressivement sur les formations d'âge albien-sénonien et même sur le Trias. Il s'agit d'une accumulation de marnes et de grès. A leur base, les formations miocènes comportent des conglomérats contenant des éléments de calcaires variés, de silex gris, des galets ferrugineux et des éléments empruntés au Trias, témoignant d'une activité diapirique (Bouzenoune, 1993), avec une épaisseur moyenne de 150m (Dubourdieu, 1956).

I.3.3.2.8 Quaternaire

Il est caractérisé par des dépôts qui se répartissent dans les parties basses des reliefs et couvrent des surfaces importantes. Il renferme des croûtes de calcaires, limons, éboulis, cailloutis et poudingues avec une épaisseur de 10 à 30 m dans les fossés (Dubourdieu ; 1956).

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

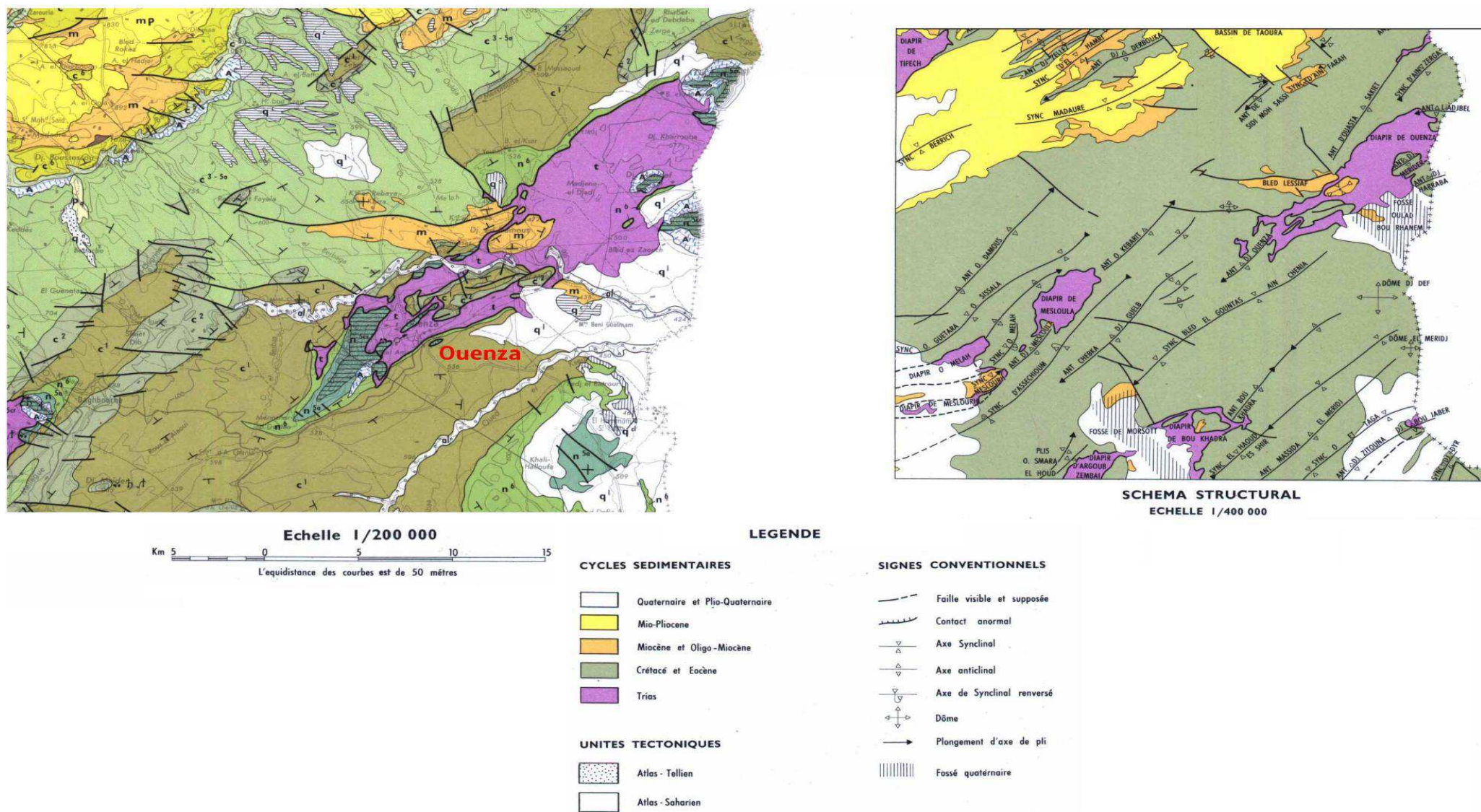


Figure I.2 Carte géologique et structurale de la région de l'Ouenza (Lazizi M., 2012).

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

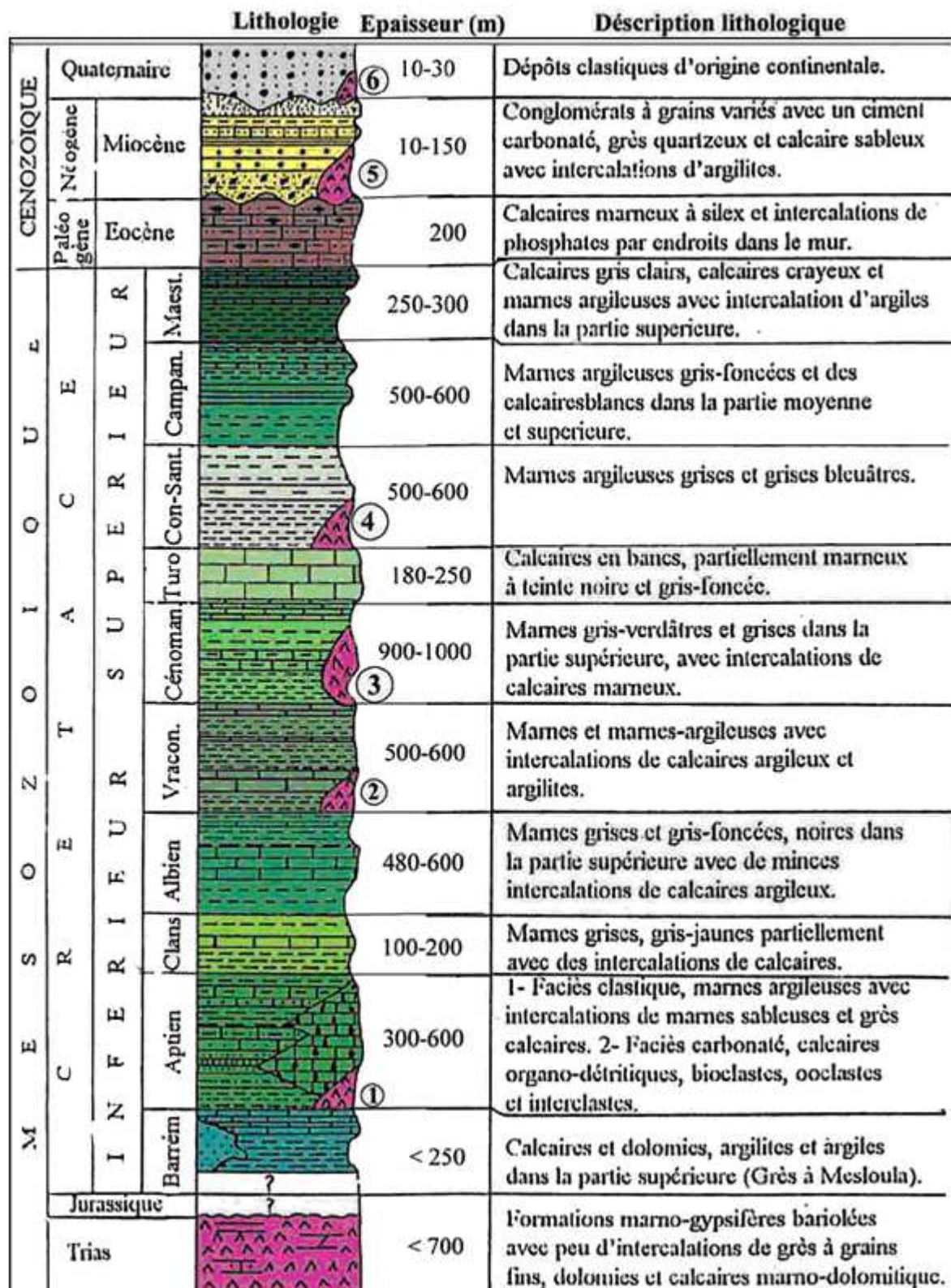


Figure I.3 Coupe lithostratigraphique des monts du mellègue d'après :

[Dubourdiou (1956, 1959) ; Madre (1969) ; Thibieroz and Madre (1976) ; Chikhi (1980) ; Bouzenoune (1993).]

I.4 Type du gisement

Le long de la frontière Algéro-Tunisienne, un certain nombre de dépôts sont localisés près de diapirs évaporitiques du Trias. Les carbonates de fer (ankérite-sidérite), oxydés partiellement en hématite près de la surface, sont associés généralement à des concentrations de Pb, Zn, Cu, Ba et F. Certains gisements de fer, importants, contiennent de la galène, sphalérite, barytine et fluorine (Ouenza, Boukhadra, Djérissa), alors que certains gisements de Pb-Zn contiennent de faibles concentrations de sidérite (Slata, Bou Jabeur, Mesloula).

Les gisements sidéritiques associés à des roches carbonatées marines sont connus principalement en Europe et en Afrique du Nord où ils se produisent dans des environnements métamorphiques (Erzberg en AUTRICHE ; Batère en FRANCE) ou sédimentaires (Bilbao en ESPAGNE ; Ouenza en ALGERIE ; Djérissa et Hammeima en TUNISIE).

Les roches les plus réactives aux fluides minéralisateurs sont les dolomies ou les calcaires et les corps minéralisés sont stratiformes, massif ou dans les veines. Les sulfures, la barytine et rarement la fluorine sont associés aux carbonates de fer.

L'origine de ces gisements a été attribué à des fluides magmatiques hydrothermaux (Betier et al 1952 ;) ou à des formations sédimentaires syngénétiques (de Madre, 1969 ; Soubias 1972 ; Mahjoubi et Samama, 1983). Récemment, il a été suggéré que ces gisements ont été formés par la circulation en profondeur des formations ou eaux métamorphiques (Rouvier et al 1985 ; Pohl et al 1986 ; Frimmel 1988 ; Gil, 1991).

Le massif de l'Ouenza est situé dans l'Atlas saharien, dans un bassin en subsidence dans l'avant-pays de l'orogénèse de l'Afrique du Nord. Cet autochtone plié est caractérisé par de nombreux diapirs évaporitiques du Trias, qui sont traversés par des grabens du tertiaire. La séquence sédimentaire est mince (0-50m) sur la crête de la zone élevée et plus épaisse (5000m dans le crétacé) vers les zones périphériques relativement éloignés. Il est composé principalement de calcaire, de marnes et de grès.

À Ouenza, la séquence du Crétacé est plissée en un anticlinal orienté NE-SW. Le cœur (noyau) de ce pli est occupé par des formations triasiques (diapirisme), qui a pénétré la couverture sédimentaire du Crétacé au cours des étapes intermédiaires et tardives de l'évolution du bassin (Aoudjehane et al. 1992).

Le diapir de l'Ouenza est une structure parmi tant d'autres qui ont une tendance NE-SW, le long de la frontière Algéro-Tunisienne (Figure 5). Il a une forme plus ou moins elliptique, orientée NE-SW et est flanquée à son extrémité sud-ouest par une pericline composé d'une séquence albo-aptienne.

Le gisement sidéritique de l'Ouenza est situé à proximité des formations évaporitiques du Trias. La minéralisation se produit principalement dans les calcaires néritiques de l'Aptien, qui hébergent d'importantes concentrations de fer et de produits mineurs tels que le Pb, Zn, Cu, Ba et F.

Le minerai de fer est constitué de carbonates de fer, qui ont été partiellement oxydé en hématite. En grain fin l'ankérite et la sidérite remplacent le calcaire, tandis que la sidérite et l'ankérite spathique se mettent en place dans les veines. Des variations limitées dans les compositions chimiques et isotopiques des ankérite et sidérite ont été observées, elles indiquent qu'ils ont précipités à partir du même fluide. Plus tard, le dépôt des minéraux de Pb, Zn, Cu, Ba et F est contrôlée par des fractures orientées NE-SO et SE-NW.

I.5 Minéralisation

La mine de l'Ouenza renferme d'énormes quantités d'un minerai de fer non phosphoreux, très riche et très pur, d'une teneur moyenne de 53%.

Les phénomènes de métasomatose ont donné naissance à de grandes masses d'hématite rouge. Le minerai affleure sur des longueurs atteignant parfois 250 mètres et des hauteurs de 45 mètres, réalisant les conditions types pour une exploitation à ciel ouvert. La teneur moyenne de l'hématite est de 45 à 60 % de fer. Elle contient entre autre : 2 % de manganèse, 0,005 % de phosphore, 0,03 % de soufre, 0,02 à 0,03 % de silice et 1,50 % de magnésie.

Le minerai de fer caractérisant le gisement ferrugineux de la mine de l'Ouenza, se présente sous forme d'amas plus ou moins irréguliers au sein des calcaires récifaux de l'aptien. Les assises calcaires ont été le siège de phénomènes de substitution favorisés par la fracturation (cassures, fissures) et ont donné naissance à de puissantes zones minéralisées. Les filons de fer résultent de la transformation du carbonate de chaux en carbonate de fer au contact des solutions de sels ferreux qui ont imprégnées les bancs calcaires.

La morphologie des corps minéralisés est relativement complexe. La majorité des corps disposés près de la surface se présentent en général uniformément et se ramifient vers la profondeur en plusieurs apophyses de dimensions variables.

Le gisement de fer de l'Ouenza se présente sous forme d'amas, plus ou moins irréguliers au sein des calcaires récifaux de l'aptien dont ils ont partiellement pris la place.

D'après les conclusions tirées par G. Dubourdiou (1956), les masses de minerai les plus importantes sont développées particulièrement au voisinage des grandes failles de direction NW qui jouent le rôle de structure nourricière. Au-delà de ces accidents majeurs, sur plus ou moins de grandes distances, les calcaires sont affectés par le processus de métasomatose importante.

La minéralisation ferrière du gisement de l'Ouenza est caractérisée par la présence d'Hématite-Limonite ou Goethite (minerai secondaire) résultant de l'oxydation du minerai primaire qui est la sidérose, située sous le niveau hydrostatique.

La côte du niveau hydrostatique varie légèrement d'un quartier à l'autre. Elle se situe aux environs de 550 mètres (100 m sous la surface).

La sidérose est particulièrement développée dans les quartiers Conglomérat et Hallatif. Elle affleure aussi au niveau des quartiers Sainte barbe, Chagoura Sud et Zerga mais d'une manière sporadique.

Certaines substances accessoires, comme le cuivre gris en veines, la fluorine, la barytine ou la dolomie (plus ou moins ferrière), accompagnant le minerai de fer sont à signaler dans les quartiers de Douamis, Hallatif et Zerga.

La barytine et la fluorine s'observent en particulier au niveau ou au voisinage des failles.

Le minerai exploité, noir ou rougeâtre, finement poreux parfois pulvérulent, se présente aussi sous forme de concrétions ou bien de géode. Il est remarquable par l'abondance de petits rhomboèdres épigénisés et par les formes cristallines du sulfure de fer. Manifestement à l'état d'hématite, il est assez chargé en oxydes de manganèse et comporte naturellement certaines impuretés (fines aiguilles de quartz, calcite, ...). À l'œil nu, le minerai est compact dans la plupart des cas et il est exceptionnel d'y rencontrer des formes cristallines nettes (Sidérose).

Selon Dubourdieu, la minéralisation n'a pu se faire qu'à la suite des premiers bouleversements tectoniques (Nummulitique) et qu'elle est, d'autre part antérieure au chevauchement récent de l'Ouenza.

I.6 Conditions minières

Suite à la structure et la nature des roches, Le complexe minier de l'Ouenza est caractérisé par de nombreux gisements ferrugineux représentés par Chagoura-Sud et Pic, Chagoura-Nord, Sainte-Barbe (Ilot), Conglomérat, Hallatif, Douamis et Zerga (Figure I.4).

Actuellement l'exploitation porte sur les gisements Chagoura-Sud et Chagoura-Nord. Pour les quartiers restants, il y a quelques-uns qui sont en phase d'épuisement, et des autres qui nécessitent un volume considérable de travaux de développements et d'aménagements (pistes d'accès, plateforme de réception, décharge...etc.) ou ils ont des problèmes techniques qui empêchent leur exploitation c'est le cas pour le quartier Zerga. Ce quartier est à l'arrêt vu le problème de l'instabilité des gradins qui constitue un obstacle à son exploitation. Ce phénomène peut nuire à la sécurité des mineurs et des engins. Alors, il est mis hors exploitation, jusqu'à résolution de ce problème.

La catégorisation des réserves a été faite en tenant compte des principes suivants :

- La catégorie B a été attribuée à tous les corps situés au-dessus du niveau 845 jusqu'à la surface, et ce vu l'existence de plusieurs affleurements mis à jour lors de l'exploitation et la maille des sondages qui est trop serrée, soit 35x25m en général.
- La catégorie C1 a été attribuée pour les parties des corps incluses entre le niveau 785 et 845 où la maille de prospection est plus large, soit en général 50x50m.
- Quant aux parties des corps situés sous les niveaux 785 jusqu'à 733 et plus bas où les sondages sont rares (à cause de la grande profondeur) et les travaux miniers à ce niveau ne sont pas bien développés. Les réserves sont classées dans la catégorie C2.

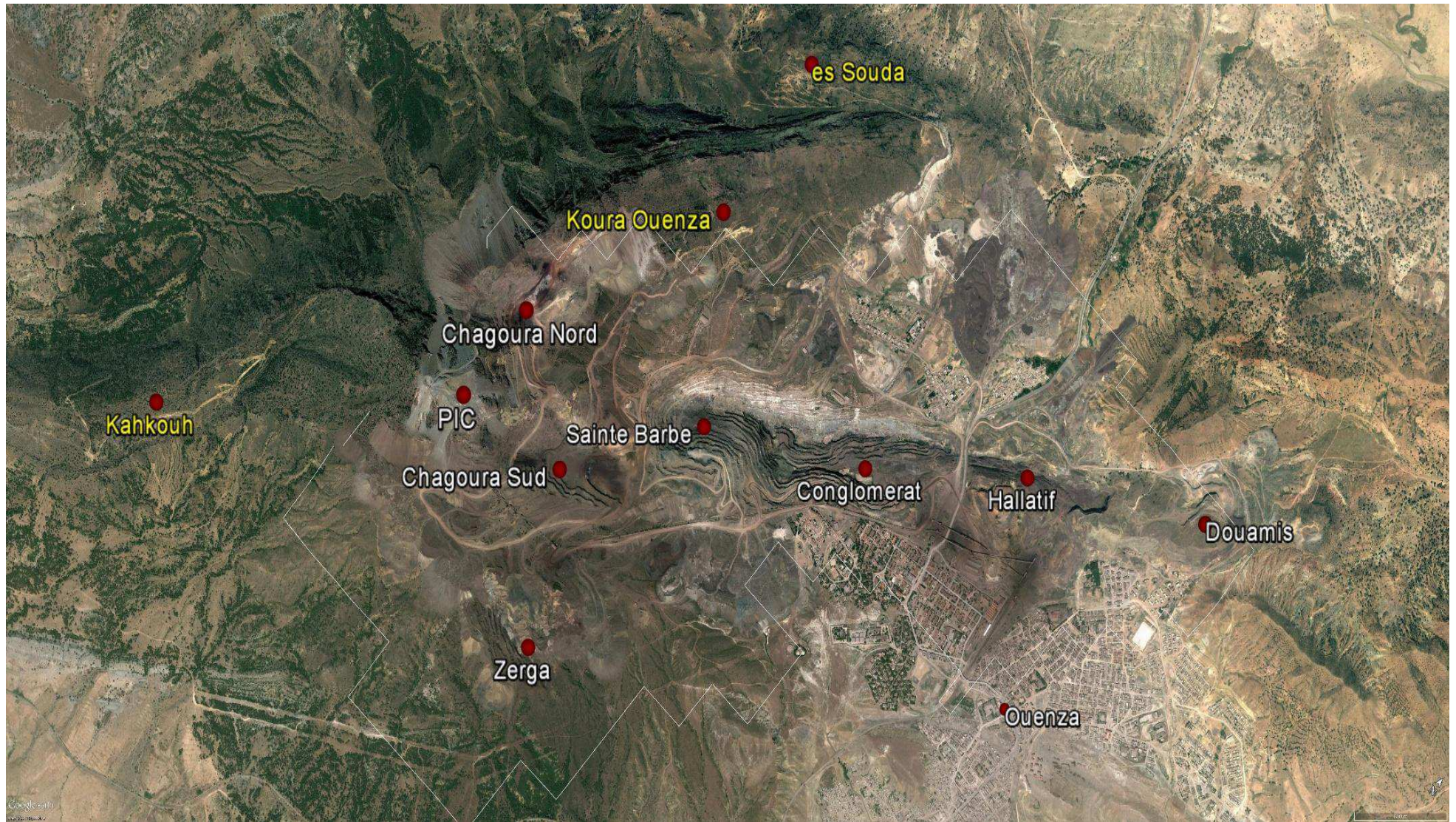


Figure 1.4 Disposition des gites métallifères de la mine de l'Ouenza.

I.7 Etat des réserves

En générale, les réserves des corps minéralisés des quartiers ayant été prospectés par des travaux miniers (galeries et recoupes) et par des sondages verticaux, inclinés et horizontaux exécutés soit à partir de la surface soit à partir des galeries sur de différents niveaux. Les corps prospectés suivant des mailles de 50x25m ou 25x12m sont classées dans la catégorie B. Les blocs de réserves prospectés par une maille plus large 50x50m, sont arrangés dans la catégorie C1. Quant aux corps délimités par des sondages uniques où l'information géologique est insuffisante et les parties extrapolées de C1, sont classées dans la catégorie C2.

Le calcul des teneurs moyennes par corps et par catégories est fait par des méthodes différentes selon le cas pour chaque quartier :

- la méthode de la moyenne pondérée : Une pondération par rapport à la longueur de l'intervalle minéralisé, puis par rapport à la surface limitée par les sondages sur les coupes. En fin par rapport au volume inclus entre deux coupes voisines.
- La méthode des coupes verticales transversales : Le calcul du volume de minerai inclus entre deux coupes est effectué par l'application de formules géométriques adéquates.

Les tableaux I.1 et I.2, présentent les réserves géologiques et les réserves exploitables des différents quartiers miniers au niveau de mine de l'Ouenza. Les réserves géologiques sont arrêtées à la fin de l'année 2013 et celle des réserves exploitables sont arrêtées à la fin juin 2013.

Tableau I.1 : État récapitulatif des réserves exploitables actualisées au 30/12/13 (plan d'exploitation BP, 2014)

Quartier	Réserves (T)	Fe (%)	Stérile (T)	Taux de découverte
Chagoura Pic	6 637 049	53,5	26 482 796,30	3,99
Chagoura Sud	3 743 695	48,1	9 016 139,50	2,41
Chagoura Nord	10 153 035	49,7	21 889 435	2,16
St-Barbe	4 680 303	48,44	19 378 488	4,14
Conglomérat	376 686	46,6	1 779 731	4,72
Douamis	8 425 289	53,9	42 070 918	4,99
Zerga	2 350 266	42,7	2 862 127	1,22
Total	36 366 323	48,99	123 479 635	3,38

Les ressources minérales situées à l'intérieur de l'enveloppe de la fosse finale sont considérées comme prospect raisonnable d'extraction économique et de ce fait elles sont reportées comme étant des « Réserves Exploitables ». Les ressources minérales situées à l'intérieur et en dehors de l'enveloppe de la fosse finale sont reportées comme étant des « Réserves Géologiques ».

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

Tableau I.2 : État récapitulatif des réserves géologiques actualisées au 31/12/2013 (FERPHOS, 2014)

Quartier	Catégorie B	Fe %	Catégorie C1	Fe %	Catégorie C2	Fe %	Total	Fe %
Chagoura Sud	18 307 021.5	50	1 810 584.5	49	/	/	20 117 606	49.9
Chagoura Pic								
Chagoura Nord	414 213.6	50.7	13 254 835.2	49	7 041 631.2	48.6	20 710 680	48.9
Sainte Barbe	1 290 081.8	47.8	6 837 433.5	47.3	4 773 302.6	48.6	12 900 818	47.8
Conglomérat	1 863 500	48.2	4 147 790	47	/	/	6 011 290	47.4
Hallatif	345 172	49.4	3 747 581	51.3	838 275	50.1	4 931 028	51
Douamis	6 230 101.9	53	50 973 56.1	53	/	/	11 327 458	53
Zerga	1 758 051	43.9	639 292	42,7	799 114	40.5	3 196 457	42.7
Total	30 208 141.8	-	35 534 872.3	-	13 452 322.8	-	79 195 337	-

I.7.1 Nature de substance extraite

Le minerai de fer exploité à la mine de l'Ouenza est constitué principalement par des minerais oxydés hematito-limonitiques et de sidérites primaires. L'hématite qui se forme par oxydation de la sidérose constitue principalement le minerai de fer exploité dans la carrière de l'Ouenza

La totalité du minerai extrait des mines de l'Ouenza est consommée par le complexe sidérurgique d'El Hadjar dans la wilaya d'Annaba. Cette mine et celle de Boukhadra constituent l'unique source d'approvisionnement du complexe en minerai de fer. La teneur moyenne de 50 % de Fe a été convenue entre le fournisseur du minerai et le consommateur (complexe d'El Hadjar). A cause d'hétérogénéité dans la composition chimique du minerai d'un quartier à l'autre dans le même gisement, la mine a été contrainte de livrer un minerai homogénéisé.

Les différents quartiers de la mine de l'Ouenza fournissent en effet des minerais de composition hétérogène. En plus de cette disparité qualitative du minerai, ces différents gîtes se distinguent aussi par la quantité de réserves en minerai qu'ils renferment. Sur la base de la teneur en fer, ces réserves ont été regroupées en trois catégories (FERPHOS, 1991) :

- un minerai moyennement riche dont la teneur en fer est supérieur à 50 %. Il est essentiellement localisé dans les quartiers de Chagoura Sud, Douamis, Sainte Barbe, Conglomérats et Hallatif ;
- un minerai pauvre dont la teneur en fer est comprise entre 40 et 50 % localisé dans les quartiers de Zerga et Chagoura Nord ;
- un minerai très pauvre dont la teneur en fer est inférieur à 40 %. Ce minerai se trouve surtout à Koudiat Es Souda et dans la partie Sud de Sainte Barbe.

I.7.2 Méthode d'exploitation

Le mode d'exploitation appliqué au niveau des différents quartiers de la mine de l'Ouenza est par fonçage avec un seul bord exploitable, le contour de la mine n'étant pas fermé. L'exploitation de tels gisements, disposés sur un flanc de coteau de pente 35°, se fait de haut en bas. L'extraction du minerai est réalisée par gradin de 12 à 15 m (rarement 18 m). La dimension d'angle du talus varie de 70 à 80° et une largeur des bermes de 7 à 12 m. Selon le projet d'exploitation, la fosse finale aura une profondeur de 620 m, l'angle du bord de la mine sera de 32° (Chain 2006).

Vu les propriétés mécaniques des roches et le type de matériel utilisé pour le chargement du tas des roches abattues, la hauteur moyenne des gradins est fixée à environ 15m. Les paramètres d'exploitations sont représentés sur le Tableau I.3.

Tableau I.3 Paramètres d'exploitation de la mine de l'Ouenza.

Paramètres Quartiers	Hauteur des gradins	Nombre de gradins	Inclinaison des talus (en degrés)	Largeur des bermes, m
Zerga	12-18	18	70-80	8-12
Pic	10-15	9	70-80	6
Chagoura Sud	15	22	70-75	8
Chagoua Nord	10-15	12	75-80	8-12
6 Mai	12	22	70-80	6-12

I.7.2.1 Travaux d'abattage

L'abatage représente un paramètre très important lors de l'exploitation, il est réalisé par les travaux de forage et de tir. Le cycle d'abatage comprend les opérations suivantes :

- Choix de l'emplacement des trous dans le chantier
- Foration des trous
- Chargement des trous par l'explosif
- Tir

I.7.2.2 Foration

Après le choix de l'emplacement de la plateforme à abattre selon un plan de forage et de tir élaboré par les responsables des quartiers, la foration des trous de mine se fait à l'aide des sondeuses de types Ingersoll Rand 10 (monté sur pneu), Atlas Copco ROC L8. Le diamètre des trous de foration est de 166 mm, les chiffres prévisionnels de productions des sondeuses sont présentés dans le tableau I.4.

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUEENZA

Tableau I.4 Chiffres prévisionnels de productions des sondeuses (selon BP fait par le bureau méthode, Ouenza, 2015).

Machine	Production (M/H)	Heures effectives/an	Rendement (%)	Production Annuelle (T)
Ingersoll Rand 10	18	5104	38.86	35 705
Atlas Copco ROC L8		5104	33.5	30 777
Total	36	10 208		66 479

I.7.2.3 Tir

L'exploitation du minerai et du stérile se fait par les tirs d'abattage, dont le but est de fragmenter la masse rocheuse afin de permettre son évacuation. En moyenne, il y a huit rotations par mois, ce qui permet d'atteindre la production journalière de minerai et de stérile.

Dans la mine de l'Ouenza, il y a deux types d'explosifs qui sont utilisées en combinaison dans le même trou de mine :

- Anfomyl : contenant dans des sacs
- Marmanite : contenant dans des cartouches

Après que les trous sont chargés (Figure I.5) jusqu'à une longueur de charge bien déterminée, il reste environ de 4 à 5.5 m pour le bourrage. Les roches pulvérulentes dégagées lors de l'opération de forage sont utilisés comme matériau de bourrage. En dernière étape, les trous de mines de chaque volé sont relier les uns aux autres par des cordeaux détonant. Le tir est déclenché électriquement à l'aide d'un exploseur de marque Schaffler 816. Si le tir donne de gros blocs, difficiles à charger, alors un débitage secondaire sera entrepris. Cette situation se produit en général dans les calcaires où le massif est fracturé et la roche est saine. Les paramètres du tir utilisés dans la mine de l'Ouenza sont résumés dans le tableau I.5.

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

Tableau I.5 Paramètres techniques d'abattage.(selon BP fait par le bureau méthode, Ouenza, 2015).

Les paramètres	Unité	Mesures
Hauteur de gradin (Hg)	m	15
Profondeur de trou (Pt)	m	17
Longueur de Sur Foration (Lsf)	m	2
Ligne de moindre résistance (W)	m	5-6
Angle de talus	Degré	75
Distance entre les trous (E)	m	4-5
Nombre de rangées	u	1
consommation spécifique	Kg/m ³	0,5
la charge explosif /trou	Kg	175

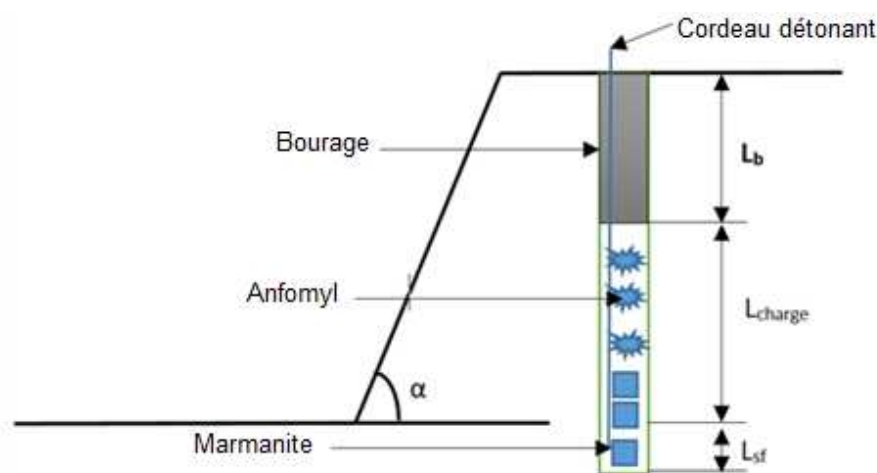


Figure 1.5 Mode de chargement d'un trou de mine (selon BP fait par le bureau méthode, Ouenza, 2015).

Remarque : Les valeurs de ces paramètres ont été récupérées d'un plan de tir primaire exécuté sur les quartiers Chagoura nord et Sud. Ce plan a été réalisé dans le mois d'Août de l'année 2015 par le service d'abattage de la mine de l'Ouenza.

I.7.2.4 Chargement et transport

Dans la mine de l'Ouenza, ils utilisent des excavateurs d'une capacité de production estimé à 350 t/h et des chargeurs de capacité de production qui peut attendre 250 t/h comme moyen de chargement de tout venant dans les camions de transport.

Les moyens de transport qui existent actuellement au niveau de la mine sont :

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

- le transport par camion est appliqué dans tous les quartiers de la mine, ces camions ont une capacité de charge qui varie entre 55 et 65 tonnes

- transport par convoyeur a bande, qui est un moyen très important dans le complexe de l'Ouenza. Assurant aussi le cheminement de produit fini à la sortie de concasseur jusqu'aux trémies de chargements au niveau de la gare.

Le minerai est conduit vers le concasseur qui peut traiter des blocs de dimensions inférieures à un 1 mètre. Le tableau I.6 montre les chiffres prévisionnels de productions des engins de chargement et de transport

Tableau I.6 : Chiffres prévisionnels de productions des engins de chargement et de transport (selon BP fait par le bureau de méthode, Ouenza, 2015).

Engin	Opération	Production(t/h)	Heures effectives/an	Rendement (%)	Production Annuelle (T)
Pelle Komatsu PC1100	Chargement	350	8 040	34,5	970 830
Pelle Komatsu PC1250	Dumper		7 776	34,5	938 952
Total		700	15 816		1 909 782
Chargeuse Cat 988F	Alimentation	250	8 520	39,06	831 978
Chargeuse Cat 988H	Concasseur		8 040	44,1	886 410
Total		1 200	16 560		1 718 388
Dumper Cat 773D 55t	Transport de produit extrait	100	7 776	30,36	236 079
Dumper Cat 773E 55t			7 776	44,85	348 754
Dumper Cat 773E 55t			7 800	44,85	349 830
Dumper Cat 773F 65t		120	7 776	50,37	470 013
Dumper Cat 773F 65t			8 040	44,85	432 713
Total		1 200	39 168		1 837 388

I.7.2.5 Préparation du minerai

Une fois le minerai extrait à partir des chantiers il est soumis uniquement au traitement mécanique qui consiste à la réduction des dimensions des blocs afin d'obtenir une granulométrie qui répond aux exigences des moyens de transport. Dans la mine de l'Ouenza il existe deux stations de concassage :

- La première station est située au niveau 803 m équipé par un concasseur à mâchoires, elle est alimentée par les camions venant du quartier Chagoura Sud, Nord et le pic et précédemment du quartier Zerga. Le déchargement se fait dans une trémie de réception de capacité de 450 t.

CHAPITRE I ANALYSE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA MINE DE L'OUENZA

- La deuxième station de concassage est située au niveau 660 près de la gare d'expédition. Cette station est équipée par un concasseur à cône, elle est réservée pour le quartier Ilot et parfois il est alimenté par le produit de venant des autres quartiers lorsque le concasseur 830 est en arrêt. Le déchargement se fait dans une trémie de réception de capacité atteignant 200 t.

Les concasseurs sont reliés aux trémies de chargements par des convoyeurs à bande sur une distance de 3000 m. Les blocs de minerai envoyés au concasseur ont une taille nettement inférieure à la limite demandée pour le concasseur, car il y a un triage au niveau du chantier. Les blocs hors gabarits sont mis de côté pour subir un débitage secondaire, la production prévisionnelle des concasseurs est représentée sur le Tableau I.7.

Tableau I.7 : Production prévisionnel des concasseurs (selon BP fait par le bureau de méthode, Ouenza, 2015)

Appareille	Production (t/h)	Heures effectives/an	Rendement (%)	Production Annuelle (T)
Concasseur RL- 660	500	5344	35,28	942 682
Concasseur RL- 803		5360	38,08	1 020 544
Total	1 000	10 704		1 963 226

I.7.2.6 stériles francs

La mise à terril consiste à déposer les stériles sur un terrain à proximité de la carrière. Les terrils doivent avoir une capacité suffisante, un terrain commode est situé en dehors de terrain productif mais pas très éloigné du champ minier. Les terrils peuvent être intérieurs ou extérieurs.

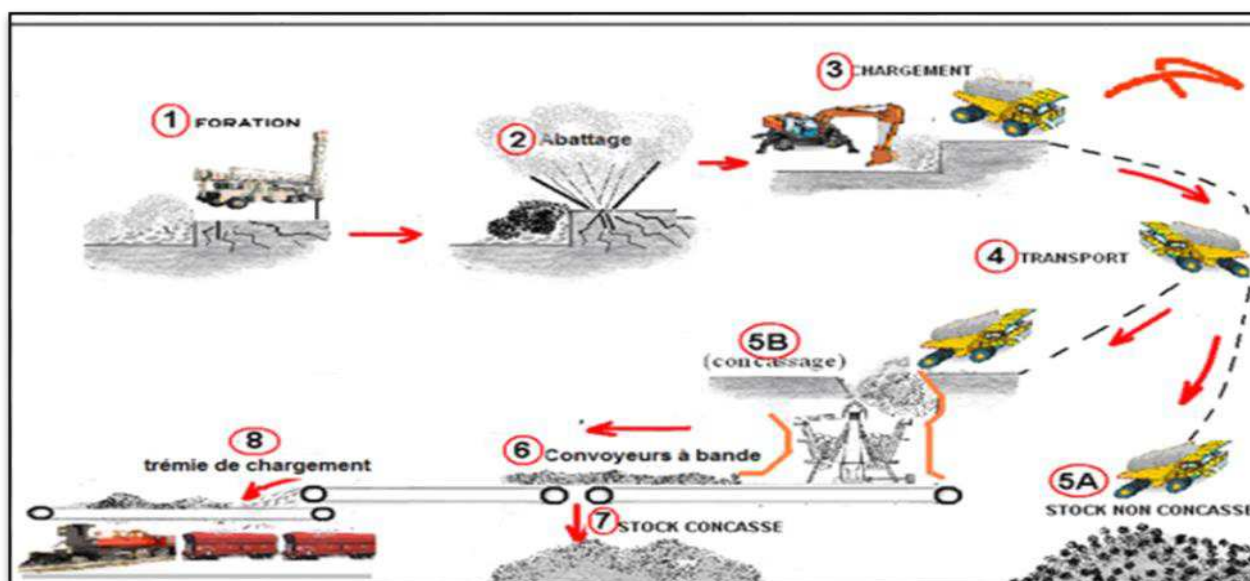


Figure I.6 Schéma représentatif des opérations minières au niveau de complexe de l'Ouenza (selon BP fait par le bureau méthode, Ouenza, 2015).

I.7.2.7 Etat Actuel de la mine

D'après le Bureau d'étude et de développement (BED) au niveau de la mine, les chiffres de production montrent une cadence juste moyenne avec laquelle travaille la mine par rapport aux objectifs fixés :

- Minerai extrait : 59 %
- Stérile : 32 %
- Minerai Concassé : 53 %
- Expédition : 72 %

Le taux de réalisation du minerai est supérieur à celui du stérile. Alors que dans les normes d'exploitation c'est le contraire qui doit être effectué. Cette non-conformité dans l'exploitation est due :

- Au manque de moyens matériels et de sa vétusté, qui ont fait que le peu existant est dédié exclusivement à la production du minerai au détriment du stérile.
- À la contrainte du respect des engagements pris envers le client Arcelor Métal Annaba (la satisfaction du client passe en premier par rapport au développement). Cette stratégie a engendré un retard considérable dans le développement du stérile, une déformation des gradins (jumelage) de la carrière ce qui rend leur exploitation ultérieure de plus en plus compliquée, et aussi un blocage des réserves exploitables (cas du Chagoura Pic-Sud).

Conclusion

- Le gisement ferrifère de l'Ouenza repose sur le flanc nord d'un massif montagneux qui culmine à 1288 m au niveau du pic, il est d'environ de 12km de longueur et 5km de largeur.
- Les Monts constitutifs de cette région, sont dits « Monts de Mellègue » Ce sont des anticlinaux ou des synclinaux perchés
- La mine de l'Ouenza renferme d'énormes quantités d'un minerai de fer non phosphoreux, très riche et très pur, d'une teneur en fer moyenne de 53%.
- L'état des réserves de la mine de l'Ouenza montre qu'il y a une quantité énorme des réserves des stériles 123 Mt par rapport au minerai 36 Mt.

CHAPITRE II

DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Notions préliminaires sur les déchets miniers

Les déchets miniers peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai, ces déchets peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits artificiels, plus ou moins transformés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie, scories) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques. Cependant, la nature et l'importance des éventuels impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement seront fonction de: (revue Industrie minière 1982)

- sa quantité totale ;
- sa composition chimique et minéralogique ;
- ses caractéristiques physiques ;
- la méthode de stockage et sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

Ces différents aspects sont fortement influencés par les caractéristiques de la mine elle-même :

- la substance exploitée ;
- la nature du gisement ;
- sa taille et la méthode d'exploitation utilisée ;
- les procédés de traitement du minerai employés ;
- sa localisation dans un contexte environnemental particulier.

Avant d'aborder les paramètres indispensables à l'élaboration d'une typologie des résidus miniers dans une optique de leur impact éventuel sur l'environnement, nous nous proposons donc de :

- décrire sommairement les caractéristiques principales de l'activité génératrice des résidus miniers "la mine" ;
- définir l'objet de l'étude "résidu minier" ;
- présenter les principaux types d'impact que les résidus miniers peuvent avoir sur l'environnement et soulever la notion "relative" d'impact environnemental.

II.1. La mine : Activité génératrice des résidus miniers

Une mine figure II.1, comprend tous les aménagements, ouvrages et équipements d'extraction, installations de traitement de minerai, haldes de stockage provisionnels et permanents de matériaux et/ou de résidus nécessaires pour l'exploitation et la valorisation d'un gisement. (BRGM, rapport 1999).

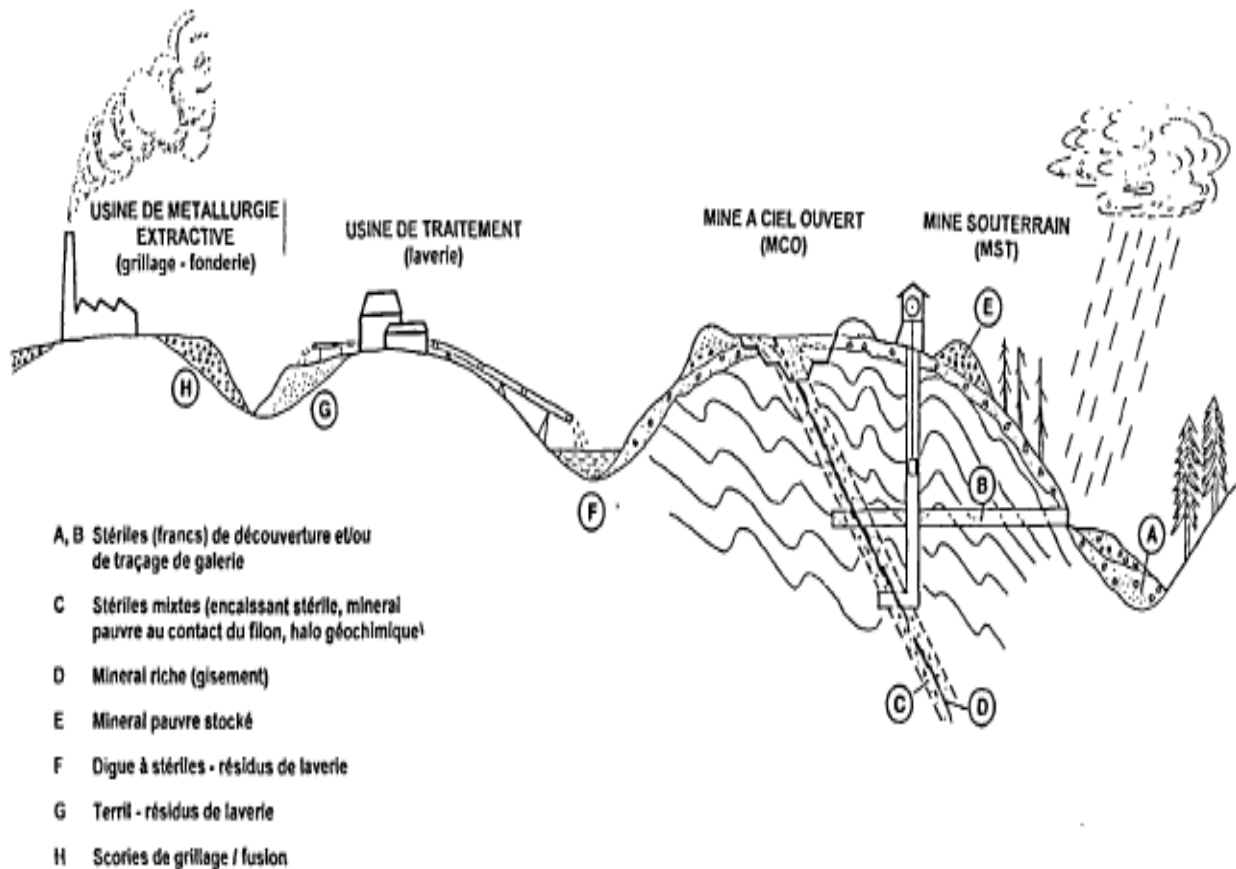


Figure II.1 : Travaux et opérations d'une exploitation minière.

II.2 Gisement et stérile : deux concepts complémentaires

Un gisement ne se définit pas en termes absolus, mais en termes relatifs à un marché économique. En effet, un gisement est une masse minérale, le minerai ayant une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable avec profit dans un contexte économique précis.

Les caractéristiques du gisement sont déterminées par les processus géologiques et/ou géochimiques responsables de sa création. En effet, un gisement représente une anomalie dans la composition chimique de la croûte terrestre : il contient bien évidemment une concentration élevée en un ou plusieurs éléments valorisables (Au, Zn, Pb, Ni, Al, etc.) ;

Il contient souvent aussi des concentrations élevées en éléments accompagnateurs pouvant poser des risques pour l'environnement (pyrite, arsenic, métaux lourds, etc.).

L'enveloppe géométrique du gisement est définie par la teneur de coupure choisie pour exploiter la substance valorisable. Un gisement est donc un objet à masse et à composition variable dans le temps : il peut diminuer, voire disparaître, si le cours du marché du produit de

CHAPITRE II DECHETS MINIERS ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

la mine descend en dessous de son prix de revient ; en revanche, il peut réapparaître ou devenir plus important dans le cas contraire. (Les ressources minières françaises 1978-1991).

Pour survivre économiquement, une mine doit donc être toujours à la recherche de méthodes d'extraction et de valorisation permettant la production d'un produit final vendable à profit suffisant ; souvent ces évolutions entraîneront une évolution dans la nature et la quantité des résidus produits. En fonction de leur nature physico-chimique, de la quantité et de la méthode de stockage, les résidus d'une mine peuvent avoir des impacts quasi nuls à très importants sur l'environnement.

Pour les mines en opération ou en cours de fermeture, le coût lié à la maîtrise de l'impact sur l'environnement de certains de ces résidus peut constituer un poids non négligeable sur le prix de revient.

Par ailleurs, la définition d'un "gisement" - cible d'une activité minière qui mène tout naturellement à la définition du concept complémentaire, celui du "stérile". Ce terme, utilisé souvent comme nom ou qualificatif dans le domaine minier, s'applique à tout résidu minier dont la teneur en élément valorisable est en dessous de la teneur de coupure. Le résidu est donc "stérile" en termes de valeur économique. Dans certains cas, un résidu "stérile" stocké à une époque peut être réexploité à une autre, suite à un changement approprié des conditions économiques (cours du marché, nouvelles filières de traitement), (Barrés M. 1979).

Un résidu économiquement "stérile" peut, par contre, contenir des concentrations en éléments ou composés chimiques polluants (phases minérales naturelles, réactifs de traitement résiduels) élevées par rapport aux concentrations naturellement présentes dans les sols du site. Dans ce cas, on parlera de "stériles de sélectivité". Nous pouvons aussi avoir des résidus miniers dont la composition et la réactivité chimique diffèrent peu de celles des sols naturels ; ce sont les "stériles francs".

Les caractéristiques du gisement, définies par la variation dans l'espace de la teneur en métal, peuvent être très différentes d'un cas à un autre ; en particulier, nous pouvons citer les deux cas extrêmes : gisements de type "tout ou rien" et "disséminé". Dans le premier cas, la frontière entre le gisement et la roche stérile encaissante est très nette ; on passe d'une teneur en métal élevée à une teneur proche du fond géochimique en très peu de distance, parfois en quelques centimètres.

A l'autre extrême se trouvent les gisements du type "disséminé" caractérisés par une variation progressive de la teneur en métal en s'éloignant d'une zone dont la concentration est économiquement intéressante, traversant un halo de teneurs de plus en plus faibles.

II.3 Types d'exploitation minière

La situation topographique, la géométrie et la morphologie du gisement détermineront la méthode minière utilisée pour son exploitation et ainsi, les tonnages relatifs et la composition chimique des résidus générés lors des différentes phases de travaux miniers (Simonin L., et al 1982).

a) Mines à ciel ouvert

Lorsqu'un gisement est peu profond, une exploitation "à ciel ouvert" peut être envisagée.

L'exploitation d'un minerai à ciel ouvert est décidée en fonction du taux de découverte (ratio du volume de roche stérile qui doit être enlevé par volume de minerai), et n'est réalisable généralement que pour des minerais peu profonds (< 300 m). En général, après les travaux de décapage (enlèvement du sol et horizons superficiels), les travaux de découvertures concernent la partie stérile de la roche renfermant (ou "encaissant") le minerai. Cette dernière est enlevée par gradins successifs dans une excavation souvent de forme conique dont les parois découpées en banquettes sont plus ou moins redressées suivant la tenue des roches. Plus l'excavation s'approfondit, plus le volume de stérile à extraire est important. Lorsque le taux de découverte devient trop important une exploitation à ciel ouvert n'est plus rentable.

b) Mines souterraines

Dans les cas où une mine à ciel ouvert n'est pas possible, et si les teneurs du minerai le permettent, une exploitation en "mine souterraine", méthode plus coûteuse, peut être mise en œuvre.

Dans ce cas l'accès au minerai se fait par une ou plusieurs descenderies ou galeries. Si le gisement comporte une ou plusieurs couches de minerais horizontales dans une région à paysage plat, la desserte des galeries et la ventilation sont assurées au minimum par deux puits : l'un pour évacuer le minerai (skips) et l'autre pour le personnel, l'aération et l'exhaure des eaux. Dans le cas d'un gisement très redressé en zone de montagne, plusieurs galeries horizontales peuvent être tracées à partir du flanc de la colline, les "travers bancs", pour rejoindre le minerai.

II.4 Phases et opérations d'exploitation

Les opérations mises en œuvre sur un site minier pour exploiter et valoriser un gisement peuvent être divisées en trois (ou parfois quatre) étapes principales figure II.2:

- les travaux nécessaires pour donner accès au gisement : l'ampleur de ces travaux de déblaiement (ou de découverte) dans le cas d'une mine à ciel ouvert et de percement de galeries, puits ou descenderies pour une mine souterraine varieront énormément en fonction des caractéristiques du gisement. Les mines à ciel ouvert produisent en général beaucoup plus de stériles (en moyenne, de l'ordre de 10 fois plus) que les mines souterraines davantage sélectives (Ambert P. 1992).
- les travaux liés à l'extraction du minerai "tout venant" et à son tri préliminaire (éventuellement nécessaire pour minimiser la quantité de roche stérile, ou "gangue", présente dans le minerai.
- un ensemble de filières de traitement, regroupé dans une usine d'enrichissement (souvent appelé "la laverie") utilisé pour séparer les phases minérales porteuses des éléments valorisables de la gangue stérile ; le produit de l'usine, enrichi en élément valorisable,

CHAPITRE II DECHETS MINERS ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

s'appelle "le concentré". Dans la plupart des cas, ce dernier constitue le produit marchand de la mine.

- dans certains cas, lors des exploitations anciennes, une fonderie ou une usine de grillage pouvait être édifiée à proximité d'un ou plusieurs sites miniers voisins pour transformer l'élément valorisable du concentré en forme métallique, d'où il a pu résulter l'abandon de produits de grillage/fusion sur le site.

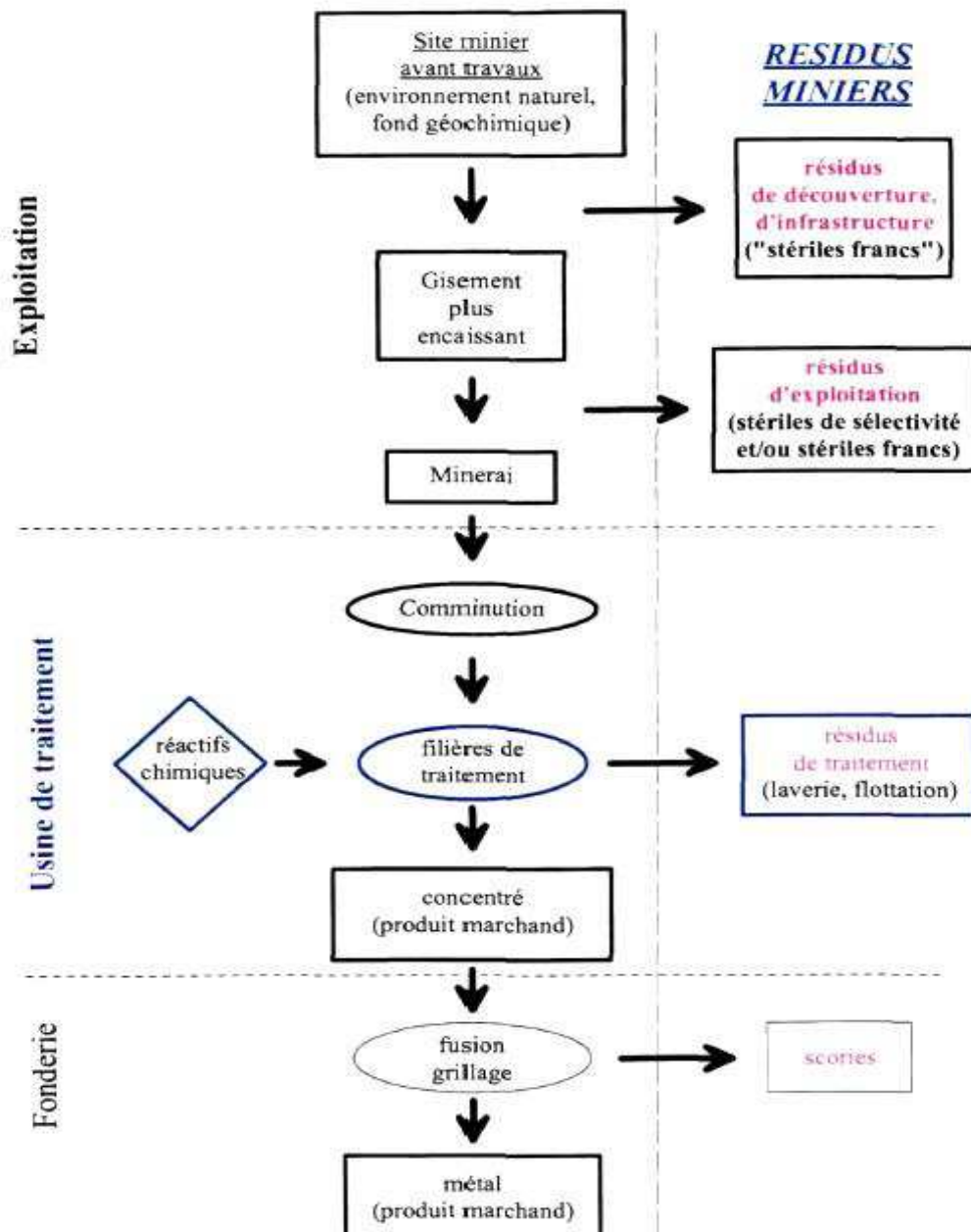


Figure II.2 Etapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants. (Ambert P. 1992).

II. 5 Principaux types de résidus miniers

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de déchets miniers, généralement de caractéristiques physiques et chimiques, donc d'impact environnemental potentiel, assez différentes. Leurs volumes respectifs, surtout en ce qui concerne les déchets de découverte, seront fonction aussi du type d'exploitation (mine à ciel ouvert, mine souterraine) ; leur composition chimique variera en fonction de la substance exploitée et la nature du gisement. (Carly R. 1981).

En premier lieu, nous pouvons classer les principaux types de déchets miniers en quatre grands groupes :

- les stériles francs de découverte et/ou de traçage de galerie,
- les déchets d'exploitation (stériles francs et/ou stériles de sélectivité minéralisés),
- les déchets de traitement (rejets de l'usine d'enrichissement),
- autres déchets (scories de grillage ou de fusion du minerai).

II. 5.1 Les stériles francs de découverte

Ce sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert, ou les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies dans le cas d'une mine souterraine.

Ces résidus contiennent en règle générale des teneurs en métaux et en éléments accompagnateurs faibles, de l'ordre de grandeur de l'anomalie géochimique produite par les phénomènes de dispersion naturelle, remaniement mécanique ou diffusion chimique des métaux du minerai dans sa roche encaissante. D'une certaine façon, les caractéristiques physiques et chimiques de ce genre de résidu ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction de tout autre ouvrage d'art (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional. (Aubertin M., et al 2002)

II. 5. 2 Les déchets d'exploitation (stériles de sélectivité)

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique dans tel contexte. Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal venaient à monter. Dans les mines anciennes, la pratique était parfois de le mettre à part, ou de le rejeter de la même façon que les autres résidus de la mine. Dans le cas de mines modernes de métaux de base, les stocks de ce type de résidu sont souvent traités en fin d'exploitation.

Le caractère plus ou moins disséminé d'un gisement conditionnera également la technique d'exploitation, donc le volume, la nature et l'importance des résidus d'exploitation. Dans un gisement de fer de type "disséminé" par exemple, l'exploitant placera la teneur limite d'exploitation du minerai à une valeur donnée (p. ex. 28 % en fer). Cette limite est opérationnelle seulement quand la masse minérale exploitée présentera une gamme continue

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

de teneurs décroissantes en fer suivant les conditions géologiques responsables de sa formation. Le résidu minier dans ce cas aura, en effet, des teneurs en métal très voisines du minerai. Par contre pour les gisements de type "tout ou rien", il y a discontinuité géochimique brutale entre le minerai et sa gangue, celle-ci ne contenant plus que de faibles anomalies en métaux (approchant à peine le centième de la teneur du minerai). Dans ce cas, une exploitation du minerai, ne laissera que des rejets pauvres, plus ou moins contaminés par des métaux et métalloïdes accompagnateurs du gisement.

II. 5. 3 Les déchets de traitement

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré concentration du ou des minéraux économiques. Ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un enrichi en substances valorisables (le "concentré") et un ou plusieurs qui en sont appauvris. Dans le cas des métaux de base et de l'or, les résidus issus de l'usine (appelée "la laverie") sont généralement constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent sédimentés dans des bacs de décantation retenus par des digues à stériles ou déposés en terril. Afin de réduire les coûts de transport, l'exploitant localisera la laverie en aval de la mine (transport par gravité) et les schlamms de laverie seront décantés dans le vallon sous-jacent, à l'amont d'une digue à stériles.

Les résidus et les boues issus d'une laverie contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires tels que les sulfures de fer (la pyrite, etc.) et leurs produits d'oxydation. Ils peuvent contenir aussi des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs utilisés pour la séparation et la concentration des métaux valorisables.

II. 5. 4 Autres types de déchets

Dans bon nombre d'exploitations anciennes (Fe, Cu, Sn...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand plus pur (figure II.1). Dans ces cas, on peut retrouver sur ces sites anciens des tas de scories qui forment un cas particulier de rejets. Des suies provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées. Ces produits oxydés se retrouvent, soit accumulés à proximité de la mine si le grillage était opéré sur place, soit souvent entassés à proximité de la fonderie en contrebas. (Gélinas P., 1994)

II. 6 Stériles francs de la mine de l'Ouenza

Pour atteindre la zone minéralisée, l'exploitation du gisement de l'Ouenza - Algérie génère de grandes quantités de déchets miniers solides qui sont entreposées en surface proche du site minier sous forme d'empilements, communément appelés haldes à stériles.

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les estimations concernant le volume des stériles stockés et selon les rapports d'exploitation précédents et des calculs approximatifs, dans notre cas les deux stocks échantillonnés le volume est d'environ de 2 millions de tonnes pour chaque stocke et pour tout les stocks de la mine de l'Ouenza le volume des stériles francs est estimé à plus de 50 millions de tonnes. La nature des stériles francs est constituée de quatre catégories : le calcaire, la marne, le minerai de fer riche et pauvre.

Dans le cas de la mine de l'Ouenza le terril est intérieur et extérieur. D'une façon générale la sélection des sites et des endroits choisis pour le dépôt sont au hasard et proche des quartiers d'exploitation, le transport des roches stériles est effectué par camion, l'aplanissement se fait par Bulldozer (figure II.3).



Figure II.3 : Les stériles francs de la mine de l'Ouenza.

La situation des stocks des stériles francs de la mine de l'Ouenza représenté sur la figure II.4 qui représente une problématique pour la ville et la région de l'Ouenza et un défi environnemental.

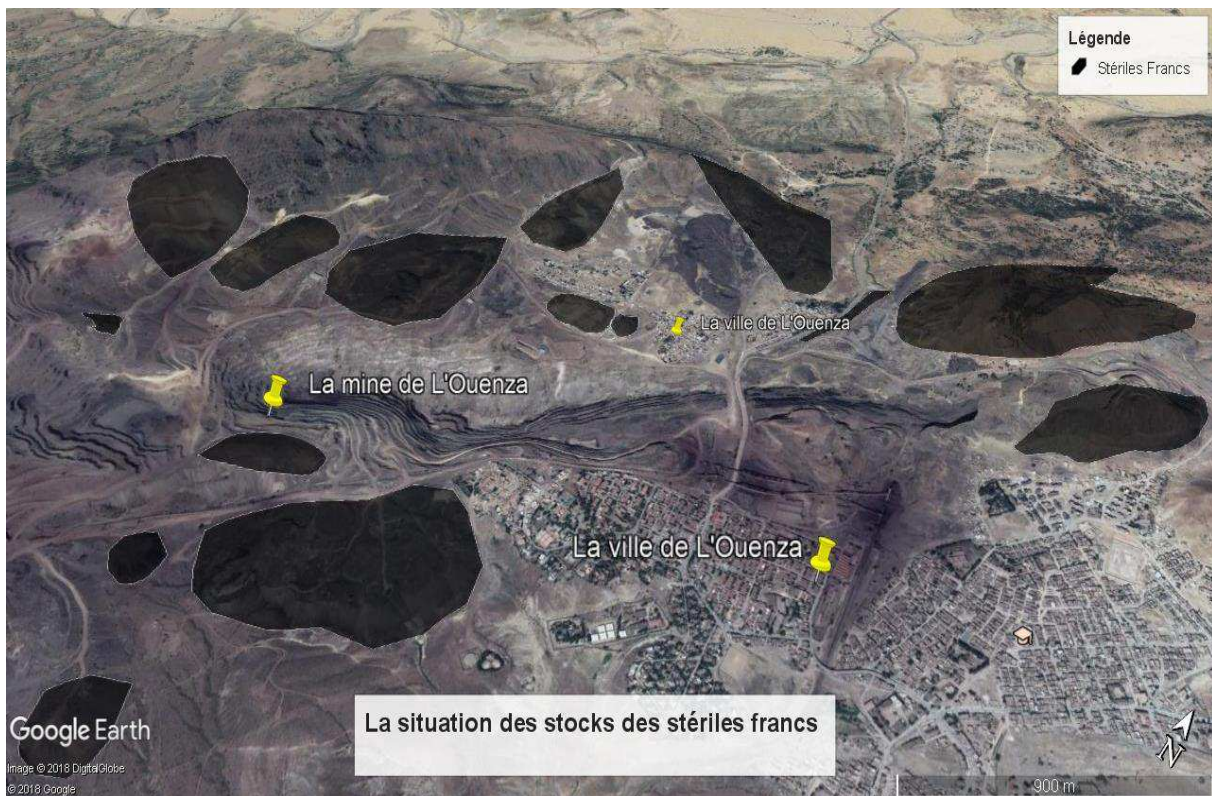


Figure II.4 : Situation des stocks des stériles francs de la mine de l'Ouenza.

II. 7 Stériles francs à travers le monde

L'industrie minière génère de gros volumes de déchets solides, potentiellement recyclables dans le secteur de la construction (Benarchid Y., 2018). Les problèmes graves sont principalement liés à la gestion durable de ces déchets aux niveaux technique, environnemental et politique. Dans la présente étude, le potentiel de recyclage des stériles miniers aurifères en tant que matériaux de construction a été étudié conformément aux directives de recyclage des déchets inorganiques non dangereux, sur la base d'un point de vue scientifique.

Des roches ont été recueillies dans une mine d'or site (Québec, Canada) et préparé en utilisant des méthodes de broyage et de tamisage. Le potentiel de production d'acide, l'analyse chimique, la minéralogie et le potentiel de pollution des stériles ont été évalués. Des mélanges de béton ont ensuite été préparés à l'aide de stériles broyés et leurs performances mécaniques et leurs propriétés environnementales ont été évaluées. Les résultats ont montré que l'échantillon de stériles contient 46% de matériaux grossiers similaires aux agrégats de béton normalisés.

Les concentrations de polluants lessivés étaient nettement inférieures aux limites fixées par l'agence de protection de l'environnement (US-EPA). Le même échantillon est classé comme matériau non acide. Compte tenu des propriétés technologiques et environnementales mesurées, des bétons présentant de bonnes performances mécaniques pourraient être fabriqués à partir de stériles miniers.

CHAPITRE II DECHETS MINIERS ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le potentiel de drainage acide et métallifère (DMLA) des stériles dans les opérations minières est un problème clé qui doit être abordé à toutes les étapes, de la proposition minière initiale à la réhabilitation et à la fermeture du site. La méthode au chrome réductible au soufre (CRS) a été initialement introduite en Australie en tant que solution rapide et rentable. Cependant, des préoccupations sont soulevées à propos de son utilisation potentiellement inappropriée sans preuves scientifiques à l'appui pour évaluer le potentiel de DMLA des mines déchets de mines de roche dure, en particulier ceux contenant des sulfures de métaux de base (plomb, zinc, cuivre et nickel).

Ce travail porte sur l'applicabilité de l'essai au soufre réductible au chrome pour les métaux métallifères acides prévision de drainage dans les mines de roche dure (Silvia B. 2018), décrit les résultats d'une étude de laboratoire comparative de 55 déchets de mines australiens occidentaux des échantillons et des échantillons de minéraux pour le potentiel de DMLA en utilisant les résultats des laboratoires commerciaux de routine manipule normalement des échantillons de sol ainsi que des approches conventionnelles. CRS s'est avéré généralement approprié pour nombreuses applications, en particulier pour les sulfures de fer courants à des concentrations faibles à modérées exploitation de minerais de fer, de sables minéraux et d'or).

Des problèmes de précision et de biais du CRS ont également été signalés. Une bonne compréhension de la minéralogie des sulfures est nécessaire pour des prévisions précises de la DMLA sur ces types de déchets de mines, et ne peut pas être obtenu sur un test unique.

Les bactéries peuvent nuire à la qualité du drainage libéré par les déchets des mines en catalysant l'oxydation des minéraux sulfurés et en accélérant ainsi la libération de l'acidité et des métaux. Cependant, les contrôles microbiologiques et géochimiques de la qualité du drainage des stériles non saturés et géochimiquement hétérogènes restent mal compris (Blackmore S. 2018). Des bactéries neutrophiles et acidophiles sont identifiées et coexistent dans différents types de stériles, indiquant que des consortiums endémiques robustes sont maintenus dans des micro-environnements à l'échelle des pores. Par la suite, Les conditions météorologiques naturelles ont été simulées dans des expériences sur colonnes en laboratoire avec des déchets contenant soit des consortiums in situ, soit des populations supprimées avec une abondance jusqu'à 1000 fois inférieure et une diversité phénotypique réduite après chauffage et séchage.

Le drainage des stériles avec les populations in situ était jusqu'à deux Les unités de pH sont plus basses et contiennent 16 fois plus de sulfates et de métaux lourds que le drainage des populations traitées contenant des stériles, indiquant des taux d'oxydation des sulfures nettement plus élevés. La sorption et la formation de phases minérales secondaires (par exemple, le gypse et les hydroxycarbonates) ont également une incidence sur la chimie du drainage. Cette étude fournit des preuves directes de l'existence de diverses communautés microbiennes dans les stériles et de leur rôle catalytique important sur les taux d'altération, et illustre les contrôles mutuels de la microbiologie et géochimie sur la qualité du drainage des stériles.

CHAPITRE II DECHETS MINIERS ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les résidus miniers sont générés comme les déchets dans le monde entier à la suite de l'exploration, excavation, dynamitage, valorisation et extraction de minerais. En Australie occidentale, en raison de l'importante activité minière et l'augmentation des minerais à faible teneur, il y a génération des résidus miniers en grande quantité, ce qui pourrait poser des problèmes d'environnement et d'élimination. La pratique courante en matière de traitement des résidus consiste à les stocker dans des barrages à résidus ou en tas près des sites miniers. Des quantités limitées sont parfois utilisées comme remblais et autres applications. L'utilisation des résidus dans les projets de construction, qui peuvent consommer un grand volume des déchets, n'ont pas été explorés de manière approfondie jusqu'à présent (Kuranchie F.A. 2015). De plus, la compréhension de l'utilisation des résidus basée sur la composition chimique n'a été que très peu étudiée.

Dans la présente recherche, une revue critique de la littérature a été faite en se concentrant sur l'utilisation des résidus miniers en grande quantité. Des expériences ont été menées par élaborer une méthodologie pour caractériser les résidus en fonction de la relation existante entre la résistivité électrique et la densité relative des résidus dans des conditions sèches et humides. Les résultats montrent que la résistivité électrique des résidus miniers de minerai de fer produits dans l'ouest l'Australie à l'état sec varie de 11 kΩm dans un état plus dense à 19 kΩm dans un état en vrac, alors qu'en état de saturation totale, elle varie de 20 Ωm pour un état très dense.

L'héritage environnemental des mines de métaux est souvent dominé par de grandes installations de traitement des déchets, sources de drainage acide et métallifère, entraînant à la fois une pollution locale et une perte irréversible des minéraux solubles. Le traitement d'un matériau en tant que déchet ou minerai dépend de nombreux facteurs et circonstances. Trois aspects critiques - le temps, la stratégie d'extraction et le contexte économique – sont discutés dans la pratique durable dans la gestion des déchets miniers (Lébre E. 2016).

Les auteurs font valoir que la ligne de démarcation entre les déchets et le minerai nécessite un déchet de mine hiérarchie de gestion qui considère correctement les déchets comme une ressource future potentielle. Cette hiérarchie présente quatre niveaux principaux: réduction, retraitement et stockage, recyclage et élimination, illustrés par un examen de la recherche universitaire et des données publiques sur les pratiques industrielles. Les auteurs concluent que pour obtenir les meilleurs résultats, la hiérarchie doit s'appliquer à tous les niveaux et constitue un élément essentiel d'un cadre global de durabilité des mines.

Les résidus miniers sont de plus en plus recyclés sous forme de remblais en pâte cimentée (RPC) pour une production plus propre des ressources minérales. Dans la plupart des cas, les résidus miniers ne peuvent pas être entièrement recyclés et la stabilité des souterrains les chambres et les fosses à ciel ouvert ne peuvent être assurées (Hongjian Lu 2018).

Cette recherche proposait une nouvelle procédure de recyclage déchets résiduels sous forme de DAP dans les chantiers souterrains et les fosses à ciel ouvert. Premièrement, les domaines physiques, géotechnique et les essais chimiques requis avant l'application de cette procédure ont été discutés. Ensuite, la nouvelle procédure a été présentée en détail, y compris

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

la détermination des paramètres de processus et le remblayage la mise en œuvre. La méthode des éléments finis et la théorie des trois zones ont été utilisées pour déterminer le processus. L'application de cette nouvelle procédure à une instance technique, la mine de fer de Shirengou (SIM), a été expatriée.

Les paramètres de traitement du recyclage des résidus miniers sous forme de RPC dans SIM ont été déterminés comme suit. La teneur en solides de la RPC était de 72%, les rapports ciment-résidus étaient de 1: 8, 1:10, 1:20, le total hauteur du remblai de la mine à ciel ouvert était de 80 m (avec quatre étapes de remblayage), la hauteur de stratification était de 1,5 m et les taux de résidus de ciment pour quatre étapes de remblayage à ciel ouvert étaient de 1: 8 (étapes 1 et 2), 1:10 (étape 3), et 1:20 (étape 4). Il est démontré que cette nouvelle procédure permet de recycler à 100% les résidus miniers dans SIM, qui a une grande importance environnementale pendant les opérations minières.

Exploiter une telle procédure s'étend aux efforts récents pour recycler les résidus miniers en tant que RPC, et peuvent considérablement promouvoir la production de ressources minérales dans le monde entier.

Le développement d'un colorant céramique pour les glaçures à partir d'un résidu de minerai de fer non traité a été réalisé par (O.C. Pereira 2012). Ce travail de recherche consiste à ajouter 6% en masse du résidu dans des suspensions (1,80 g / cm³ de densité et 30 s de viscosité) de glaçures blanches, transparentes et mates, qui ont été appliquées sous forme de couches minces (0,5 mm) sur des carreaux de céramique engobé et non cuite.

Les carreaux ont été cuits dans un four à rouleaux de laboratoire dans un cycle de 35 minutes et des températures maximales entre 1050 et 1180 ° C. Les résidus et les glaçages ont été caractérisés par des analyses chimiques (FX) et thermiques (DTA et dilatométrie optique) et les carreaux par des analyses colorimétriques et DRX. Les résultats ont montré que le colorant incorporé dans la glaçure transparente se traduit par un glaçage rougeâtre (comme le pignon) adapté à l'industrie des tuiles en céramique. Pour les vernis mat et blanc, le résidu a changé la couleur des carreaux avec la température.

Les résidus de minerai de fer sont devenus un type de déchets solides les plus dangereux. Afin de recycler le fer dans les résidus, ce travail de recherche présente une technique utilisant le procédé de torréfaction magnétisante suivi d'une séparation magnétique (Chao Li 2010). Après analyse de la composition chimique et de la phase cristalline, selon le mécanisme expérimental, les effets de différents paramètres sur l'efficacité de récupération du fer ont été réalisés.

Les paramètres de réaction optimum ont été proposés comme suit : rapport des résidus de minerai de fer : 1 : 100, torréfaction à 800 ° C pendant 30 min et fraisage de 15 min d'échantillons torréfiés. Avec ces paramètres optimaux, le grade de concentré magnétique était de 61,3% de Fe et un taux de récupération de 88,2%. Avec cette méthode, une grande quantité de fer peut être réutilisée. De plus, la microstructure et la transformation de phase du processus de magnétisation de la torréfaction ont été étudiées.

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce travail de recherche expérimentale consiste en la possibilité d'utiliser les résidus après récupération du fer des résidus de minerai de fer comme matières de préparation de matériaux cimentaires, abrégé en TSC, comprenant des analyses de ses propriétés mécaniques, propriétés physiques et produits d'hydratation (Chao Li 2010).

Le TSC1 a été préparé en mélangeant 30% des résidus, 34% de scories de haut fourneau, 30% de clinker et 6% de gypse. Parallèlement, les résidus bruts de minerai de fer (avant la récupération du fer) avec la même proportion de TSC1 ont été sélectionnés pour comparer l'activité cimentière des résidus bruts et des résidus après magnétisation de la torréfaction, notée TSC0. Les produits d'hydratation de ceux-ci étaient principalement de l'ettringite, de l'hydroxyde de calcium et du C-S-Hgel, caractérisé par DRX, IR et MEB (La microscopie électronique à balayage). Il a été découvert que l'ettringite et le gel C-S-H étaient principalement responsables du développement de la résistance des mortiers TSC avec le temps de durcissement.

Les résultats ont montré que la kaolinite des résidus a été complètement décomposée après magnétisation de la torréfaction, ce qui a favorisé la propriété cimentaire du TSC1. De plus, les propriétés mécaniques du TSC1 sont bien comparables à celles du ciment Portland ordinaire 42,5 selon la norme GB175-2007 chinoise.

Dans le contexte d'une faible réutilisation et d'un important stock de résidus de minerai de fer, des résidus de minerai de fer provenant du Tonghua chinois ont été utilisés comme matière première pour préparer les matériaux à base de ciment (Zhong-lai Yi 2009).

Les propriétés cimentaires des résidus de minerai de fer activés par activation thermique du composé ont été étudiées. Des méthodes de test, telles que DRX, TG-DTA (Mesurer la stabilité thermique) et IR, ont été utilisées pour la recherche de la variété de phase et de structure des résidus de minerai de fer dans le processus d'activation thermique du composé.

Les résultats révèlent qu'une nouvelle matière à base de ciment qui contient 30% en poids des résidus de minerai de fer peut être obtenue par activation thermique combinée, dont la résistance au mortier peut atteindre la norme du ciment 42,5 de la Chine.

La présente étude (S.K. Giri 2011) a démontré une approche réalisable de l'utilisation des résidus de résidus de minerai de fer dans la synthèse de produits à valeur ajoutée pour des applications environnementales. Le fer ferrique récupéré à partir de déchets résiduels de minerai de fer par lessivage acide suivi d'une précipitation sous forme d'oxyde ferrique a été utilisé comme charge d'alimentation pour synthétiser la poudre de magnétite par son grillage réducteur au charbon de bois. Les caractérisations physicochimiques ont révélé la formation d'une poudre de magnétite suffisamment pure avec un rapport ferrique (hydrure) oxyde / charbon de 1: 2 et calcinée à 1200 °C pendant 4 h.

La poudre magnétique en tant que telle ou revêtue d'acide polyacrylique, est efficace pour l'élimination d'un colorant modèle, le bleu de méthylène de sa solution en 2 minutes. Le résidu insoluble dans l'acide, généré après la récupération du fer dans les résidus de minerai de fer, a été caractérisé comme étant de la kaolinite. Le résidu avec une surface relativement

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

bonne ($119 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) a également trouvé son efficacité pour l'élimination par adsorption de colorants incluant le bleu de méthylène et peut trouver des applications à grande échelle dans le traitement des eaux usées.

En outre, la présente étude a fourni d'autres données pour d'autres utilisations possibles des résidus de minerai de fer afin de réduire en partie leurs problèmes d'élimination associés.

L'étude réalisée par (Yongliang Chen 2013), porte sur l'utilisation de résidus d'hématite au lieu de flux traditionnels pour préparer les carreaux de porcelaine rouge, avec du kaolin et du sable de quartz. Compte tenu de la température de cuisson et de la quantité d'addition de résidus, les propriétés, les compositions de phases et la microstructure des échantillons de feu final ont été étudiés. Les résultats indiquent que la température de cuisson et la proportion de résidus influent considérablement sur les propriétés des carreaux de porcelaine.

La formulation appropriée doit être l'addition de résidus d'hématite 55-65% en poids, de kaolin 25% en poids et de sable de quartz 10-20% en poids et de cuisson à 1200°C pendant 30 minutes, les carreaux de porcelaine obtenus sont bien conformes à la norme chinoise spécifications dans les carreaux de céramique (GB / T4100-2006). Les carreaux présentent un bon degré de frittage, une haute cristallinité avec des phases minérales principales comme le quartz, l'hématite, la cristobalite, la mullite et l'anorthite, et sont présentés dans des solutions solides denses de phase vitreuse et cristalline à faible porosité, ce qui a contribué à la densification des carreaux de porcelaine.

Dans le but de réduire les impacts négatifs sur l'environnement et d'utiliser la ressource secondaire des résidus, la possibilité de fabriquer des briques de construction en utilisant les résidus d'hématite de la province occidentale du Hubei en Chine a été étudiée (Y.Chen 2011). Outre les résidus d'hématite, les additifs d'argile et de cendres volantes ont été ajoutés aux matières premières pour améliorer la qualité des briques. Grâce au processus de mélange, de formage, de séchage et de cuisson, les briques ont été produites. On a constaté que les conditions optimales étaient que la teneur en résidus d'hématite était aussi élevée que 84%, la teneur en eau formant et la pression de formation étaient respectivement dans la gamme de 12,5-15% et 20-25 MPa, et la température de cuisson appropriée variait de 980°C à 1030°C pendant 2 h.

Dans ces conditions, la résistance mécanique et l'absorption d'eau des éprouvettes rougeâtres étaient de 20,03-22,92 MPa et 16,54-17,93%, respectivement, et les autres propriétés physiques et durabilité étaient bien conformes à la norme chinoise de briques communes (GB / T5101-2003). Les phases et morphologies des résidus verts et des spécimens cuits ont été caractérisées par DRX et MEB.

Les résultats ont montré que les principales phases minérales du produit étaient l'hématite, le quartz, l'anorthite et la tridymite, qui étaient principalement responsables de la résistance mécanique des briques.

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Les préoccupations croissantes concernant les problèmes environnementaux ont conduit à accorder une plus grande attention au recyclage des déchets miniers et des sous-produits de fonderie. Dans la présente étude, l'utilisation de résidus d'or, de calcaire résiduaire, de boue rouge et de scories de ferronickel a été étudiée pour la production de fibres de verre continues. Pour vérifier l'applicabilité du processus de rétreint, la viscosité du mélange présent a été mesurée à l'état fondu à une température élevée. La viscosité dans la plage de basses températures a été estimée à l'aide de l'équation de Mauro – Yue – Ellison – Gupta – Allan. Comparée à d'autres systèmes de fibres de basalte utilisés dans le commerce, une température de formation de fibres similaire allant de 1466K à 1503K avec des viscosités allant de log 2,5 à log 3,0 dPas a été observée, ce qui indique l'applicabilité du processus de rétirage. Des mesures de la résistance à la traction et du module de Young d'un seul filament ont été effectuées en suivant les méthodes d'essai standard. Malgré le diamètre épais du filament actuel, la fibre produite dans la présente étude présentait un module de Young de 60GPa-80GPa, qui a été trouvé similaire à ceux d'autres fibres du commerce. On s'attend à ce qu'une résistance à la traction plus élevée soit obtenue en réduisant le diamètre du filament inférieur à 10 μm en augmentant la vitesse d'étirage. Par conséquent, l'utilisation du mélange actuel ; les déchets miniers et les sous-produits de la fusion, est possible pour produire des fibres de verre continues.

Ce travail de recherche expérimentale (Esmaeel Darezereshki 2018), étudie l'influence des ions H^+ et Cl^- sur la procédure de lixiviation des résidus de minerai de fer à l'aide de différents agents lixivants, notamment divers rapports $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{NaCl}$ et HCl . En utilisant le logiciel HYDRA / Spana, les espèces de fer formées ont été identifiées comme FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ lors de l'utilisation de 5 M $\text{H}_2\text{SO}_4 / 2$ M NaCl , et FeCl_3 , FeCl_2 + lors de l'utilisation de HCl 5 M comme lixiviant de lixiviation à 85 ° C avec récupération significative du fer (> 85%) en 6 h. Cependant, la combinaison de 5 M $\text{H}_2\text{SO}_4 / 2$ M NaCl était plus avantageuse pour le processus de lixiviation en raison principalement de l'activité accrue de H^+ , ainsi que des ions Ca^{2+} précipités sous forme de gypse. Finalement, à des fins de modélisation, il a été constaté que le processus de lixiviation du fer s'accordait bien avec le modèle à noyau rétractable avec contrôle de la réaction chimique en surface.

Le drainage minier acide pose de graves problèmes de pollution environnementale en raison de son acidité élevée, de sa teneur en métaux toxiques et de ses sulfates (Kebede K. Kefeni 2017). Dans cette revue, la prévention disponible de la génération de drainage minier acide, les options de traitement et leur importance à la lumière des perspectives futures sont brièvement discutées.

Les ressources possibles à récupérer, telles que l'hydroxyde ferrique, la ferrite, les métaux des terres rares, le soufre et l'acide sulfurique, ainsi que leurs avantages économiques, sont discutés. En outre, l'importance des résidus miniers pour la stabilisation des sols contaminés et la production de matériaux de construction est soulignée. Dans l'ensemble, cet examen a montré que la récupération et la réutilisation des ressources constituaient une approche globale indiscutable de la durabilité environnementale et de la réduction de la

CHAPITRE II DECHETS MINIERES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

pollution due au drainage minier acide. Enfin, les perspectives d'avenir et les domaines qui méritent une exploration approfondie sont soulignés.

Conclusion

- Les stériles francs sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert.
- L'exploitation du gisement de l'Ouenza - Algérie génère de grandes quantités de déchets miniers solides qui sont entreposées en surface proche du site minier sous forme d'empilements, communément appelés haldes à stériles.
- La nature des stériles francs est constituée de quatre catégories : le calcaire, la marne, le minerai de fer riche et pauvre.
- Les travaux précédents ont convenu que les stériles francs ont un risque très élevé pour l'environnement et doivent donc être enlevées par des méthodes de traitement valable pour chaque cas.

CHAPITRE III

TECHNIQUES DE TRAITEMENT DES STERILES FRANCS

Introduction

La minéralurgie est définie comme l'ensemble des procédés par lesquels un minerai brut extrait d'une mine est séparé afin de le débarrasser des minéraux indésirables dont la valeur est négligeable. Ces derniers sont communément désignés par le terme "gangue". La séparation en question qui peut être réalisée par des équipements de concentration gravimétrique, de flottation, de séparation magnétique et de séparation électrostatique (Sanjay kumar et al, 2014).

La valorisation des minerais de fer englobe toutes les méthodes utilisées pour améliorer les caractéristiques chimiques, physiques ou métallurgiques et assurer un minerai de fer qui répond aux exigences techniques pour la fabrication de l'acier. Ces techniques comprennent le concassage, le criblage, l'homogénéisation, la concentration et l'agglomération. La plupart des minerais de fer entrent dans l'une des trois catégories suivantes :

- La livraison directe, où des minerais marchands de haute qualité, qui contiennent suffisamment de fer pour qu'ils soient chargés au haut fourneau directement et ne demandent pas de concassage, de criblage et ou de mélange.
- Des minerais marchands associés de faible qualité qui se produisent autour des minerais de haute qualité qui peuvent être exploitées en même temps, et qui nécessitent la mise à niveau mineure par le lavage, ou des techniques de séparation par gravité pour augmenter leur teneur en fer.
- Les formations sous-jacentes de fer, ou taconite, à partir de laquelle la plupart de ces dépôts ont été dérivés; un matériau dur, dense, de bas grade qui nécessite un vaste concassage, le broyage et la concentration pour produire un concentré acceptable.

Les minerais de fer qui relèvent de ces trois catégories ont des exigences de traitement tout à fait différentes et la discussion des étapes d'enrichissement appropriées ont été regroupées en conséquence (Sanjay kumar et al, 2014).

III.1 Définition du traitement des minerais

Les opérations d'extraction composent généralement des travaux préparatoires, notamment la découverte ou le percement des galeries, du forage, de l'abattage aux explosifs et du transport avant traitement (Szabo et al, 2002) Lorsque l'utilisation du minerai de fer n'est pas possible en raison de sa faible teneur en métal, les minerais de fer sont principalement traités par des technologies de concassage, broyage, criblage, classification, séparation gravitaire, séparation magnétique et flottation (Outotec, 2012). Historiquement, la majorité du minerai de fer le plus riche était tout simplement écrasé et acheminé directement dans le haut fourneau.

Actuellement, certains minerais ont un contenu en fer assez élevé (supérieur à 50%) pour être envoyé directement aux fours sans autre activités d'enrichissement que le broyage et le lavage. Cependant, la plupart des minerais extraits aujourd'hui doivent être soumis à un certain nombre d'opération d'enrichissement pour mettre à niveau la teneur en fer et préparer le concentré pour le haut-fourneau. Les progrès technologiques dans les opérations de haut

fourneau nécessitent un minerai d'alimentation d'une taille, structure et composition chimique spécifique pour une efficacité optimale.

III.2 Techniques minières

Dans la majorité des cas, l'extraction d'un minerai, son traitement ultérieur et la gestion des résidus et des stériles sont considérés comme une seule opération. Il est donc essentiel de comprendre les principales méthodes d'exploitation.

III.2.1 Extraction du minerai de fer

Selon l'US Geological Survey (2008) l'exploitation minière de minerai de fer est effectuée sur une très grande échelle. Une mine moderne permet de produire 10 MT/année. La quasi-totalité (98%) du minerai de fer extrait est utilisée dans la sidérurgie. L'exploitation en mines commence à ciel ouvert et peut éventuellement changer à l'exploitation minière souterraine. Les gros tonnages de minerai sont extraits par une exploitation souterraine mais ce dernier est plus cher que l'exploitation à ciel ouvert, en raison des coûts de développement plus élevés, et de la productivité du travail réduite.

Toutefois, si l'échelle de l'opération est large et les circonstances sont favorables, le minerai de mines souterraines peut être compétitif (USGS., 2008).

III.2.2 Enrichissement des minéraux

Le minerai brut (tout-venant) extrait de la mine, subit plusieurs processus de préparation mécanique (concassage, broyage, etc.) et de concentration (enrichissement) pour produire un concentré de valeur économique. L'enrichissement du tout-venant, réalisé dans une usine de traitement (concentrateur), a pour but d'augmenter la teneur en minéral de valeur et d'éliminer la gangue (Elisaveta, 2009).

L'enrichissement a pour but d'accroître la teneur en minéraux et d'éliminer la gangue. La figure III.1, illustre les deux principaux flux résultant de la séparation de la transformation des minéraux du minerai brut (Mfudi ,2013).

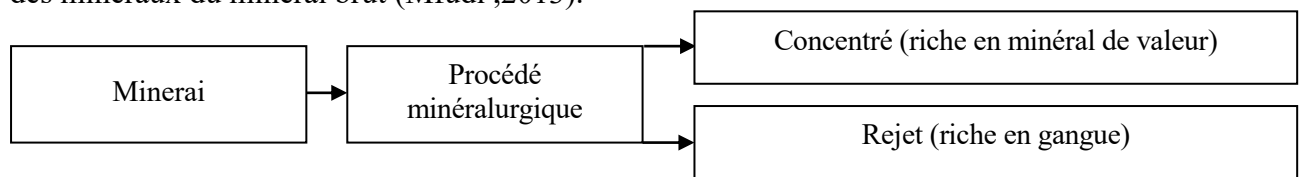


Figure III.1 Principaux flux résultant de la séparation des minéraux du minerai brut.

Techniquement, plusieurs procédés minéralurgiques permettant de séparer le minéral de valeur de la gangue existent. Ces procédés utilisent les propriétés mécaniques électromagnétiques, physico-chimiques ou chimiques de ces minéraux. Il s'agit des procédés de séparation magnétique, électrostatique, gravimétrique, par flottation et par classification (Sanjay kumar et al, 2014).

III.3 Techniques de traitement du minerai

Le traitement du minerai a pour but de transformer le minéral brut extrait de la mine en un produit commercialisable. Il s'effectue généralement au niveau de la mine, dans une installation dénommée « atelier de traitement ou de concentration du minerai ». Son objectif principal consiste à réduire la majeure partie du minerai, qu'il faut ensuite transporter et transformer grâce à d'autres procédés. Le produit commercialisable obtenu est appelé « concentré » et les matériaux restants sont nommés « résidus ». Le traitement du minerai comprend divers processus qui dépendent des caractéristiques physiques (granulométrie, densité, propriétés magnétiques, couleur) ou physico-chimiques (tension superficielle, hydrophobicité, mouillabilité) de chaque minéral (Bureau européen pour la PRIP,)

III.3. 1 Évaluation de la technologie d'enrichissement du minerai de fer

En général, les minéraux de minerai de fer ne peuvent pas être utilisés directement dans les procédés de fabrication de fer et d'acier, en raison de la teneur et/ou des impuretés, et donc ont besoin d'être mélangés avec d'autres minerais, concentrés et/ou enrichi. Bien que la concentration comprenne tous les processus qui augmenteront la teneur en fer d'un minerai en éliminant les impuretés, l'enrichissement, est un terme un peu plus large, comprend ces processus, ainsi que ceux qui font un minerai plus utilisable en améliorant ses propriétés physiques (ex : de pelletisation et de frittage).

La plupart des mines de fer emploient une certaine forme de valorisation afin d'améliorer la qualité et les propriétés de leurs produits (Pelletisation : est un procédé de traitement utilisé pour les minerais très fins ou pulvérulents ; Frittage : un processus utilisé pour agglomérer les fines de minerai de fer en vue de haut-fourneau de fusion).

Les méthodes d'enrichissement des minerais de fer ont évolué au cours de la période (Yellishetty et al, 2012) et sont basées sur :

- 1) la minéralogie (par exemple hématite, goethite minerai de magnétite); et
- 2) la teneur en gangue du minerai (par exemple, Al, Si et P)

III.4. Procédés d'enrichissement des minerais de fer

Avec l'augmentation de la demande mondiale de minerais de fer en raison de l'énorme exigence d'acier partout dans le monde, les pays producteurs de minerai de fer ont augmenté leur production en lançant des mesures pour utiliser les qualités inférieures (bas grade) de minerais de fer, des amendes et des boues. La principale difficulté dans le traitement et l'utilisation de minerai de fer provient principalement de leurs caractéristiques minéralogiques, ainsi que la nature douce de certains minerais et leur teneur élevée en silice.

Ainsi, la valorisation des minerais de fer à faible teneur pour enlever les minéraux de la gangue et en améliorant leur qualité est une proposition attrayante aujourd'hui (Ahmed et al, 2012; Burt, 1999). Après la libération de tous les minéraux individuels dans une roche ou une charge de minerai, soit par broyage ou par réduction de la taille naturelle, ils peuvent être séparés individuellement. En fonction de leur comportement, différentes technologies sont appliquées.

III.4.1 Séparation magnétique

La séparation magnétique est utilisée pour enlever la partie riche en fer de ces matériaux ; et éviter la formation d'une couche d'oxyde passive lors du traitement thermique, est une technique largement utilisée pour séparer des éléments magnétiques, tel que le fer.

Le principe de base est l'interaction entre les différentes forces dans un champ magnétique telles que les forces magnétique, gravitationnelle, hydrodynamique et inter-articulaires. La sélection des techniques de séparation magnétique dépend de nombreux facteurs de transformation, tels que l'assemblage de minéraux, la taille de leur libération et leur susceptibilité magnétique correspondante, en plus de la production, le marketing et les questions écologiques.

Il existe deux catégories d'équipements de séparation magnétique : les séparateurs à haute intensité et les séparateurs à basse intensité. Chaque catégorie peut être divisée en deux, soit les séparateurs humides et les séparateurs à sec. (Dwari et al, 2013 ; Veetil and Kumar, 2014).

III.4.2 Flottation

Définition

La flottation est une technique de séparation des solides basée sur la différence existante entre leurs propriétés superficielles dans une solution aqueuse et dans l'air. Pour ce faire, on disperse des bulles d'air dans une suspension aqueuse de particules solides (pulpes) pour récupérer l'espèce minérale à séparer, rendue préalablement hydrophobe par un ajout de collecteur (Gosselin et al, 1999).

La flottation est la méthode d'enrichissement de minerai la plus utilisée dans le monde. On l'emploie industriellement pour concentrer les minéraux de toutes les substances minérales métalliques et non métalliques, particulièrement les minéraux sulfurés qui constituent la fraction la plus importante des ressources minérales exploitables. Donc, après séparation magnétique, la fraction non magnétique sera valorisée par la technique de flottation (Bureau européen pour la PRIP, 2004).

Principe

La flottation est, sans aucun doute, le procédé le plus important parmi les différentes techniques employées pour le traitement de minerai. Cette technique polyvalente permet le traitement de plusieurs minerais complexes (plomb-zinc, cuivre-zinc, ...), de sulfures (cuivre, plomb, zinc, ...), d'oxydes (hématite, cassitérite, ...), de minéraux oxydés (malachite, cérusite, ...) et même de minerais non-métalliques (fluorite, phosphates, charbon, ...) (Alanyalı 2006.).

III.4.3 Procédé de séparation gravimétrique

Définition

La séparation gravimétrique est un mode de concentration dans un fluide d'un matériau mettant en œuvre la différence qui existe entre les masses volumiques des minéraux d'une part et des gangues d'autre part. La concentration gravimétrique s'effectue dans un champ de forces de masse, en général celui de la pesanteur, combiné à l'action d'autres forces telles que la résistance offerte par le fluide (en général de l'eau pour la gravimétrie en voie humide) au mouvement des grains à séparer ou les forces de frottement entre ces particules et la surface de support (Del Villar, 2010).

Les clés d'une séparation gravimétrique efficace sont à rechercher dans la connaissance parfaite des paramètres minéralogiques du minerai à traiter.

III.4.4 séparation électrostatique

Principes

La séparation électrostatique tire profit de la différence de conductivité électrique qui existe entre les matériaux afin d'accomplir leur séparation. Cette technique s'applique à un nombre relativement restreint de minéraux tels que le rutile, l'ilménite, le zircon, l'étain, les phosphates et certains sels. Elle peut aussi s'appliquer à la séparation de particules métalliques dans le sable.

Il existe deux types de séparateurs électrostatiques : les séparateurs électrostatiques et les séparateurs électrodynamiques (aussi appelés séparateurs à haute tension). Cependant, le principe de séparation est sensiblement le même pour les deux équipements (Gosselin, 1999).

Le tri des minéraux a également été effectué par leur couleur et leur brillance. Par exemple, des morceaux de mica (muscovite), du brillant au plomb, du quartz aurifère sont clairement visibles dans la masse d'une roche vide.

Au fur et à mesure que la technologie progressait, les méthodes de tri mécanisées étaient améliorées, de nouvelles propriétés des minéraux commençaient à être utilisées pour leur séparation.

Certains minéraux acquièrent des nuances de couleur différentes sous l'influence de l'ultraviolet, l'irradiation aux rayons X. Des méthodes appropriées pour l'enrichissement de ces minéraux ont également été développées.

III.4.5 Séparation optique

Le tri optique est un procédé de valorisation où les matériaux sont ségrégés selon la discrimination dans la réflexion, la transparence ou la couleur, il s'effectue généralement en utilisant des photo-détecteurs ou des caméras (Bamber, A., 2008).

III. 4.5.1 Principe de tri optique

Le séparateur optique est basé sur le principe d'identification des matériaux soumis à une source de lumière suivant les rayonnements réfléchis où la couleur (Ligus, G., 2012). D'après Suhasaria, A., et Pathak, K., 2012, un trieur optique peut renfermer ces éléments :

III.4.6 Séparation radiométrique

III.4.6.1 Tri automatique

Le tri mécanisé (enrichissement radiométrique) est utilisé pour le pré-enrichissement, ainsi que pour des opérations de concentration principales et auxiliaires pour des minerais ferreux, non ferreux, rares et nobles, des minéraux contenant des diamants et autres minéraux non métalliques (Avdokhin V. M. 2006).

Avec l'aide de l'enrichissement radiométrique plusieurs tâches technologiques de base peuvent être résolues (Polkin S. I. 1987).

1. Pré-enrichissement des minerais (gros morceaux). Comme l'a montré la pratique, le pré-enrichissement permet de réduire de 20 à 50% le volume de minerai entrant dans le broyage et le traitement ultérieur. En outre, il augmente la teneur du composant précieux dans les matières premières traitées et, par conséquent, l'extraction globale de ce composant dans le concentré. L'enrichissement radiométrique est largement utilisé pour l'enrichissement préliminaire de minerais d'uranium, de béryllium, d'or et de minerais non métalliques.

2. Séparation préliminaire des minéraux en catégories distinctes, qui sont traitées plus efficacement selon différents schémas. Par exemple, l'enrichissement radiométrique permet d'abord au traitement du minerai de cuivre d'allouer une fraction riche en gros morceaux qui peut être immédiatement envoyée à la fusion et une fraction pauvre qui sera enrichie par flottation puis fondue.

3. Obtention de concentrés grossiers. Pour certains procédés métallurgiques, des matières premières à gros morceaux sont nécessaires. L'enrichissement radiométrique permet d'obtenir des concentrés de fer, de chrome, de manganèse de grande taille, qui peuvent être envoyés à la fonte sans aucune préparation supplémentaire.

III.4.6.2 Bases physiques du processus

Les méthodes radiométriques d'enrichissement sont basées sur les différences dans la capacité des minéraux à émettre, réfléchir ou absorber les rayonnements.

Il existe deux types d'enrichissement radiométrique : l'enrichissement des minerais radioactifs, dont les minéraux émettent des rayonnements, et l'enrichissement de minerais non radioactifs dont les minéraux ne possèdent pas de radioactivité naturelle.

Dans le premier cas, la caractéristique de séparation est l'intensité du rayonnement naturel des minéraux séparés. La seconde nécessite une source de rayonnement primaire, et la caractéristique de séparation est l'intensité du signal secondaire d'interaction de ce rayonnement avec les minéraux qui sont séparés. (Nikitin, M.V.2001).

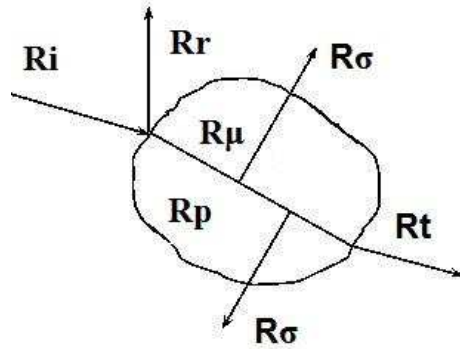


Figure. III.2 Schéma de passage des rayonnements à travers une roche.

Ri: Rayonnement initial;

Rr: Partie du rayonnement réfléchi par la surface du morceau ;

Rp: Partie du rayonnement pénétrant la roche ;

Rμ: Partie du rayonnement, absorber par la roche ;

Rσ : Partie des roches dispersées de rayonnement ;

Rt : Partie du rayonnement transmis à travers la roche.

-L'intensité et la nature du signal secondaire dépendent des propriétés du minéral. Un diagramme schématique montrant le passage du rayonnement à travers une roche est montré à la figure III.2.

Pour l'interface air-roche, l'égalité est la suivante:

$$R_i = R_p + R_r$$

D'où :

$$R_p = R_s + R_m + R_t$$

Alors :

$$R_i = R_r + R_s + R_m + R_t$$

Si nous divisons les deux côtés de l'équation par R_i , nous obtenons :

$$1 = r + s + m + t,$$

Où :

r, s, m, t sont les coefficients de réflexion, de diffusion, d'absorption, de transmission.

Selon la nature du passage du rayonnement à travers la substance, les méthodes de tri se distinguent selon la Figure III.2:

A - tri radiométrique avec utilisation de rayonnement réfléchi ;

B - tri radiométrique utilisant un rayonnement diffusé ;

C - tri radiométrique utilisant le rayonnement transmis (méthode d'absorption);

D - tri radiométrique utilisant le rayonnement généré par la particule (méthode radiométrique).

La méthode radiométrique ne nécessite pas l'utilisation d'une source de rayonnement, car elle utilise une différence de radioactivité naturelle des minerais.

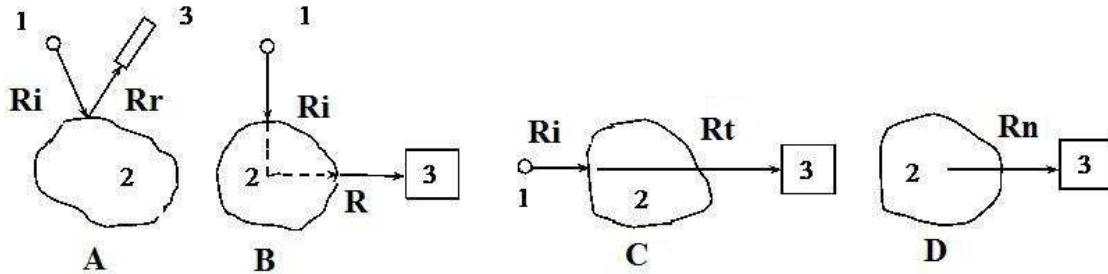


Figure III. 3 Différentes méthodes de tri.

1 - source de rayonnement 2 – échantillon de minéral ; 3 - récepteur de rayonnement

De plus, sous l'influence d'une source de rayonnement externe dans certains minéraux, une radioactivité artificielle (induite) est induite ou une luminescence lumineuse est excitée. Dans ce cas, des méthodes de tri radiométrique sont utilisées en fonction de la détermination de l'intensité du rayonnement généré par les minéraux (Samoilik V. G. 2015).

Lors de la séparation des particules minérales, une de ces méthodes peut être utilisée.

Le tri radiométrique pour des sources externes utilise le rayonnement dans une large gamme de longueurs d'onde (I):

- γ - rayonnement ($I < 10^{-3}$ nm);
- β - rayonnement ($I = 10^{-3} - 10^{-2}$ nm);
- Neutron ($I = 10^{-2} - 10^{-1}$ nm);
- Rayons X ($I = 5 \times 10^{-2} - 10$ nm);
- Ultraviolet ($I = 10^2 - 3.8 \times 10^2$ nm);
- Lumière visible ($I = 3.8 \times 10^2 - 7.6 \times 10^2$ nm);
- Infrarouge ($I = 7.6 \cdot 10^2 - 10^4$ nm);
- Onde radio ($I = 10^5 - 10^{14}$ nm).

Les caractéristiques des différentes méthodes d'enrichissement radiométrique, en fonction de la méthode de tri et du rayonnement utilisé, sont données dans le Tableau. III.1.

Tableau III.1 Classification des méthodes radiométriques de traitement des minerais (Kravets, B.N.1986).

Méthode	Phénomènes sous-jacents à la méthode	Domaine d'application
Auto radiométrie	Radio compétence naturelle, qui donne lieu à des rayonnements pénétrants	Uranium, thorium et minerais contenant d'autres minéraux radioactifs
Photo neutron	Une réaction nucléaire qui se produit lorsque le rayonnement gamma est exposé à des minéraux, ce qui entraîne un flux de neutrons	Minerai de béryllium
Luminescent	Excitation de la luminescence des minéraux par rayons ultraviolets, rayons X ou rayons gamma	Diamant, chérite, fluorite et autres minerais
Photométrie	Les différences dans les propriétés des minéraux reflètent, transmettent ou réfractent la lumière visible	Minerais non métalliques, aurifères, sulfurés et autres
Neutron-activation	Les réactions nucléaires qui se produisent lorsque les minéraux sont exposés à des flux de neutrons, entraînant la formation de minéraux radioactifs qui se désintègrent, émettent des rayonnements bêta et gamma	Aluminium, cuivre, fer, manganèse, fluorite et autres minerais
Gamma absorption	Absorption photoélectrique du rayonnement X ou gamma	Minerais contenant des éléments chimiques lourds
Absorption des neutrons	Capture, diffusion et décélération des neutrons par des noyaux d'éléments chimiques	Bore, terres rares, lithium et autres minerais
Radiographie radiographique (fluorescence X)	L'excitation des rayons X ou les sources du rayonnement gamma du rayonnement X caractéristique des atomes des éléments	Minerais de métaux, non ferreux et précieux, bauxite, quartzite et autres minerais

Les principaux facteurs qui influent sur les indices de traitement radiométrique sont : les caractéristiques du minerai, la fiabilité de l'appareillage utilisé et le caractère du schéma d'enrichissement utilisé. Les caractéristiques du minerai comprennent la teneur du composant utile, la distribution de la taille des particules, la distribution du composant utile dans les morceaux des minerais à séparer (Kravets B.N.1986).

La distribution de la taille des échantillons affecte la sélection du schéma de tri. Pour la plupart des séparateurs, le module du matériau enrichi est $D_{max} / d_{min} = 2$. Par conséquent, le matériau initial doit être divisé en 5-7 classes, qui sont enrichies séparément. Les limites maximale et minimale de la taille des classes soumises à la séparation radiométrique dépendant de la méthode radiométrique utilisée :

- 300 à 50 mm - lorsqu'il est séparé par radioactivité naturelle et induite ;
- de 200 à 25 mm - lorsqu'ils sont séparés par des méthodes d'absorption ;
- de 150 à 5 mm - lorsqu'ils sont séparés par des méthodes photométriques ;
- de 25 à 2 mm - lors de l'enrichissement par des méthodes lumineuses.

Lorsque le matériau est plus fin que la limite inférieure de la taille des grains, il est dirigé vers l'enrichissement par d'autres méthodes.

Le contraste de minerai est l'une des caractéristiques technologiques les plus importantes qui déterminent les indicateurs d'enrichissement. Le contraste caractérise le degré de différence entre les morceaux de minerai en ce qui concerne la teneur en un composant précieux et dépend principalement des propriétés naturelles du minerai, des conditions d'extraction et de sa préparation préalable à l'enrichissement (Tikhonov, E.E., et al 2004).

Dans les minerais parfaitement contrastés, le composant utile est concentré en morceaux constitués uniquement du composant utile. Dans les minerais à très faible contraste, la teneur en composant utile de tous les morceaux est la même et égale à celle du minerai.

Une évaluation quantitative du contraste est réalisée à l'aide de la valeur de l'indice de contraste, définie comme étant l'écart relatif moyen de la teneur en composant utile des morceaux de minerai par rapport à sa teneur moyenne dans le minerai (Tikhonov, E.E., et al 2004).

$$M = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \alpha) q_i}{\alpha}$$

Où

α : est la teneur moyenne du composant utile dans le minerai, %;

y_i : idem, dans des morceaux séparés d'échantillon, %;

q_i : est la fraction massique du morceau dans la masse totale de l'échantillon, en fraction d'unités.

n : nombre d'échantillons

Le rapport de contraste peut également être déterminé par les courbes d'enrichissement Figure III.4. Pour cela, une ligne horizontale est tracée au point d'intersection de la courbe 1 avec la ligne de contenu moyen de la composante utile dans le minerai, qui croise les courbes β , ϑ et l'axe des ordonnées, permet d'obtenir des données de base pour le calcul du rapport de contraste à l'aide de la formule :

$$M = 2 (1 - \gamma c) (1 - \vartheta / \alpha);$$

$$M = 2\gamma c (\beta / \alpha - 1),$$

Où :

ϑ , β , et α sont les teneurs en composant utile, respectivement, dans le déchet, le concentré et le produit initial, %; γ_c est le rendement en concentré, fraction d'unités

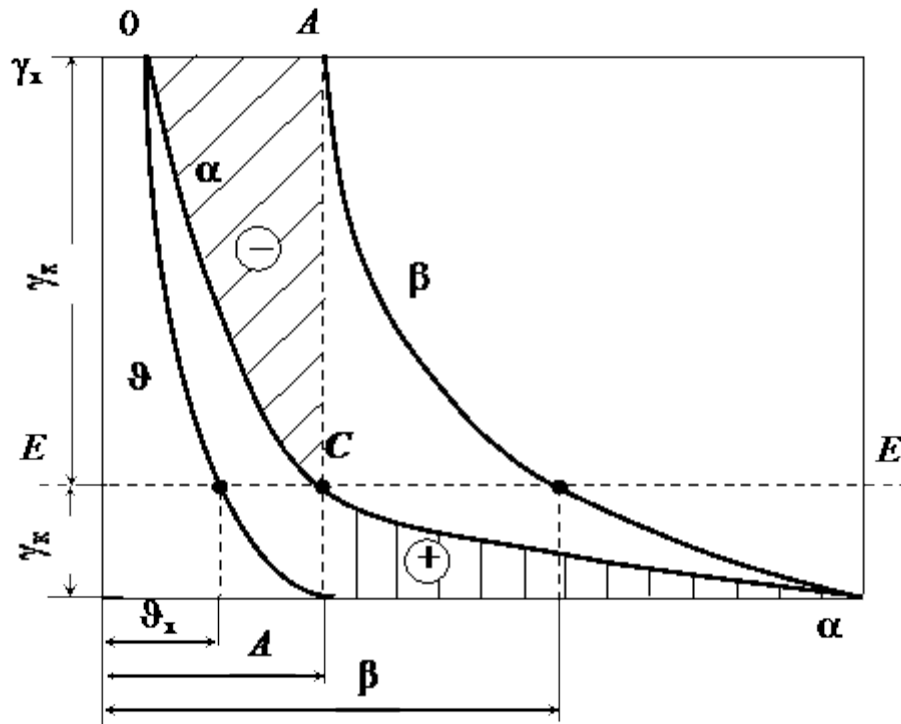


Figure III.4. Courbes de contraste (Tikhonov E.E., et al 2004).

Les limites de variation du rapport de contraste vont de 0 à 2, ce qui est facilement déterminé à partir de la formule. On suppose que la teneur en minéraux de toutes les pièces également (contraste de minéral), à savoir la teneur dans les queues sera égale à la teneur dans le concentré et le minéral ($a = b = J$). Ensuite, la valeur entre parenthèses est égale à 0 et $M \rightarrow 0$. Dans l'autre cas extrême, le minéral peut être représenté comme un ensemble de pièces constituées uniquement de la composante utile et la pluralité de pièces de matériau de déchets (par exemple, diamant). Dans ce cas, $J \rightarrow 0$, $g \rightarrow 1$ et $M \rightarrow 2$.

Par la valeur du rapport de contraste, le minéral est divisé en:

- très légèrement contrasté, $M = 0 - 0.5$;
- légèrement contrasté, $M = 0.5 - 0.7$;
- contraste moyen, $M = 0.7 - 1.1$;
- fortement contrasté, $M = 1.1 - 1.5$;
- très fortement contrasté, $M = 1.5 - 2.0$.

Le premier type de minéral n'est pratiquement pas enrichi, le second est faiblement enrichi, avec l'enrichissement du troisième on peut s'attendre à de bons résultats, ces deux derniers sont appelés minerais enrichis.

III.7 Technique d'utilisation pour l'enrichissement radiométrique

Dans la technique d'enrichissement radiométrique, on distingue les processus :

- Le tri radiométrique, dans lequel le minerai contenu dans les engins de transport (chariots, voitures, bennes, etc.) est divisé en classes à la station de contrôle radiométrique (SCR) ;
- Séparation radiométrique, réalisée sur des séparateurs de différentes conceptions.

III.7.1 Tri radiométrique

Le tri radiométrique est le processus de séparation du minerai en classes basé sur la mesure de l'intensité du rayonnement à partir de grands volumes chargés dans des réservoirs de transport - chariots, camions, etc... Le tri radiométrique à grande échelle est le procédé d'enrichissement le plus productif et le moins coûteux, applicable uniquement aux minerais, qui se caractérisent par une irrégularité suffisante de la teneur du composant utile. Il est réalisé principalement par des méthodes de radiométrie, par activation neutronique, de photoneutron et rayons X (Samilin V.N. 2003).

III.7.2 Séparation radiométrique

Lors de la préparation d'un minerai pour la séparation radiométrique, deux problèmes sont résolus :

1. Assurer un effet maximal de l'opération de séparation ;
2. Assurer un flux normal (efficace) du processus de séparation.

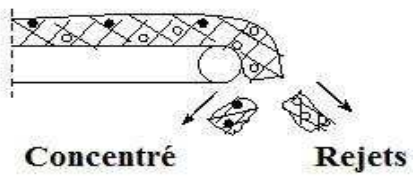
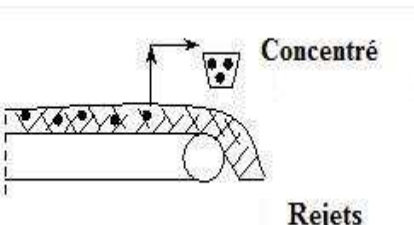
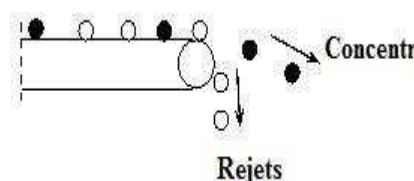
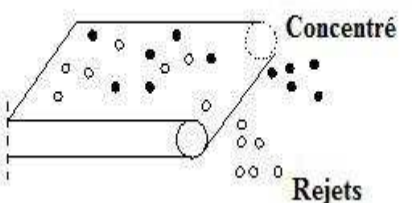
La première tâche est accomplie en préparant le matériau par la taille et en formant le flux de matériau ; la seconde est en préparant la surface des particules triées.

Dans la préparation des minerais selon la taille, des opérations de concassage et de criblage sont utilisées. Le but du concassage est d'amener à une taille spécifiée avec la divulgation maximale des composants du minéral.

La taille du matériau enrichi par le tri est de 5 – 300 mm, décomposé en classes de taille étroites avec le module 2-3. Il n'est pas permis de corriger un minerai déjà mesuré, car cela conduit à une forte baisse de la productivité.

La formation du flux de matière dépend du mode de séparation adopté. Dans le Tableau. 1.2 montre les caractéristiques des principaux modes de formation de flux de transport en séparation radiométrique (M., Nedra, 1983).

Tableau III.2. Caractéristiques des modes de séparation radiométrique (M., Nedra, 1983).

Type		Schéma de tri	Mode	Champ d'application
Flux de circulation	Flux alloué			
Mode batch				
Flux compacté	Portion (partie du flux)		Débit - portion	Tri de petites portions
Mode de déclenchement				
Flux solide	morcelé		Flow - grumeleux	Échantillonnage de pierres précieuses, métal, roche
Morceaux individuels	morcelé		jet	Matériau classé de minerais et de minéraux non métalliques
Morceaux dispersés	morcelé		Morceaux placés	Matériau classé de minerais et de minéraux non métalliques

La formation de flux de matières en vrac comprend les opérations suivantes :

- formation des distances spécifiées entre les morceaux ;
- assurer une vitesse de déplacement stable des morceaux ;
- assurer la continuité du processus de tri ;
- régulation de la performance ;
- stabilisation de la trajectoire du morceau.

La principale exigence pour les dispositifs permettant de former un flux de matière est de garantir un intervalle spécifié entre les pièces lors de leur transport. Ces exigences découlent du fait que les morceaux proches ne doivent pas être perçus comme une seule et ne doivent pas être déformées. Les dispositifs de formation de flux constituent 80% de la surface du séparateur (Kuskov V.B., 2002).

La stabilisation du taux de passage, de la distance entre la zone de radiation la zone de sélection des morceaux est déterminée par la nécessité de retarder les signaux de commande en même temps.

La continuité du processus et la régulation de la productivité sont assurées par la présence d'un bunker dans les séparateurs. Le bunker est équipé d'un amortisseur qui régule la taille à la sortie. Le matériau peut être déchargé par gravité, vibration, centrifugation, frottement.

La stabilisation de la trajectoire de mouvement de la pièce est assurée par le mouvement des particules avec la bande dans la zone de détermination de la variété et du choix du morceau.

Dans les dispositifs de mise en forme déterministe de la charge d'alimentation, les unités de préhension sont fixées au dispositif de transport à égale distance l'une de l'autre.

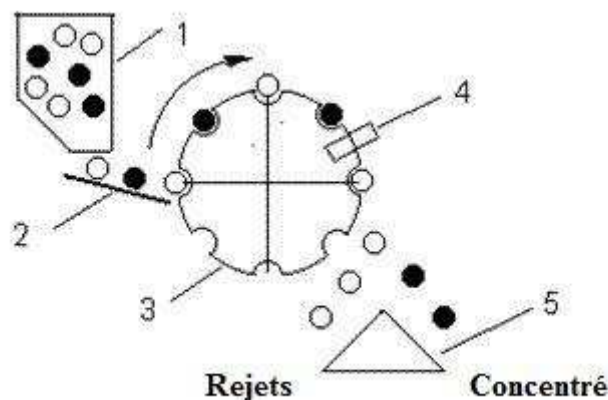


Figure III.5 Formation déterministe de la trajectoire du matériau.

- 1- Trémie, 2- Alimentateur, 3- Convoyeur, 4 - Zone de détermination de la catégorie des minerais, 5 - Zone de séparation des morceaux.

Dans ce cas, les pièces sont situées sur la même ligne dans le même plan. Des dispositifs de ce type sont utilisés pour des matériaux de forme régulière, par exemple sphériques, de petite taille, à faible productivité (figure III.5).

Dans les dispositifs de mise en forme statistique de l'avance d'alimentation, une distance donnée entre des pièces adjacentes est fournie lorsque le matériau est transféré d'un dispositif de transport à un autre, en se déplaçant à une vitesse plus élevée (figure III.6). Le déplacement des particules sur une seule ligne est réalisé en profilant le dispositif de transport.

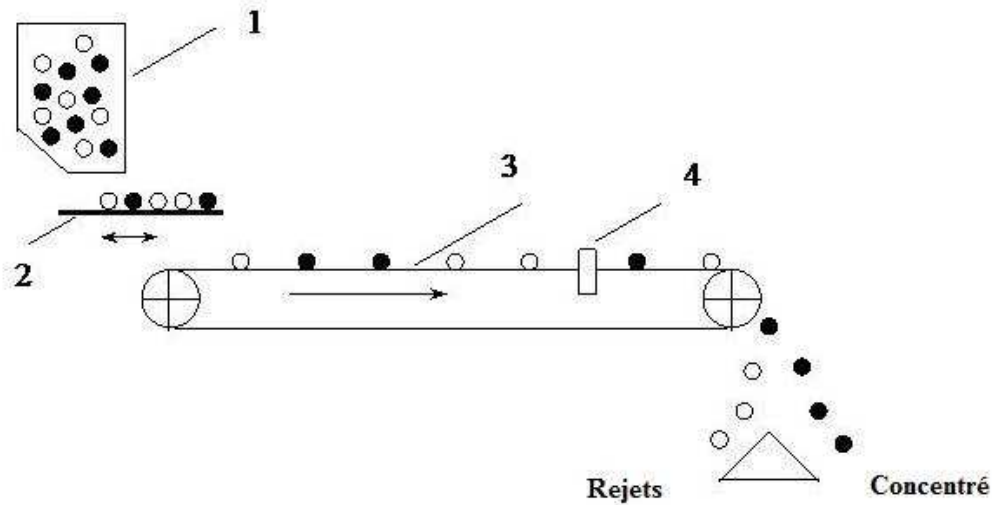


Figure III.6 Formation statistique de la traversée du matériau.

2- Trémie, 2- Alimentateur, 3- Convoyeur, 4 - Zone de détermination de la catégorie des minerais

Les dispositifs pour la formation statistique d'une alimentation à lame plate sont utilisés pour des matériaux avec des pièces de forme irrégulière et fournissent la plus grande productivité, car le matériau est dispersé dans tout le plan du dispositif transporté (figure III.7)
Exemple : séparateur RS-24 (24 canaux).

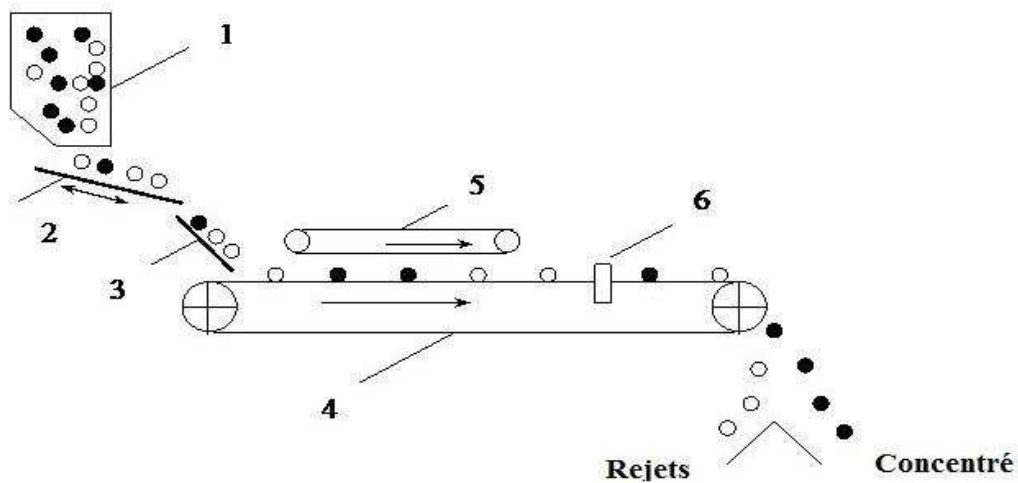


Figure III.7 Formation statistique de l'alimentation des matériaux soufflés à plat.

Dans ce schéma, le matériau de la trémie (1) est déchargé au moyen du dispositif d'alimentation vibrant (2) pour l'accélération du morceau - la plaque inclinée (3) avec un faible coefficient de frottement, d'où il vient à une bande transporteuse plate (4). Pour empêcher les particules de rouler sur le convoyeur, un silencieux à bande (5) est utilisé.

La deuxième tâche, qui détermine le comportement efficace du processus de séparation, est réalisée en préparant la surface de la particule. Ceci est particulièrement important pour les méthodes utilisant le rayonnement de bande optique. La contamination de la surface des particules aggrave leur réflectivité.

Deux méthodes de préparation de surface sont utilisées :

- rinçage (éventuellement avec séchage);
- impact sur les particules de vibration avec aspiration de la poussière.
- Augmenter les différences de propriétés utilisées dans le tri, ou les créer (si nécessaire).

Les opérations de dépoussiérage et de rinçage peuvent être effectuées à l'extérieur du séparateur ou à l'entrée du séparateur dans la zone de formation de l'alimentation (figure III.8).

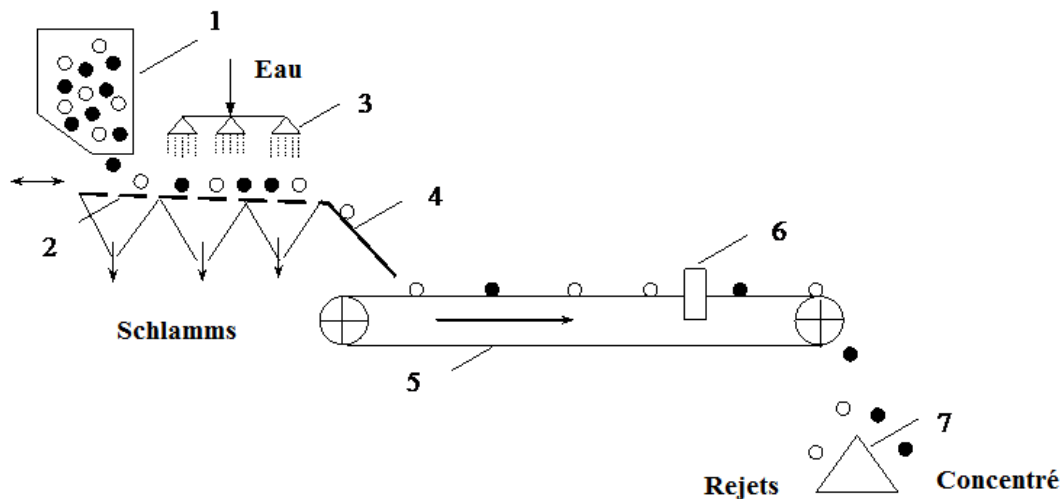


Figure III.8 Formation statistique de l'alimentation avec lavage du matériau:

1 - trémie ; 2 - alimentateur vibrant ; 3 - saupoudré ; 4 - accélérateur ; 5 - convoyeur ; 6 - zone d'identification ; 7 - Zone de séparation des morceaux.

Pour améliorer le contraste, parfois le traitement est effectué avec des réactifs spéciaux qui agissent sélectivement sur les particules, en formant un film coloré sur eux. Parfois, il est nécessaire de sécher le matériau pour améliorer la stabilité de la trajectoire des particules dans la zone d'identification du grade.

III.7.3 Enrichissement radiométrique des minerais radioactifs

L'enrichissement radiométrique des minerais radioactifs est le premier procédé maîtrisé industriellement. Dans la littérature scientifique et technique moderne, ce processus est appelé enrichissement auto-radiométrique. La méthode auto-radiométrique est basée sur l'utilisation de rayonnements provenant d'éléments chimiques naturellement radioactifs. (Turaev N.S., 2005).

Des trois types de rayonnement (rayonnement alpha, bêta et gamma) dans les appareils industriels, on utilise principalement les rayonnements gamma pénétrants, car les rayonnements alpha et bêta sont facilement absorbés par les parois de l'équipement et ne fournissent pas les informations nécessaires. Selon l'intensité du rayonnement gamma, le minerai est divisé en produits individuels. Cette méthode est largement utilisée pour l'enrichissement des minerais d'uranium, ainsi que pour les minerais dans lesquels le composant précieux se trouve dans les minéraux, contenant également un élément chimique radioactif (Maslov A. A., 2007).

Le plus répandu parmi les minerais radioactifs est l'uranium, quand on parle d'enrichissement, il faut se rappeler qu'ils sont généralement complexes. Avec l'uranium contiennent un certain nombre d'autres composants précieux, dont l'extraction associée augmente brusquement la rentabilité de la production. Les plus caractéristiques sont :

Or-uranium, $U \sim 0.01\%$, $Au \sim 0.5-1\text{ g / t}$,

Phosphore-uranium, $U \sim 0.01-0.02\%$, $P_2O_5 \sim 5-10\%$,

Vanadium-uranium, $U \sim 0.02-0.03\%$, $V_2O_5 \sim 0.5-1\%$,

Cuivre-uranium, $U \sim 0.02 - 0.03\%$, $Cu \sim 0.2-0.3\%$,

Pyrite-uranium, $U \sim 0.01-0.02\%$, $S \sim 2-3\%$,

Zirconium-uranium, $U \sim 0.01-0.02\%$, $ZrO_2 \sim 1-2\%$,

Niobium-uranium, $U \sim 0.01-0.02\%$, $Nb_2O_5 \sim 0.05-0.1\%$,

Thorium-uranium, $U \sim 0.01-0.02\%$, $ThO_2 \sim 0.05-0,1\%$.

En termes de technique, de technologie et de tâches, l'enrichissement autoradiométrique est divisé en deux types : le tri radiométrique à grande échelle et la séparation radiométrique.

Le tri radiométrique à grande échelle est réalisé par des installations radiométriques de contrôle.

La séparation radiométrique est réalisée sous le mode contrôle. Les échantillons doivent avoir environs la même granulométrie, car il est nécessaire de séparer le minerai non pas par la radioactivité absolue de l'échantillon, mais par la teneur relative de l'uranium.

La granulométrie optimale des échantillons est fixée pour chaque minerai, elle dépend du degré de contraste, pour des minerais plus contrastés, elle est plus grande. Pour les minerais de contraste moyen, il est de 40-60 mm.

La séparation radiométrique des minerais radioactifs est réalisée sur des séparateurs de différentes conceptions. Actuellement, trois types de séparateurs sont connus dans le monde :

Le premier type de séparateur est l'enregistrement du rayonnement des échantillons et leur séparation mécanique en produits d'enrichissement est effectuée pendant la période de chute libre des pièces du corps de transport du séparateur (Séparateurs "Vikhr", "Granat", "Agat", etc.)

Le deuxième type - la mesure des émissions est effectuée au moment de trouver les morceaux sur le de transport, et la séparation - à leur chute libre (séparateurs M-16, M-19, M-22, minéral, Pamir, RVS, etc.);

Le troisième type - mesure des émissions et séparation des morceaux est effectué pendant la période de présence du minerai sur la bande de transport des séparateurs (séparateurs UAS, séparateurs «Azurit», «Uranite»).

Les principales caractéristiques de certains types de séparateurs sont données dans le tableau III.3.

Tableau III.3 Principales caractéristiques des séparateurs auto-radiométriques (Maslov A. A., 2007).

Nom du séparateur	Nombre de canaux	Tranche, mm	Productivité, t / h	Efficacité de la séparation, %	Consommation électrique, kW
Whirlwind-2201R	1	100-200	75	75-80	7.5
Grenade	2	50-200	40-50	70-80	5
Agate	5	20-50	10-15	60-70	4
Uranite	1	100-200	20-30	90-91	5
Azurit-P100	2	50-100	10-14	90	6
Azurit-P50	2	25-50	4-6	85	6
UAS-200	1	100-200	40-50	92-96	2.5
UAS-100	2	50-100	22-30	90-95	2
UAS-50	2	25-50	8-9	88-93	2

Le principal inconvénient des séparateurs du premier groupe est la variation de la trajectoire des pièces avec leur chute libre, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité technologique de la séparation de 10-15%.

L'efficacité plus élevée du second type de séparateurs est obtenue grâce à la complication de la conception, ce qui conduit finalement à une augmentation significative de leur coût et à une fiabilité réduite du fonctionnement.

Les séparateurs du troisième type représentent une tendance moderne dans la conception des appareils.

III.7.4 Enrichissement radiométrique de minerais non radioactifs

La majeure partie des minerais enrichis ne présente pas de radioactivité naturelle, ce groupe de processus joue donc un rôle décisif. Une condition nécessaire à l'enrichissement radiométrique de minerais non radioactifs est la présence d'une source de tout rayonnement primaire (Arens V. Zh., 2001).

Les différences dans son interaction avec les minéraux partagés constituent une caractéristique de séparation.

Le degré de développement et le développement industriel des méthodes d'enrichissement radiométrique sont montrés dans le tableau III.1. Certaines ont été appliquées avec succès dans des usines de traitement de minéraux, d'autres ont passé avec succès un test semi-industriel. Les méthodes les plus utilisées dans l'industrie sont les méthodes photoneutron (FNM), méthode de luminescence aux rayons X (RLM), photométrie (FM), absorption gamma (GAM) et radiométrie par rayons X (RPC).

III.7.4.1 Méthode Photoneutron

La méthode du photoneutron est basée sur l'utilisation des différences dans l'intensité du rayonnement neutronique émis par les minéraux lorsqu'ils sont exposés au minerai par les rayons gamma. Cette méthode est utilisée pour enrichir les minerais de béryllium, car ce sont les noyaux de béryllium qui ont la capacité d'émettre des neutrons sous l'influence de rayons gamma d'énergie relativement faible (environ 1,7 MeV) (Kell M.N., 1988).

Pour exciter la réaction photonucléaire dans d'autres éléments chimiques, des rayons gamma d'énergie supérieure à 5-10 MeV sont nécessaires.

En tant qu'appareil principal, on utilise des séparateurs à bande, dans lesquels la détermination du grade d'une pièce peut être effectuée soit sur bande, soit dans l'air. La source du rayonnement gamma lors de l'enrichissement des minerais de béryllium est habituellement une source d'ampoule basée sur l'isotope radioactif de l'antimoine Sb124. Dans ce cas, la réaction nucléaire $9\text{Be} + \gamma \rightarrow 8\text{Be} + 1\text{n}$ a lieu. Les neutrons émis par les noyaux de béryllium traversent le modérateur (paraffine) avant d'être enregistrés pour réduire leur énergie en énergie thermique. Pour une activité gamma donnée, la puissance du flux de neutrons émis par un minerai est déterminée par la teneur en béryllium de celui-ci, quelles que soient les formes minérales qu'il représente. Le récepteur du rayonnement neutronique est un compteur à scintillation basé sur la composition de la lumière, qui est un mélange de sulfure de zinc et d'acide borique. Les caractéristiques des séparateurs de photoneutrons sont données dans le tableau III.4.

Tableau III.4 Caractéristiques des séparateurs de photoneutrons (Arens V. Zh., 2001).

Type	Épaisseur de la couche de substance, mm	Productivité, t/h
RMB-300	200-75	10-15
RMB-100	75-25	1-3
RABL-100	75-25	1-3

III.7.4.2 Méthode par luminescence aux rayons X

La méthode de fluorescence des rayons X est basée sur les différences dans l'intensité de la luminescence (émission à froid) des minéraux sous l'influence du rayonnement X. Le processus de luminescence se compose de trois étapes : absorber l'énergie du rayonnement excitant, convertir et transférer l'énergie d'excitation dans le corps et émettre de la lumière

dans les centres de luminescence avec le retour du minéral à l'état d'équilibre (Abdurakhmanov E.A., et al 2008).

Beaucoup de minéraux possèdent la capacité de luminescence, mais seulement dans certains cas cette propriété est due aux caractéristiques de leur composition de base et à la structure du réseau cristallin. De tels minéraux se distinguent par une luminescence stable. Ceux-ci comprennent : la scheelite, la pervillite, les minéraux hypergéniques contenant de l'uranium UO_2^{2+} , et le diamant.

La luminescence de la plupart des minéraux est due à la présence d'activateurs d'impuretés (luminogènes). Certains minéraux sont luminescents en raison de la présence d'éléments de terres rares. Ce groupe comprend le zircon, le corindon. De nombreux minéraux ont une luminescence instable, par exemple la calcite, l'aragonite, l'opale, la topaze, les feldspaths. Certaines impuretés dans les minéraux éteignent la luminescence, par exemple le fer et le nickel (Bragina V. I., 2009).

La méthode par luminescence aux rayons X est largement utilisée pour l'enrichissement des minerais diamantifères (tableau III.5). Avec cette dernière, les minerais de fluorite et de scheelite sont également enrichis. La source de rayonnement de rayons X dans les séparateurs primaires sont des tubes à rayons X avec différentes anodes (tungstène, le cuivre, l'argent, le molybdène, etc.), ce qui permet de sélectionner le rayonnement primaire optimale pour ce type de matières premières. Dans les séparateurs, il est préférable d'utiliser des tubes avec un large faisceau de rayonnement. Récepteur de signal de luminescence sont différents et photocellules, des photomultiplicateurs, photo type cellulaire déterminé par la longueur d'onde de la luminescence excitée.

Tableau III.5 Séparateurs fluorescents à rayons X, (Bragina V. I., 2009).

But	Type de séparateur	grosseur du matériau, mm	Production, t / h
Enrichissement par catégorie	LS-20-05N	5-10; 10-20	25; 45
	LS-20-05-2N	10-20; 20-50	60; 100
	LS-20-09	5-10; 10-20; 20-50	30; 60; 100
Traitement de concentré de diamant	LS-20-04-3N	5-10; 10-20	9; 20
	LS-50-05	5-10; 10-20; 20-50	9; 20; 30
	LS-D-4-03N	1-2; 2-5	1.3; 5
Finition pré-finale et finale des concentrés contenant du diamant	LS-OD-50-03N	5-10; 10-20; 20-50	0.12; 0.5; 2.5
	LS-D-4-03P	1-2; 2-5	0.17; 0.4
	LS-D-4-04N	1-2; 2-5	0.3; 0.6
	LS-OD-4-04N	0.5-1; 1-2; 2-5	0.004; 0.025; 0.1
	LS-OD-6	0.5-1; 1-2; 2-5	0.002; 0.012; 0.05

Le séparateur LS-20-05H, figure III.9 utilise le mode d'irradiation bilatérale du matériau et l'enregistrement bilatéral. Le mode de rayonnement est pulsé (durée de l'impulsion 0.5 ms, période de répétition 4 ms). Les multiplicateurs de photoélectrons (photomultiplicateurs) sont utilisés comme récepteurs de signaux de luminescence.

L'allocation des diamants au concentré est effectuée à l'aide d'air comprimé par des couteaux spéciaux. L'extraction des diamants dans le concentré est d'environ 98%.

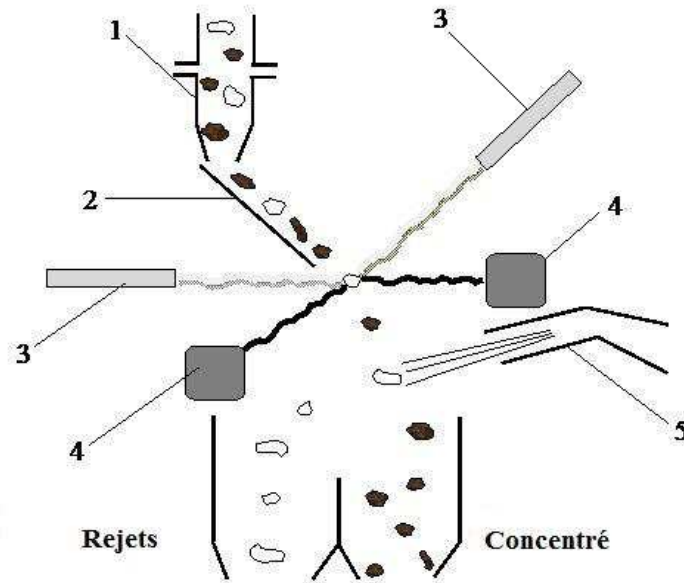


Figure III.9 Schéma du séparateur LS-20-05H.

1 - trémie de chargement; 2 - chargeur gravitationnel; 3 - tube à rayons X; 4 – photo-détecteur; 5 - coupure pneumatique.

III.7.4.3 Méthode photométrique

La méthode photométrique est basée sur l'utilisation des différences dans la propriété des minéraux pour réfléchir, transmettre ou réfracter la lumière. Lors de la séparation par réflexion de la lumière, la partie du spectre optique dans laquelle les plus grandes différences dans la réflectivité des minéraux étant séparés est utilisée (Kobzev A.S., 2008).

Une façon d'enregistrer une lumière réfléchie à partir du matériau, est de la mesurer sur un fond d'une surface de couleur, tandis que le choix de sa couleur est l'un des moyens d'optimiser le processus. Le système optique de séparateurs sont souvent conçus avec des dispositifs de balayage, de sorte que la lumière fournie au capteur avec la surface entière du morceau de minerai.

La source de lumière est à la fois les lampes à incandescence ordinaires avec un filament de tungstène, et les lampes avec un flux lumineux important (iodo-quartz). De plus, ces dernières années, on a utilisé des lasers hélium-néon, dont l'avantage est la possibilité de créer un puissant faisceau lumineux de faible diamètre (jusqu'à plusieurs millimètres). Cela permet une irradiation différenciée de la surface du matériau. Les photomultiplicateurs sont utilisés comme détecteurs de particules de lumière réfléchies.

Il existe diverses modifications des séparateurs photométriques. À l'heure actuelle, pour le traitement des minéraux non métalliques des séparateurs sont largement utilisés fournis par société britannique « Gansons Sortekslimitée », UltraSort (Australie), Crystal, Sapphire, PSE-10 (Russie), OptoSort fabriqué par AIS Sommer (Allemagne).

Le schéma d'un circuit de séparation photométrique est représenté dans la figure III.10

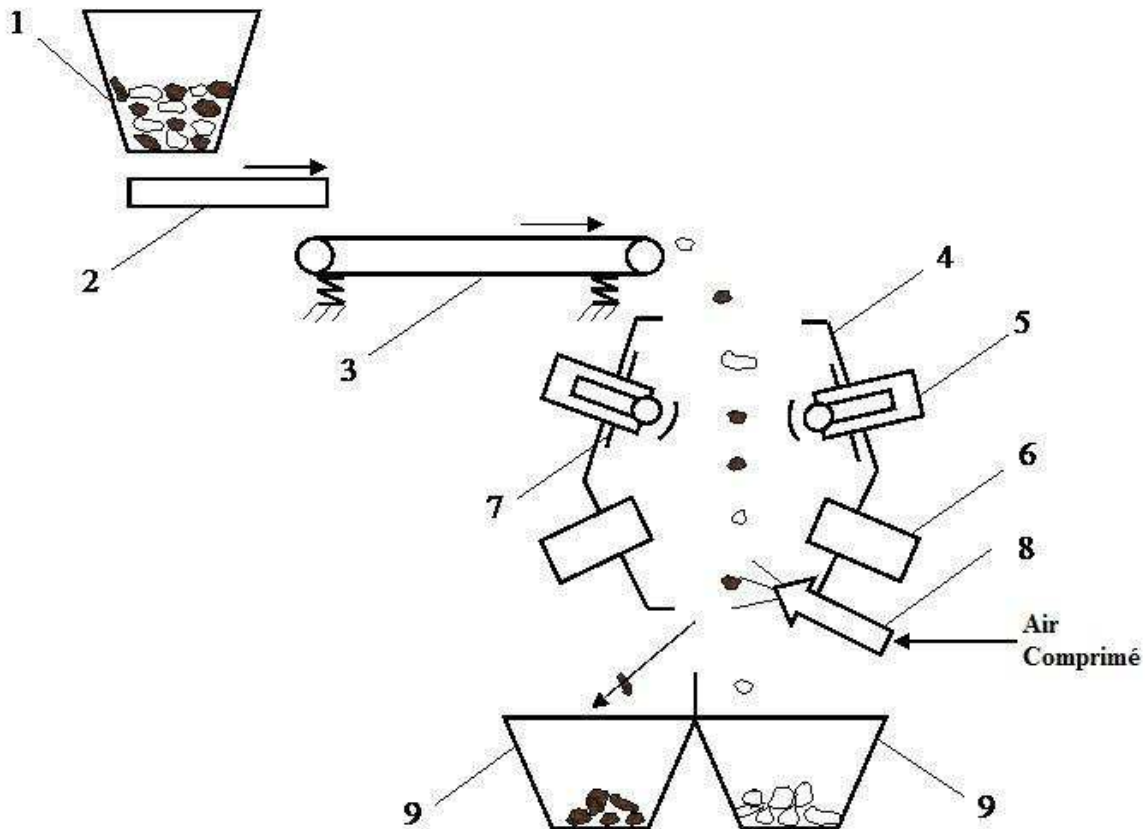


Figure III.10 Schéma d'un circuit de séparation photométrique.

1 - bac d'alimentation électrique; 2 - alimentateur vibrant; 3 - convoyeur à bande rainuré; 4 - caméra optique; 5 - unité d'irradiation; 6 - unité d'enregistrement des impulsions; 7 - plaque de fond; 8 - la valve pneumatique; 9 - collections de produits

Le minerai provenant de la trémie (1) est amené à un convoyeur à bande rainuré (3) au moyen d'un dispositif d'alimentation vibrant (2), où des morceaux de minerai sont disposés par une chaîne à certains intervalles. En se déchargeant du convoyeur à bande, des morceaux de minerai tombent en chute libre à travers la chambre optique (4) avec les irradiateurs (5). Dès qu'un morceau de minerai pénètre dans la chambre optique, dont la réflectivité diffère de l'arrière-plan (7), une impulsion électrique est envoyée du capteur (6) à l'unité de mesure électronique. Si l'intensité des impulsions dépasse une certaine valeur prédéterminée, la valve pneumatique (8) est déclenchée et le flux d'air comprimé change la trajectoire de cette pièce de minerai.

III.7.4.4 Méthode radiométrique par rayons X

La méthode de diffraction des rayons X est basée sur la détection du rayonnement X excité par les tubes à rayons X ou les sources de rayonnement gamma des atomes des éléments à détecter qui font partie des roches. Cette méthode est utilisée dans le traitement des minerais ferreux, non ferreux, des métaux précieux et des minéraux non métalliques. C'est l'une des méthodes les plus universelles.

Pour mettre en œuvre cette méthode dans des conditions industrielles, des séparateurs de différents modèles: RSQI-1, F-PPM, 50 LEN, SRF, et d'autres sont utilisées pour la séparation des minerais.

Le schéma de fonctionnement des séparateurs SRF est représenté sur la Fig. III.11.

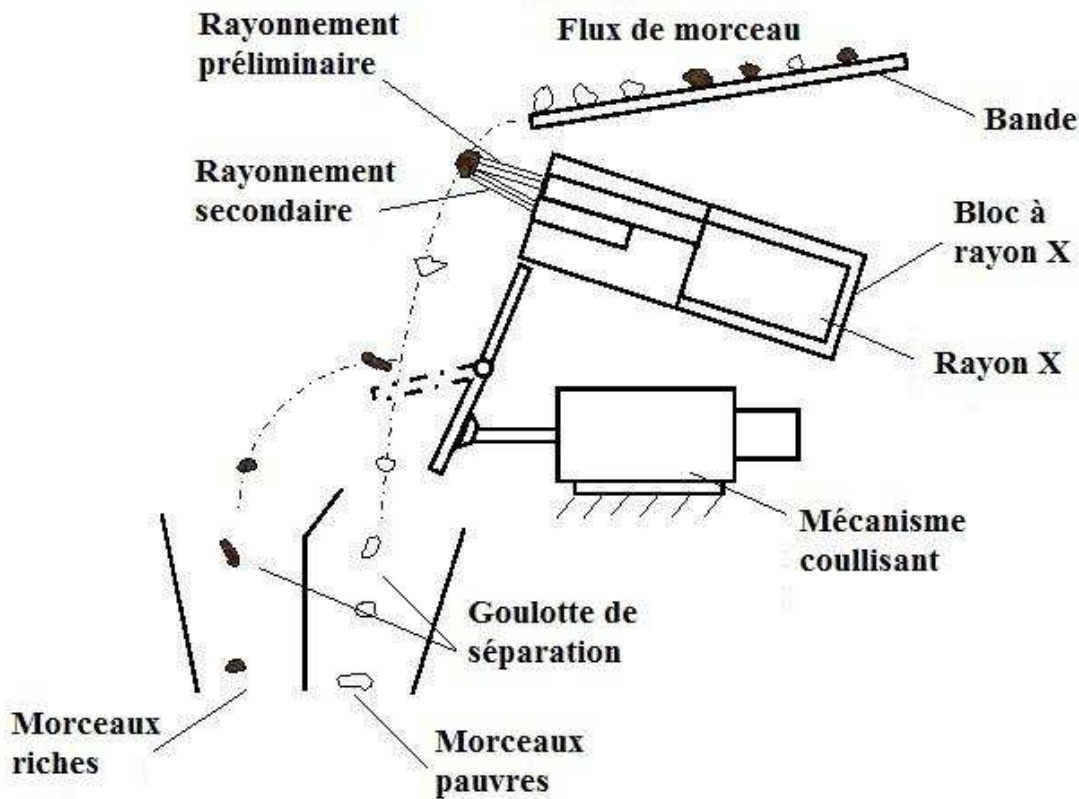


Figure III.11 Schéma de fonctionnement du séparateur SRF.

Le principe du séparateur est le suivant. Le matériau à enrichir est chargé dans la trémie de séparation. Le dispositif d'alimentation vibrant fournit un déchargement continu dosé du minerai de la trémie de réception et l'achemine vers l'épandeur.

L'épandeur a une structure de plateau et forme quatre (4) courants de minerai avec un flux l'alimentant dans la zone de mesure et de sélection dans le mode de chute libre. Chaque morceau est soumis à une irradiation par rayons X par balayage en raison du mouvement naturel du morceau dans la bande d'irradiation à petit intervalle. Le spectre de rayonnement secondaire d'une pièce subit un traitement informatique automatique, déterminant le paramètre analytique de la caractéristique de séparation, et comparant la valeur obtenue avec une valeur de seuil donnée (Fyodorov Y.O., et al., 2006)

III.7.4.5 Méthode d'absorption gamma

La méthode d'absorption gamma est basée sur la différence de degré d'absorption par les morceaux de minerai gamma. L'intensité du rayonnement gamma passant à travers les morceaux de minerai est une caractéristique de séparation (Bocharov V., et al 2011).

En plus de la composition chimique des minerais, le degré d'absorption du rayonnement gamma est influencé par les dimensions des morceaux irradiés. Pour éliminer cet effet, le minerai est soumis à une classification préliminaire. De plus, les séparateurs sont équipés d'un dispositif spécial permettant de prendre en compte les dimensions des minerais. De tels dispositifs sont de types différents : la méthode de correction mécanique ; méthode à deux faisceaux avec une source fixe supplémentaire ; méthode à double faisceau avec une source mobile supplémentaire ; méthode de correction pour un rayonnement partiellement réfléchi.

Pour l'enrichissement des minéraux, divers types de séparateurs à absorption gamma sont présentés sur le tableau III.6.

Tableau III.6 Caractéristiques des séparateurs à absorption gamma.

Nom	Taille du minerai, mm	Productivité, t / h
Minéral 2	-300 + 100	25-30
Minéraux	-200 + 50	12-18
Le cristal	-200 + 50	50-70
Rubis	-50 + 20	8-12
Ruby-2	-100 + 50	15-20
RS-2Zh	-200 + 100	20

La figure III.12 montre le schéma du séparateur de bande RS-2Z, utilisé pour enrichir les minerais de fer à grosses particules.

Le minerai provenant de la trémie (1) est amené à la bande transporteuse (3) par le dispositif d'alimentation vibrant (2). Les vitesses du dispositif d'alimentation vibrant et du convoyeur sont coordonnées de manière à fournir une alimentation du matériau. Un capteur de rayons gamma (4) est situé à l'intérieur du tambour d'entraînement. Le signal entrant est capté par le récepteur de rayonnement (5), traité dans un radiomètre, et un signal est envoyé à l'actionneur de type à glissière (6), qui dirige le morceau vers le collecteur de concentré ou vers le collecteur de rejets.

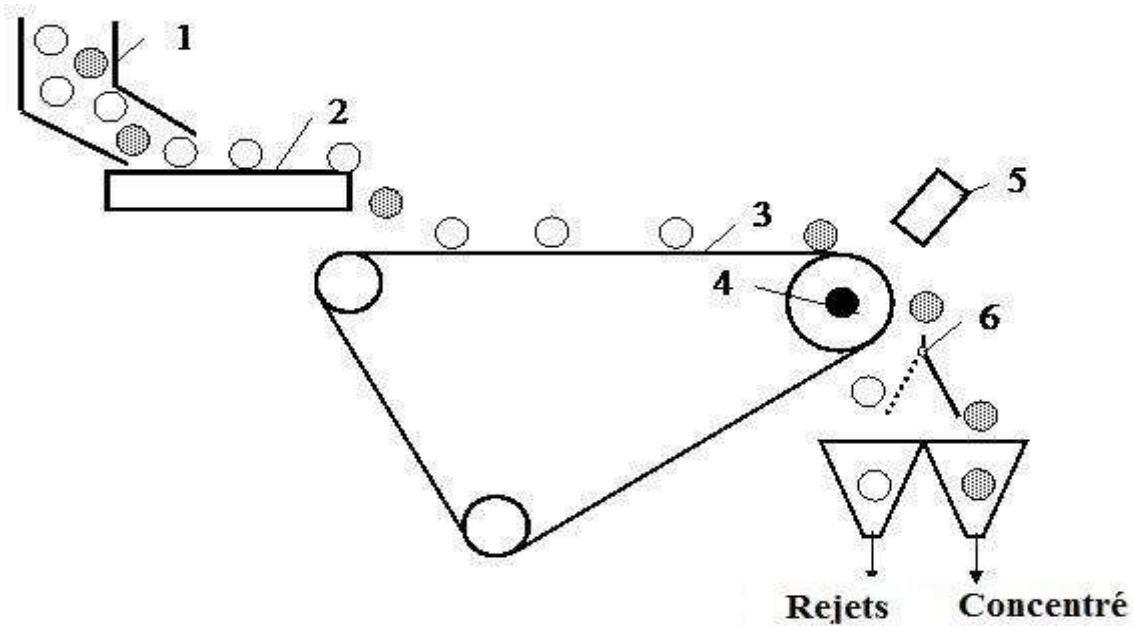


Figure III.12 Schéma du séparateur gamma-absorbant de bande RS-2ZH.

1 - bunker ; 2 - alimentateur vibrant ; 3 - convoyeur à bande ; 4 - émetteur gamma ; 5 - capteur ; 6 - glisseur

La méthode d'absorption gamma peut être utilisée pour traiter divers minéraux, mais elle n'est efficace que si le composant précieux dans le minerai est élevé et pour diviser les minéraux de densité différente. Cette méthode peut être utilisée pour la séparation du fer, du chrome, du mercure, de l'antimoine et des minerais de plomb.

Lors de l'enrichissement des minerais de fer, la tâche consiste à obtenir des matières premières de grande taille (+25 mm) pour la production métallurgique. Pour résoudre ce problème, la séparation préliminaire du minerai est effectuée par la méthode d'absorption gamma (Figure III.13). La séparation est effectuée sur des classes étroites de taille : 100-250 mm, 50-100 mm et 25-50 mm. En tant que source de rayons gamma, des isotopes sont utilisés : l'américium Am^{241} , le cadmium Cd^{153} et le cobalt Co^{60} .

La mine de l'Ouenza produit annuellement plus de 2.0 millions de tonne de fer, avec un volume aussi important de stériles francs de diverse nature au cours de différentes étapes d'extraction. L'existence des minéraux exposés directement aux agents atmosphériques (eau, air) conduisent à des réactions d'oxydation chimique et microbiologique des résidus.

Vu les critères mentionnés ci-dessus, la méthode qui correspond et répond à la problématique de stériles francs de l'Ouenza est la méthode d'absorption gamma.

Conclusion

- { 64 }

CHAPITRE IV

CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

Introduction

En vue de préserver l'environnement contre la pollution du site minier de l'Ouenza, due aux effets néfastes des poussières et des effluents liquides issus des déchets miniers, la valorisation de ces stériles francs est nécessaire, car elle permettra d'une part d'augmenter les réserves industrielles du gisement et d'autre part de réduire la pollution atmosphérique de la région. Le climat de la région de l'Ouenza est semi-aride à faible pluviométrie. De ce fait, il est plus promettant dans ces conditions climatiques que le triage radiométrique est le procédé qui correspond le mieux pour la séparation des stériles francs calibrés de l'Ouenza.

Les minéraux possèdent des propriétés physiques et chimiques qui permettent de les distinguer entre eux et qui deviennent des critères d'identification. Ce qui attire d'abord l'œil, c'est bien sûr la couleur et la forme cristalline des minéraux, mais il y a bien d'autres propriétés chimiques qui nous permet de voir tous les éléments et leur teneur dans le minerai.

Ce chapitre consiste à caractériser et mener des essais de valorisation sur les stériles francs de l'Ouenza afin de les éliminer. Pour réaliser ce travail, des difficultés sont rencontrées sur la complexité des stériles francs due principalement à la granulométrie variée et à l'hétérogénéité physique et chimique de ces matériaux.

Pour résoudre ces problèmes on propose l'utilisation d'une caractérisation complète pour identifier les stériles et une valorisation par méthode radiométrique des stériles francs de la mine de l'Ouenza.

La séparation des minéraux utiles de la gangue par l'utilisation de cette méthode est basée sur la différence des propriétés de certains minéraux pour émettre des rayonnements (méthodes d'émission-radiométrie) ou atténuer les rayonnements (méthodes d'absorption-radiométrie). Les méthodes d'émission radiométrique utilisent la radioactivité naturelle ou la luminescence des minéraux et les méthodes d'absorption radiométrique utilisent le rayonnement X et les rayonnements neutrons et gamma (Mokrousov, V. A. et al 1979).

Il existe plusieurs techniques de concentration des minerais de fer oxydés par voie sèche : séparation magnétique, grillage magnétique, radiométrique, photométrique et électrique. Le procédé de concentration radiométrique, étant comparativement à faible investissement, rend possible d'extraire du minerai calibré une partie considérable de matériaux non métalliques.

Les procédés de concentration radiométrique sont basés sur la différence entre les propriétés radiométriques des composants de minéraux utiles, c'est-à-dire, leur aptitude d'émettre, réfléchir et absorber des rayonnements corpusculaires et ondulaires (Kobzev, A.C. 2013).

L'influence de l'épaisseur du minerai calibré sur le degré d'absorption des rayons γ , ainsi que celui de la teneur en fer d'un échantillon calibré, sur l'absorption l'intensité des rayons γ est effectuée dans un laboratoire d'installation (Idres A. et al 2017).

IV.1 Echantillonnage

L'objectif de l'échantillonnage est de prélever une partie représentative d'un ensemble ou d'un lot de minerai pour déterminer avec la plus grande précision possible la teneur moyenne en divers éléments de cet ensemble. (Hoenig et Thomas, 2002 ; Nicolas, 2006).

Le but de l'échantillonnage est de fournir des informations sur un lot global, avec un niveau de fiabilité connu et acceptable. Pour étudier les caractéristiques de ce lot, il est souvent plus aisé et plus rapide d'analyser un échantillon. Il convient alors de choisir un sous-ensemble qui représente le plus fidèlement possible les caractéristiques du lot entier. (Pineau ,1996).

Le lot est donc divisé d'après l'image de Google Earth en douze (12) points dans les décharges 920 et 845, selon les points d'intersection des coordonnées de GPS. On a choisi donc les points de prélèvement des échantillons sur la décharge des stériles francs.



Figure IV.1 Points de prélèvement des échantillons.

Les coordonnées et les descriptions des échantillons sur les points dans les décharges 920 et 845, selon les points d'intersection des coordonnées de GPS sont présentées sur le tableau IV.1

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

Tableau IV. 1 Coordonnées et descriptions des échantillons.

Echantillon	Cordonnée de GPS	Description
01	X : 0419199 Y : 3979098 Z : 835	Brèche à éléments divers Brèche minéralisée à fragments de roches calcaires et marnes.
02	X : 0419189 Y : 3979130 Z : 832	Tas des éléments divers calcaire typique Une brèche minéralisée de la marne et de gypse
03	X : 0419159 Y : 3979188 Z : 829	Tas essentiellement à marne jaune et grise renferment des fragments de roche calcaire, calcaire marneux, brèche minéraliser
04	X : 0419160 Y : 3979140 Z : 828	Un tas essentiellement à un fragment calcaire et de minerais hématitique
05	X : 0419138 Y : 3979233 Z : 836	Même description de l'ECH 01 et 02
06	X : 0419159 Y : 3979188 Z : 920	Tas calcaire marne jaune + ou – grise Calcaire a calcaire marneux, brèche oxydé
07	X : 0418720 Y : 3978987 Z : 917	Tas de marne jaune et marne rougeâtre oxydés du contact du minerai Des fragments de calcaire à calcaire marneux et brèche de triace gypsifère
08	X : 0418766 Y : 3979209 Z : 922	Fragment de roche calcaire à calcaire marneux, la marne jaune + ou – grise avec des fragments de minerais de fer ainsi que des fragments de brèche triasique gypsifère.
09	X : 0418871 Y : 3979978 Z : 917	Tas de marne jaune et de marne grise
10	X : 0419144 Y : 3979075 Z : 836	Même description de l'ECH 07
11	X : 0418126 Y : 3979550 Z : 830	Tas de marne jaune
12	X : 0418848 Y : 3979884 Z : 922	Brèche à éléments divers et marne jaune

IV.2 Caractérisation des stériles francs de la mine de l'Ouenza

IV.2.1 Préparations des échantillons pour l'analyse

Afin de caractériser les stériles francs de l'Ouenza, une préparation des échantillons pour différentes analyses a été faite. Cependant (12) douze échantillons sont divisés en (4) quatre catégories. Une partie est réservée pour la caractérisation minéralurgique (lames minces), l'autre quantité restante subira les étapes de concassage grossier, de quartage, et d'homogénéisation pour obtenir un échantillon représentatif pour des essais de traitement.

Une partie de l'échantillon initial du lot principal sera analysé par les techniques de caractérisations (FX, DRX) pour l'identification des minéraux. Les étapes de préparation des échantillons des stériles francs sont présentées sur la figure IV. 2.

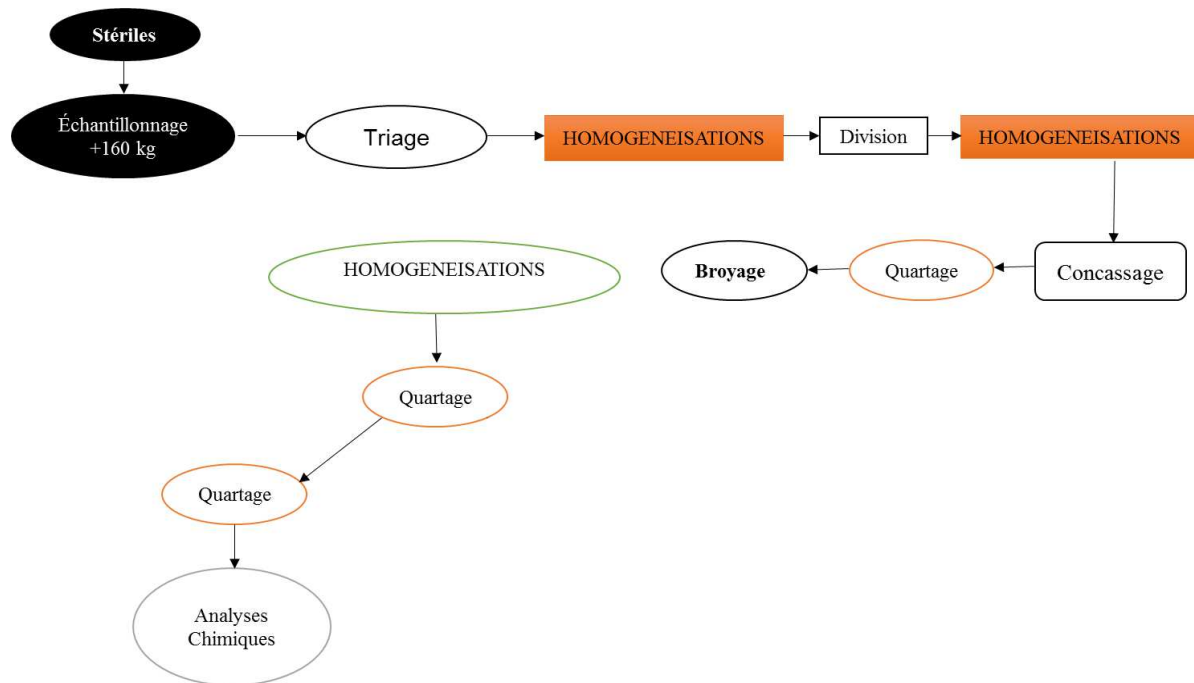


Figure IV.2 Etapes de la préparation des échantillons.

IV.2.2 Détermination des éléments par Fluorescence X

La spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX ou FX, ou en anglais XRF pour X-ray fluorescence) est une technique d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la fluorescence de rayons X. Lorsque l'on bombarde la matière avec des rayons X, la matière réémet de l'énergie sous la forme, entre autres, de rayons X ; c'est la fluorescence X, ou émission secondaire de rayons X.

Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, en analysant ce spectre, on peut en déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments. (B. Beckhoff, B et al 2006)

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

Les échantillons sont pressés à l'aide d'un presseur automatique VANEON (20 mm de moule, P 20 ton et t 30 s), en utilisant comme liant l'acide borique (H_3BO_3) 1 : 0,2 de proportion (0,6 g d'acide borique et 3 g d'échantillon séché à 100 ° C), Etalonnage par des standards internationaux. Le contenu a été vérifié et exprimé en pourcentage de leurs formes d'oxyde, par analyse semi quantitative (mode Méthode Standardless) dans le spectromètre à fluorescence X (Panalytical WDS), modèle AXIOS MAX, au niveau du Laboratoire ORGM Boumerdes).

Les résultats d'analyse par fluorescence X des échantillons initiaux bruts sont présentés dans le Tableau IV.2

Tableau IV.2 Résultats d'analyse par fluorescence X des échantillons initiaux.

N°	Teneur en %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	PAF
Marne	58.62	15.75	6.58	10.38	<0.05	<0.05	2.03	0.60	0.17	0.24	9.34
Calcaire	25.78	0.26	4.73	34.03	0.88	0.13	1.73	0.28	0.16	0.16	25.82
Fer riche	1.15	0.26	67.13	13.85	1.20	0.06	<0.05	<0.05	1.95	<0.05	16.35
Fer Pauvre	21.65	12.13	32.55	6.14	1.20	0.06	<0.05	<0.05	1.92	<0.05	22.67

D'après le tableau IV.2, on remarque dans l'échantillon de la marne, des teneurs élevées en SiO₂, CaO et en Al₂O₃ correspondant à 58.62%, 10.38% et 15.75%.

Pour l'échantillon calcaire, les teneurs en CaO et SiO₂ sont élevées correspondant à 34.03 % et 25.87 %

Pour l'échantillon de fer riche la teneur est de 67.13 % avec une teneur élevée en CaO qui est de 13.85%, par contre celle l'échantillon fer pauvre elle est 32.55 % et de SiO₂ 21.65 %.

IV.2.3 Caractérisation minéralogique

IV.2.3.1 Principe de la diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est une méthode de caractérisation des matériaux. Elle est appliquée à des minéraux dont les cristaux n'ont pas d'orientation préférentielle ou ayant une orientation préférentielle comme dans le cas des argiles. Chaque cristal est caractérisé par une disposition spécifique des atomes constituant des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires {h,k,l}. Les distances réticulaires entre ces derniers varient entre 0,15 et 15Å. La diffraction des rayons X détecte ces distances.

Selon la loi de Bragg équation 1, un faisceau de rayons X monochromatique de longueur d'onde connue frappant la surface d'un cristal peut être diffracté selon le même angle d'incidence θ du faisceau de rayon X initial. Ce dernier est caractéristique de la distance interréculaire d, caractéristique du minéral analysé.

$$n\lambda = 2d \sin \theta n$$

Avec :

λ : longueur d'onde du faisceau de rayons X

d : distance de deux plans réticulaires

θ : angle d'incidence des rayons X.

A la sortie de l'échantillon, les rayons diffractés sont détectés par un compteur à scintillation ou détecteur Géger mesurant leur intensité dans certaines directions. Ce dernier tourne autour du même axe mais à une vitesse double de celle de l'échantillon. Pour un angle d'incidence θ , l'angle mesuré par le déplacement du compteur sera de 2θ . Un diaphragme à couteau permet d'éliminer l'effet parasite du faisceau incident dans les petits angles ($2\theta < 10^\circ$). L'acquisition est effectuée par unité de contrôle et le traitement des diffractogrammes s'effectue à l'aide d'un logiciel basé sur les données des fiches de l'American Society for Testing and Materials (ASTM). Les distances interréticulaires sont alors mises en relation avec les angles 2θ enregistrés. L'identification des phases cristallines est possible selon la position des pics. (R. Jenkins et al 1996).

Les résultats d'analyse par DRX de l'échantillon initial mélangé issu des stériles francs sont représentés sur la figure IV. 3.

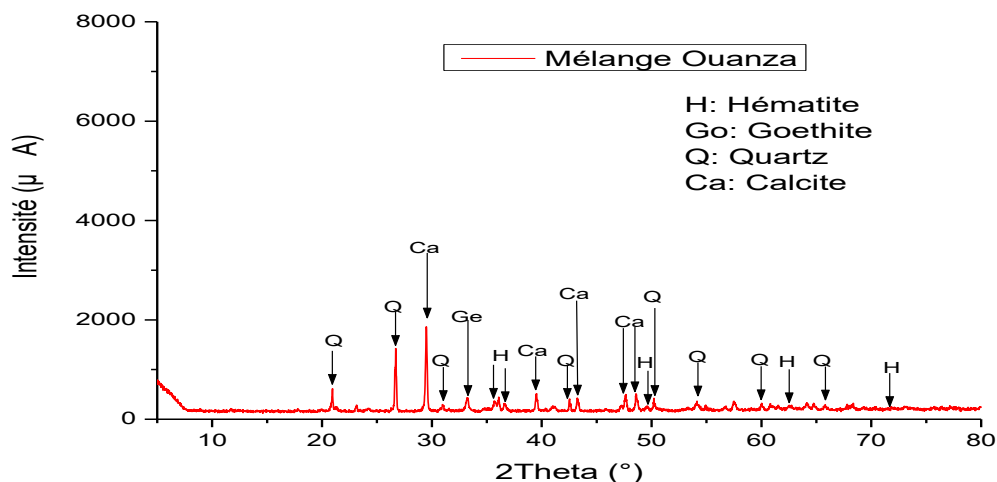


Figure IV.3 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial des stériles francs.

D'après la Figure IV.3, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial du mélange comprend les minéraux suivants : la Calcite, la Goethite, le quartz, l'hématite, Cependant, on remarque :

Les pics de calcite et de Quartz, ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leurs identifications faciles et la cristallinité associée à la majorité de calcite dans l'échantillon explique la plus grande intensité de ses pics par rapport aux autres pics.

Pour l'échantillon de calcaire, les résultats d'analyse par DRX de l'échantillon de calcaire issu des stériles francs sont représentés sur la figure IV. 4.

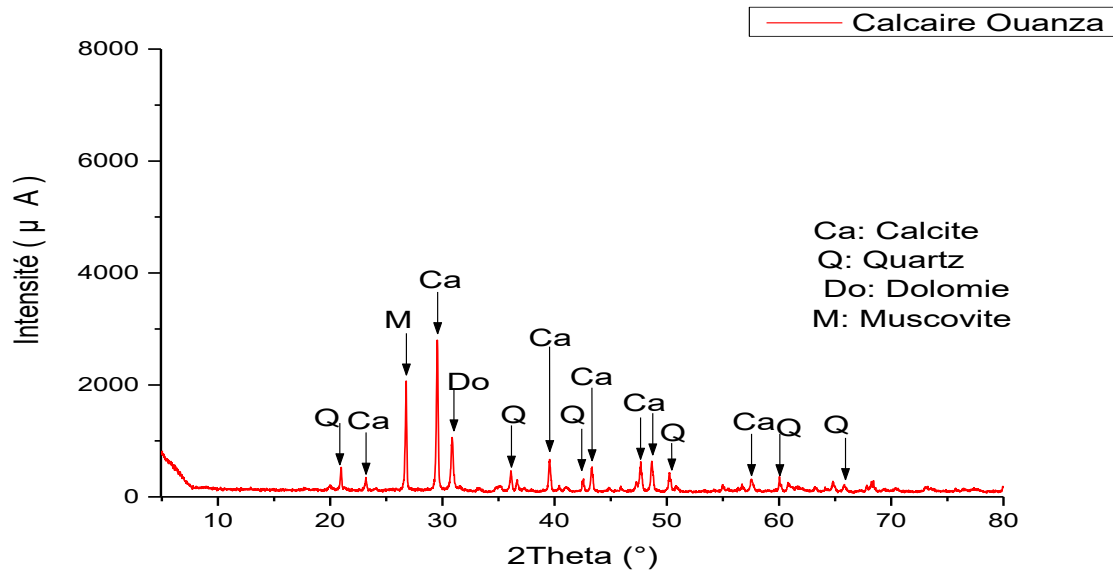


Figure II.4 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de calcaire.

D'après la Figure IV.4, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial du calcaire comprend les minéraux suivants : le Calcite, la muscovite, le quartz, la dolomite, Cependant, on remarque :

Les pics de calcite et de muscovite, ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leurs identifications faciles et la cristallinité associée à la majorité de calcite dans l'échantillon explique la plus grande intensité de ses pics par rapport aux autres pics.

Pour l'échantillon de minerai de fer riche, les résultats d'analyse par DRX de l'échantillon de calcaire issu des stériles francs sont représentés sur la figure IV. 5.

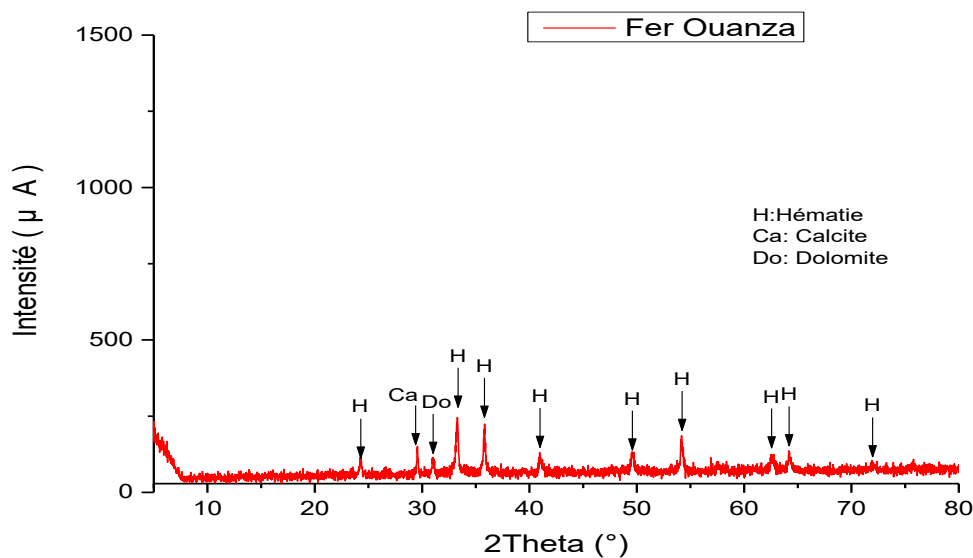


Figure IV.5 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Minerai de fer riche.

D'après la Figure IV.5, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial du minerai de fer riche comprend les minéraux suivants : l'hématite, la Calcite, la dolomite. Cependant, on remarque :

Les pics d'hématite, calcite et de dolomite, ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leurs identifications faciles. et la cristallinité associée à la majorité d'hématite dans l'échantillon explique la plus grande intensité de ses pics par rapport aux autres pics.

Pour l'échantillon de marne, les résultats d'analyse par DRX de l'échantillon de marne issu des stériles francs sont représentés sur la figure IV. 6.

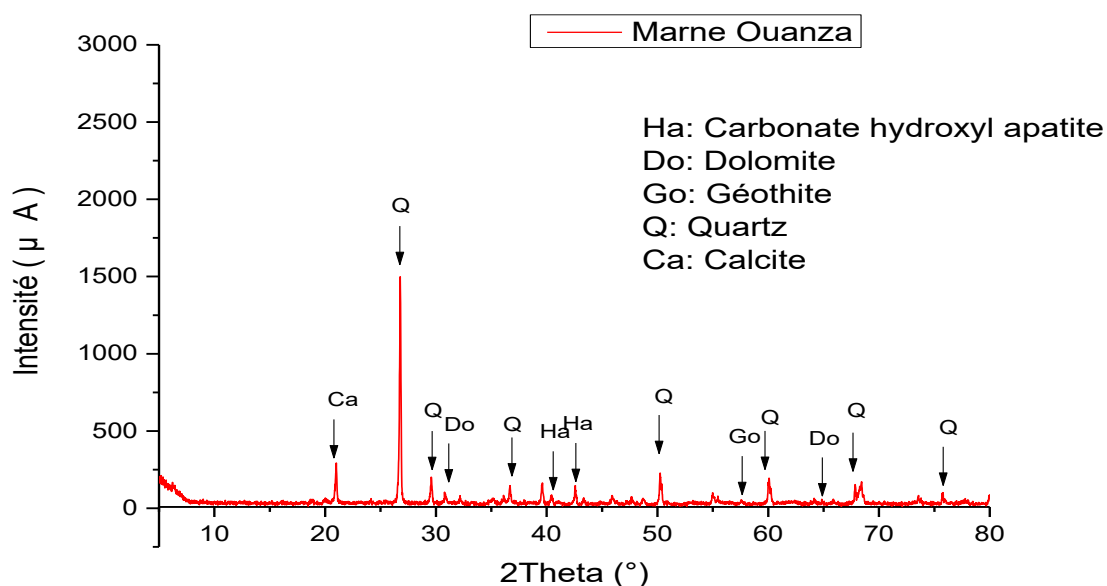


Figure IV.6 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Marne

D'après la Figure IV.6, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial de marne comprend les minéraux suivants : Carbonate hydroxyl apatite, Dolomite, Goethite, Quartz, Calcite, Cependant, on remarque :

Les pics du Quartz et Carbonate hydroxyl apatite, ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leurs identifications faciles. et la cristallinité associée à la majorité du quartz dans l'échantillon explique la plus grande intensité de ses pics par rapport aux autres pics.

Pour l'échantillon de minerai de fer pauvre, les résultats d'analyse par DRX de l'échantillon de ce dernier issu des stériles francs sont représentés sur la figure IV. 7.

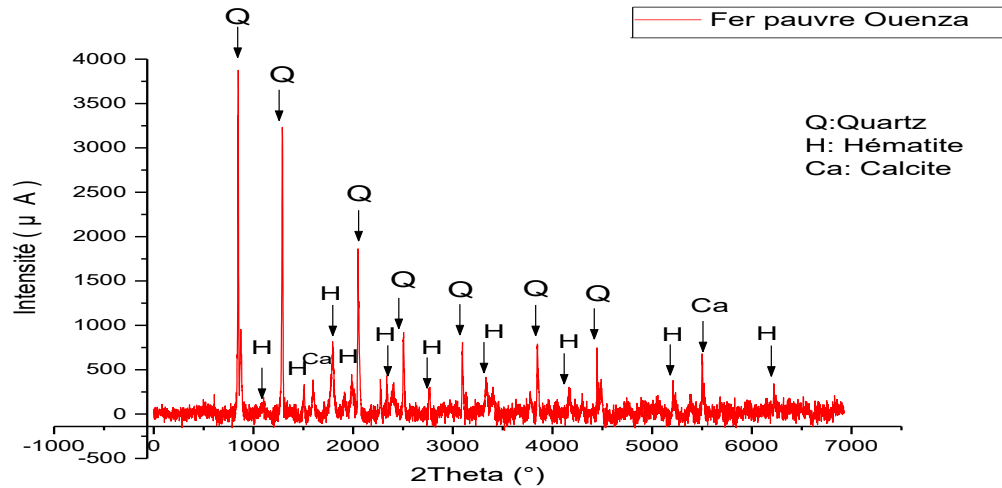


Figure IV.7 Spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon initial de Fer pauvre.

D'après la Figure IV.7, on constate que la composition minéralogique de l'échantillon initial du minerai de fer pauvre comprend les minéraux suivants : Quartz, Hématite, Calcite, Cependant, on remarque :

Les pics du Quartz et d'hématite, ayant une forte intensité sont bien exprimés, ce qui rend leurs identifications faciles. et la cristallinité associée à la majorité du quartz dans l'échantillon explique la plus grande intensité de ses pics par rapport aux autres pics.

IV.2.4 Observation par lames minces

Une lame mince de roche est une préparation spécifique effectuée par un lithopréparateur au niveau du Laboratoire ORGM (Boumerdes). Ces préparations consistent à amincir un échantillon de roche, préalablement collé sur une plaque de verre, à une épaisseur de 30 micromètres (davantage pour les lames destinées à la micropaléontologie).

IV.2.4.1 Lame mince : Echantillon 1 (Calcaire)

Nom de la roche : Calcaire siliceux Texture : Massive

Structure : Microgranulaire-Granulaire

Les résultats de l'observation microscopique des lames minces de l'échantillon de calcaire sont représentés sur la figure IV.8

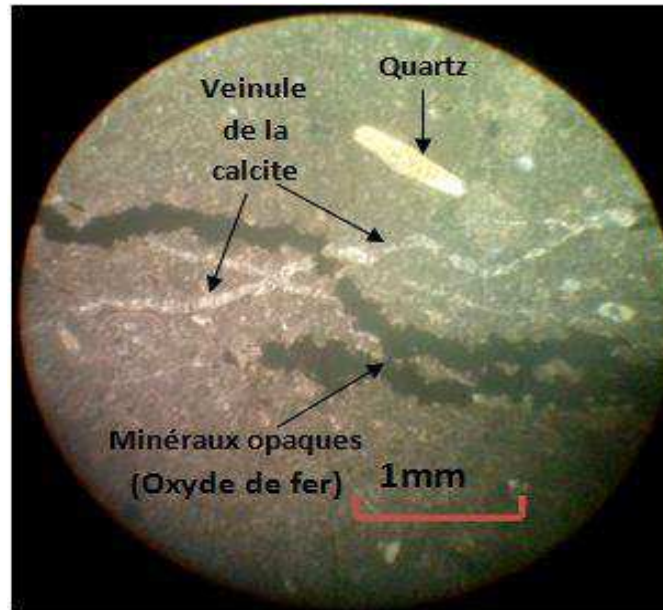


Figure IV.8 : Lame mince de l'échantillon 1.

Les résultats d'analyse de la composition minéralogique de l'échantillon de calcaire sont représentés sur le tableau IV.3.

Tableau IV.3 Composition minéralogique de l'échantillon 1 (Calcaire).

Composition Minéralogique	Teneur, %	Forme des grains	Dimensions des grains (mm)
Calcite	70	Pâte-Veinule	0.01-0.5
Fossile	05	Diverse	0.07-0.3
Quartz	15	Subautomorphe-Automorphe	0.03
Minéraux opaques	10	Veinule- Masse arrondie	0.1-1

IV.2.4.2 Description pétrographique

L'observation pétrographique de la lame mince montre une roche de nature carbonatée, elle est principalement formée par les minéraux suivants : la calcite, le quartz, les minéraux opaques et quelques fossiles.

La calcite se manifeste sous forme d'une pâte de teinte peu claire, elle est recoupée souvent par des veinules de différente dimension remplies par la calcite secondaire, leur taille peut atteindre 0.5mm.

Parfois, elle renferme des fossiles de formes divers dispersées à travers la pâte carbonatée.

Le quartz est observé en cristaux automorphes à sub-automorphes noyés dans le fond carbonaté, la taille moyenne des grains varie autour de 0.03 mm.

Les minéraux opaques sont observés sous forme de masse plus au moins arrondie et de grande taille (jusqu'à 1 mm) et en veinule de différentes dimensions recoupant la roche.

IV.2.4.3 Lame mince : Echantillon 2 (Marne)

Nom de la roche : Grès calcaireux Texture : peu massive

Structure : Micro-granulaire-Lité

Les résultats de l'observation microscopique des lames minces de l'échantillon de grès calcaireux sont représentés sur la figure IV.8.

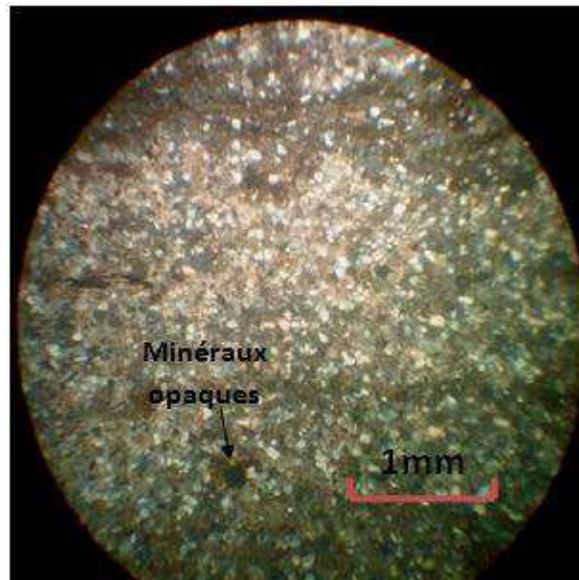


Figure IV.8 : Lame mince de l'échantillon 2 (Marne).

Les résultats d'analyse de la composition minéralogique de l'échantillon de Grès calcaireux sont représentés sur le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Composition minéralogique de l'échantillon 2 (Marne).

Composition Minéralogique	Teneur en %	Forme des grains	Dimensions des grains (mm)
Quartz	65	Xénomorphe-Abguleux	0.03
Calcite	30	Ciment	0.01
Minéraux opaques	05	Grains isolés	0.05

IV.2.4.4 Description pétrographique

L'analyse pétrographique de la roche montre un grès calcaireux de structure lité, il est principalement constitué par le quartz, la calcite et les minéraux opaques.

Le quartz se manifeste sous forme de grains xénomorphes et anguleux de même taille, lorsqu'ils sont collés les uns à côté des autres ils forment une mosaïque.

La calcite est observée sous forme d'un ciment lié les grains de quartz entre eux.

Les minéraux opaques sont observés sous forme de grains isolés et dispersés à travers la roche, de taille moyenne de l'ordre de 0.05 mm.

IV.2.4.5 Lame mince : Echantillon 3 (Fer)

Nom de la roche : Calcaire ferrugineux **Texture :** Massive

Structure : Micro granulaire-Veinulaire

Les résultats de l'observation microscopique des lames minces de l'échantillon de Calcaire ferrugineux sont représentés sur la figure IV.9.

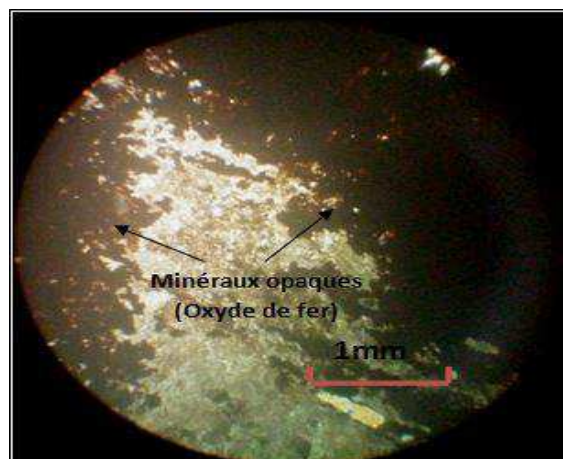


Figure IV.9 : Lame mince de l'échantillon 3.

Les résultats d'analyse de la composition minéralogique de l'échantillon de Grès calcaireux sont représentés sur le tableau IV.5.

Tableau IV.5 Composition minéralogique de l'échantillon 3. (Fer).

Composition Minéralogique	Teneur en %	Forme des grains	Dimensions des grains (mm)
Minéraux opaques	68	Plage-Masse	0.01-2
Fossile	03	Divers	0.05
Calcite	17	Pâte-Veinule	01
Quartz	12	Subautomorphe-Automorphe	0.03-0.05

IV.2.4.6 Description pétrographique

La lame mince montre un calcaire ferrugineux, il est composé par la calcite, les minéraux opaques (oxyde de fer), le quartz et quelques fossiles.

Les minéraux opaques sont représentés par des oxydes de fer, l'oxyde de fer représente environ 68 % de la masse totale de la roche, elle est observée sous forme de plage et masse millimétriques.

La calcite représente environ 17 % de la masse totale de la roche sous forme de pâte micro-granulaire, elle est recoupée par une veinule de taille millimétrique remplie par la calcite secondaire, elle englobe parfois des fossiles de différentes formes.

Le quartz est moins abondant, il présente en grains automorphes et subautomorphes disséminés sur la pâte carbonatée, leur taille oscille entre 0.03 et 0.05 mm.

IV. 3 Caractéristiques des rayonnements ionisants

D'une manière générale, on peut définir un rayonnement ou radiation comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Les rayonnements ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leurs interactions avec la matière dans laquelle ils se propagent. Ils peuvent céder au milieu qu'ils traversent la totalité ou une partie de leur énergie au cours de ces interactions (Kervasdoué, J. 2007).

Un rayonnement est dit ionisant quand il est susceptible d'arracher des électrons à la matière. L'équivalent en énergie correspond à 12,4 eV. Parmi ces rayonnements, on distingue ceux qui sont directement ionisants, particules chargées (α , β , ions, etc.), de ceux qui sont dits indirectement ionisants car n'étant pas chargés (γ , n) ; ils n'ionisent la matière que par l'intermédiaire de particules chargées ionisantes qu'ils créent dans le milieu.

Dans le tableau IV-6 sont classés les différents types de rayonnements selon leurs natures et spectres caractéristiques.

Tableau IV.6 Classification des rayonnements ionisants.

Différents rayonnements	Spectres de raies	Spectres continus
Rayonnements indirectement ionisants	γ , X de fluorescence	X de freinage, neutrons
Rayonnements directement ionisants	α , électrons Auger	β^- , β^+

L'ionisation est le phénomène au cours duquel un électron est arraché à l'atome à la suite d'un transfert d'une énergie supérieure à son énergie de liaison ; il crée un ion positif et un électron susceptible d'ioniser à son tour si son énergie est suffisante. Après l'ionisation, l'ion positif subit généralement un réarrangement de son cortège électronique, aboutissant à l'émission de rayons X de fluorescence ou plus rarement à l'expulsion d'électrons Auger. Lorsque le transfert d'énergie n'est pas suffisant pour provoquer le départ d'un électron, il s'agit d'excitation ; cet état est transitoire et ultérieurement, l'atome subit un réarrangement analogue à celui décrit pour l'ionisation.

En 1900, Paul Villard [1860-1934], physicien français, a mis en évidence le rayonnement γ provenant du radium. Ce rayonnement capable de traverser une faible épaisseur de plaque de Pb est insensible aux champs magnétiques. De même nature physique que le rayonnement X, il se différencie par son origine. Contrairement au rayon X qui est émis lors d'une transition entre couches électroniques d'un atome, le rayon γ est produit par une transition nucléaire.

Grâce à son pouvoir ionisant et sa capacité à pénétrer profondément dans la matière, le rayonnement γ est utilisé dans de nombreuses applications : en radiothérapie (traitement des tissus cancéreux), en stérilisation (domaine pharmaceutique), en ionisation (conservation des aliments), pour l'étude du vieillissement et la tenue aux radiations des matériaux pour les différentes activités nucléaires, etc.

IV. 3.1 Source des rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont présents sur la Terre depuis sa création. Les progrès scientifiques ont amené les hommes à se servir de rayonnements ionisants produits artificiellement. Ces rayonnements ont donc aujourd'hui des origines très diverses (Améon, R. 2003).

Les rayonnements cosmiques sont des rayonnements ionisants d'origine naturelle. Ils peuvent provenir du Soleil mais également d'autres sources galactiques et extra-galactiques. Ils sont constitués de noyaux atomiques, de particules de haute énergie et de rayonnements électromagnétiques. Leur interaction dans l'atmosphère produit des éléments radioactifs, dits d'origine cosmogénique, ainsi que des pions se désintégrant en produisant des muons.

La radioactivité produit différents types de rayonnements ionisants : les particules α , les particules β (β^- : électrons, β^+ : positrons), les protons, les neutrons et les rayons γ . Les radionucléides responsables de cette radioactivité ont eux-mêmes plusieurs origines :

- Les radionucléides d'origine cosmogénique sont produits dans l'atmosphère par les rayonnements cosmiques avant de retomber sur Terre. Parmi eux, on peut citer le carbone 14 (^{14}C) ou encore le tritium (^3H) ;
- Les radionucléides d'origine tellurique sont présents sur la Terre depuis sa formation. Certains, possédant une période radioactive courte par rapport à l'âge de la Terre ont pratiquement disparu. D'autres, ayant une longue période radioactive, sont les plus abondants mais ne présentent pas une forte activité. Ce sont les radioéléments ayant une période radioactive de l'ordre de grandeur de l'âge de la Terre qui sont responsables de la majeure partie de la radioactivité tellurique : le potassium 40 (^{40}K), l'uranium 238 (^{238}U) ;
- Les radioéléments d'origine artificielle sont souvent produits de manière contrôlée dans des cyclotrons ou dans des réacteurs nucléaires. Elle est aujourd'hui présente dans l'environnement essentiellement du fait des essais nucléaires atmosphériques, des catastrophes nucléaires et des différents rejets de radioéléments utilisés en médecine ou dans les centrales nucléaires. L'iode 131 (^{131}I) et le césium 137 (^{137}Cs) sont des radioéléments d'origine artificielle.

Certains rayonnements électromagnétiques sont également des rayonnements ionisants. De manière classique, on considère que c'est à des longueurs d'onde inférieures à $0,1\ \mu\text{m}$ qu'un rayonnement électromagnétique est ionisant. Parmi le spectre électromagnétique, sont donc considérés comme ionisants les rayons gamma, les rayons X et certains ultraviolets. Les rayons gamma sont issus de la désexcitation nucléaire faisant suite à une désintégration radioactive. Les rayons X et les rayonnements ultraviolets sont issus des processus électromagnétiques comme la transition électronique ou le Bremsstrahlung. Ils font partie des rayonnements cosmiques mais sont aussi produits de manière artificielle pour servir dans divers domaines tels que la recherche scientifique, la radiologie médicale ou l'industrie.

Certains rayonnements particuliers sont aussi considérés comme des rayonnements ionisants. Ils proviennent des diverses sources naturelles mais peuvent aussi être directement créés de façon artificielle et utilisés dans des accélérateurs de particules : électrons, protons, ions.

IV. 3. 2 Radioactivité gamma (γ)

La radioactivité gamma se produit quand une désintégration ou un événement comme la capture d'un neutron, a laissé le noyau avec un trop plein d'énergie. Le noyau " excité " revient généralement très rapidement à un état plus normal. Dans cette illustration (Figure IV.10), le noyau déformé et animé d'une rotation autour d'un axe retrouve une forme sphérique et perd sa rotation en émettant une radiation gamma qui emporte l'excédent d'énergie. Les rayons gamma sont de même nature que les photons de lumière émis par les atomes, mais leurs énergies sont des centaines de milliers de fois plus grandes (Raddadi, M. C. 2004).

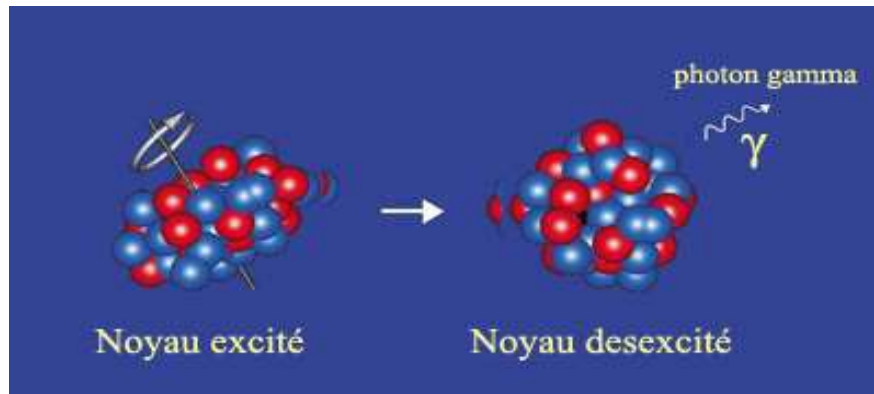


Figure IV.10 Exemple de radioactivité gamma.

IV. 3. 3 Pénétration des rayonnements

Par leur énergie, les rayonnements ionisants sont pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent traverser la matière. Cependant, le pouvoir de pénétration est différent pour chacun d'entre eux, ce qui définit des épaisseurs différentes de matériaux pour se protéger figure IV.11

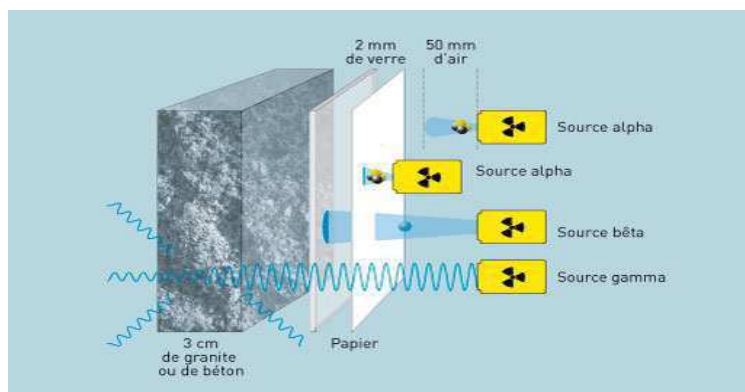


Figure IV.11 Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants.

La portée des rayonnements alpha et bêta est faible. Il est facile de s'en protéger : une feuille de papier suffit pour stopper les lourdes particules alpha. Pour le rayonnement bêta, il faut dix feuilles de papier ou une feuille d'aluminium. Il en va tout autrement pour le rayonnement gamma : comme il ne possède pas de matière et qu'il est très fortement chargé en énergie, il est pénétrant. Pour s'en protéger, des plaques de plomb ou des murs de béton sont nécessaires (Bellet, D. 1990).

IV.4 Interaction rayon gamma avec la matière

L'effet des rayons gamma est très différent de celui de particules chargées. Alors que les rayons alpha et bêta déposent leur énergie progressivement, les photons gamma procèdent par tout ou rien. Ils ne produisent aucun effet avant d'interagir avec un noyau ou un électron.

Quand ils interagissent, ils mettent en mouvement des particules chargées. Ce sont elles qui déposeront l'énergie dans la matière. Les rayons gamma interagissent avec la matière via trois mécanismes principaux : (Davisson, C. M. 1965).

IV.4.1 Effet Photo-électrique

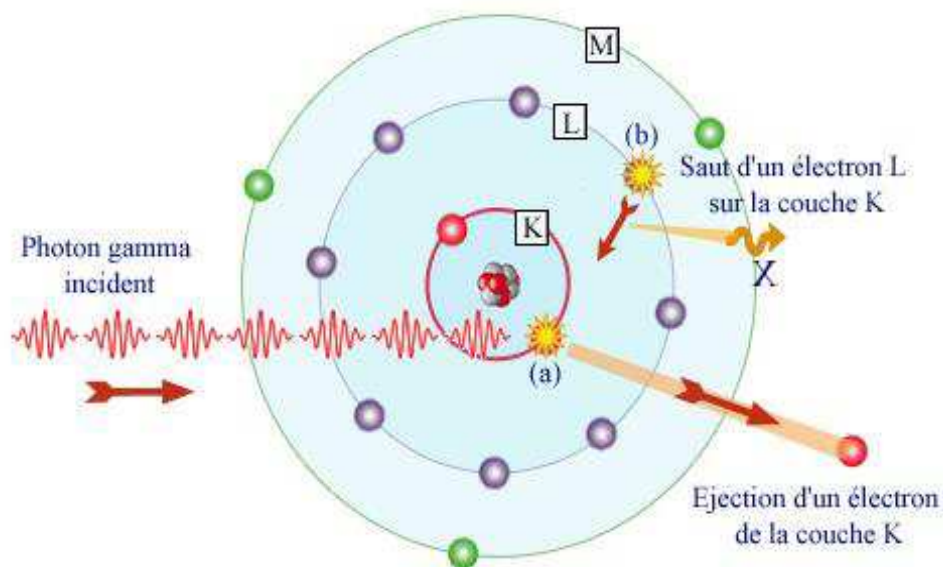


Figure IV.12 Absorption d'un gamma par un atome.

L'effet photoélectrique se produit en deux temps. Tout d'abord, le photon arrache (a) un électron lié d'un atome. Dans le cas d'un gamma, il s'agit généralement d'un électron appartenant aux couches les plus internes L ou K (comme sur la figure). Ensuite l'atome qui a perdu un de ses électrons internes se trouve dans un état excité. Un électron d'une couche plus externe (b) vient occuper la lacune laissée par l'électron éjecté. Si l'électron éjecté appartenait à la couche K comme sur la figure IV.12, un rayon X est émis lors de cette transition (H. Hertz, 1887).

L'effet photoélectrique est le phénomène qui transforme les infrarouges, la lumière, les ultraviolets en courant électrique dans les panneaux solaires et les cellules de nos caméras. Il intervient aussi en radioprotection, un tout autre domaine, pour nous protéger des rayons X et gamma en transformant ces rayonnements pénétrants en électrons faciles à arrêter.

L'effet photoélectrique est le phénomène physique le plus efficace pour atténuer ces rayonnements. Le photon gamma ou X disparaît, absorbé en interagissant avec un électron lié d'un atome (Manjit Kumar, 2012).

IV.4.2 Effet Compton

L'effet Compton est le nom donné par les physiciens à la collision d'un photon et d'un électron : le photon rebondit sur un électron cible et perd de l'énergie. L'électron est mis en mouvement. Ces collisions où l'on retrouve à la sortie les particules initiales entrent en compétition avec l'effet photoélectrique lors de la traversée de la matière par des rayons gamma figure IV.13. L'effet Compton contribue à l'atténuation du rayonnement gamma. (Arthur H. Compton, 1923)

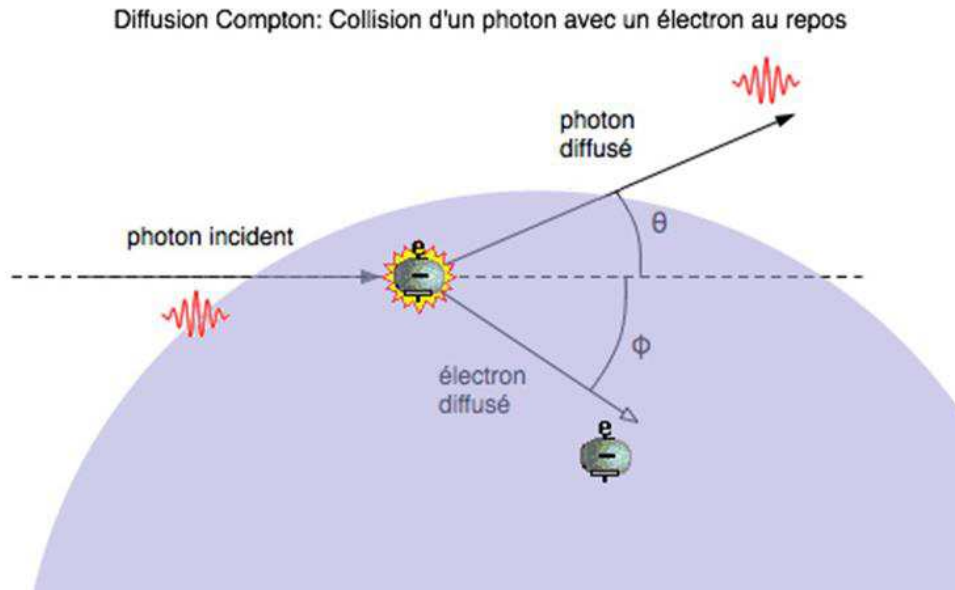


Figure IV.13 Collision d'un photon et d'un électron atomique.

L'effet Compton concerne la plupart des électrons atomiques. Un photon gamma qui joue le rôle de projectile entre en collision avec un électron d'un atome qui lui sert de cible. Le gamma a été représenté comme un quasi corpuscule en raison de sa très courte longueur d'onde à l'échelle de l'atome. La grande majorité des électrons possédant une énergie petite par rapport à celle du gamma, les physiciens ont coutume de la négliger et de considérer l'électron cible comme au repos. Lors de la collision, l'électron est mis en mouvement selon un certain angle, alors que le gamma diffusé selon un autre angle perd de son énergie.

Ces collisions élastiques deviennent prépondérantes quand l'énergie du photon devient grande par rapport à la force de l'élastique qui retient l'électron à un atome, son énergie de liaison. Pour un atome léger comme le carbone, l'effet Compton l'emporte sur l'effet photoélectrique au-dessus de 20 keV. Pour le cuivre c'est au-dessus de 130 keV ; pour le plomb de 600 keV.

Dans cette plage d'énergie, on le voit très variable, le phénomène concerne tous les électrons de l'atome, alors que dans l'effet photoélectrique ce sont les deux électrons de la couche K la plus interne qui jouent un rôle. Pour un absorbeur, c'est la densité des électrons qui est déterminante dans le domaine où l'effet Compton domine. Le plomb possède de ce fait un avantage sur les matériaux plus légers, même s'il ne bénéficie plus de la charge électrique élevée de son noyau qui intervenait à la puissance quatrième dans l'effet photoélectrique.

IV. 5 Mesure du coefficient d'atténuation des échantillons des stériles francs par transmission d'un faisceau gammas.

La présente expérience consiste à déterminer le coefficient d'atténuation linéaire total dans les roches de minerai de fer de différentes concentrations par l'étude de l'atténuation d'un faisceau de photons à travers les échantillons (Ozyurt, O et al. 2018 ; Mann, K. S. 2018 ; Taqi, A et al. 2017).

Pour cela, on utilise l'équation de base reliant le faisceau incident au faisceau transmis donné par la relation de Beer-Lambert (Davisson, C. M. 1965) :

$$I = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1)$$

Avec :

μ : Coefficient d'atténuation linéaire total donné, cm^{-1} ;

x : Epaisseur de l'échantillon dans la direction d'incidence du faisceau donnée, cm ;

I : Intensité atténuée du faisceau des gammas d'énergie E ;

I_0 : Intensité du faisceau des gammas d'énergie E avant l'atténuation ;

$e^{-\mu x}$: Coefficient de transmission.

A partir de la relation (2), le coefficient d'atténuation μ est écrit comme :

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left[\frac{I_0}{I} \right]. \quad (2)$$

Puisque l'intensité I et I_0 sont proportionnels aux taux de comptage net détecté $C(t)$ avec la même constante de proportionnalité (même chaîne de détection.), alors le rapport $\frac{I_0}{I}$ est égal au rapport $\frac{C(t)_0}{C(t)} = e^{-\mu x}$.

L'incertitude $\Delta\mu$ sur les valeurs mesurées du coefficient d'atténuation total μ est donnée à partir de l'application de la formule de propagation d'erreur sur la relation (3) :

$$\Delta\mu = \frac{1}{x} \left[\left(\frac{\Delta I_0}{I_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\ln \frac{I_0}{I} \right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta x}{x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

L'atténuation est étudiée pour les énergies 122 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV émises par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs respectivement.

III.5.1 Expérimentation

Cependant, chaque type de minerai est subdivisé en trois échantillons supposés homogènes de même matrice et de concentration du minerai de fer, trois échantillons sont prélevés de chaque catégorie des matériaux des décharges des stériles francs du gisement de l'Ouenza.

Pour le minerai du fer riche : FR1, FR2 et FR3 ; minerai du fer pauvre : FP1, FP2 et FP3 ; marne : M1, M2 et M3 et pour le calcaire : C1, C2, et C3

L'épaisseur de chaque échantillon est conditionnée par l'appareillage utilisé dans le laboratoire, l'épaisseur maximale admissible lors de la mesure est de 90mm, l'épaisseur de chaque échantillon est présentée dans le tableau IV.7

Tableau IV.7 Epaisseurs moyennes $\bar{x} \pm \sigma_x$ des échantillons.

Echantillon	X1	X2	X3	X4	$\bar{X}$	σ_x
FR1	2.54	4.52	3.96	3.32	3.58	0.85
FR2	2.1	3.06	3.6	4.32	3.27	0.93
FR3	1.87	3.16	2.5	1.6	2.28	0.70
FP1	1.81	2.46	2.97	2.99	2.55	0.55
FP2	2.67	2.73	2.03	1.5	2.23	0.58
FP3	2.9	2.58	2.08	1.81	2.34	0.49
C1	2.04	2.29	2.18	2.05	2.14	0.12
C2	2.01	1.85	1.05	2.22	1.78	0.51
C3	0.41	0.71	0.87	0.92	0.73	0.23
M1	2.39	1.81	2.33	1.72	2.06	0.35
M2	1.97	2.01	1.74	1.8	1.88	0.13
M3	2.42	2.54	3	3.21	2.79	0.37

$\bar{X}$: Moyenne arithmétique

σ_x : Ecart moyen à la valeur moyenne.

Sur la figure IV.14 sont présentées les granulométries des différentes catégories de minerais des stériles francs de l'Ouenza à analyser.



Figure IV.14 Echantillons du minerais de fer analysés.

IV.5. 2 Chaîne de mesure

En spectrométrie γ , une chaîne de mesure est constituée d'un détecteur, d'un préamplificateur, d'un amplificateur, d'un convertisseur analogique/numérique, d'une électronique d'acquisition et d'un logiciel d'analyse.

Au moyen d'une haute tension délivrée au détecteur, une quantité de charges électriques proportionnelle à l'énergie déposée par le photon dans le cristal est recueillie. Les porteurs de charge sont collectés en utilisant un préamplificateur de charge dont les fonctions sont la conversion de la charge en tension électrique et une première amplification. La mise en forme du signal et une seconde amplification sont réalisées par l'amplificateur.

L'analyse de l'amplitude de l'impulsion est réalisée par un analyseur multi-canaux. Le choix du nombre de canaux nécessaire pour l'acquisition dépend de la résolution du détecteur et de la plage d'énergie. Pour un détecteur GeHP, une haute résolution en énergie requiert généralement un codage sur 13 bits soit 8192 canaux ou 14 bits soit 16384 canaux pour couvrir une gamme d'énergie comprise entre 0 et 8 MeV.

Un PC d'acquisition, associé à un analyseur, enregistre l'énergie de l'événement en incrémentant le canal correspondant. Un spectre est ainsi collecté et analysé par le logiciel GENIE 2000 et présenté dans la figure IV.15. (Medhat, M. E 2016)

Pour pouvoir traiter le spectre obtenu, il est nécessaire de l'étalonner en énergie, c'est-à-dire de transformer le numéro du canal en énergie. Pour effectuer cet étalonnage, une source radioactive, dont les raies sont bien connues est utilisée. Ainsi, une loi de calibration est établie sous la forme d'une fonction polynomiale :

$$E_{\gamma} = a + bC + cC^2$$

où C : le canal,

a, b, c : des constantes.

Les mesures des différents échantillons des stériles francs à l'aide du spectromètre gamma contenant un détecteur NaI (TI) 300 montré sur le tableau IV.8 sert à déterminer des coefficients d'atténuation linéaires. Le signal obtenu du détecteur est amplifiée et enregistré par un Multi-Channel-Analyzer de type 16 k MCA. Les résultats de mesure sont communiqués à un ordinateur muni d'un logiciel de traitement de spectre Genie 2000 V3.2 (Medhat, M. (2012).

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

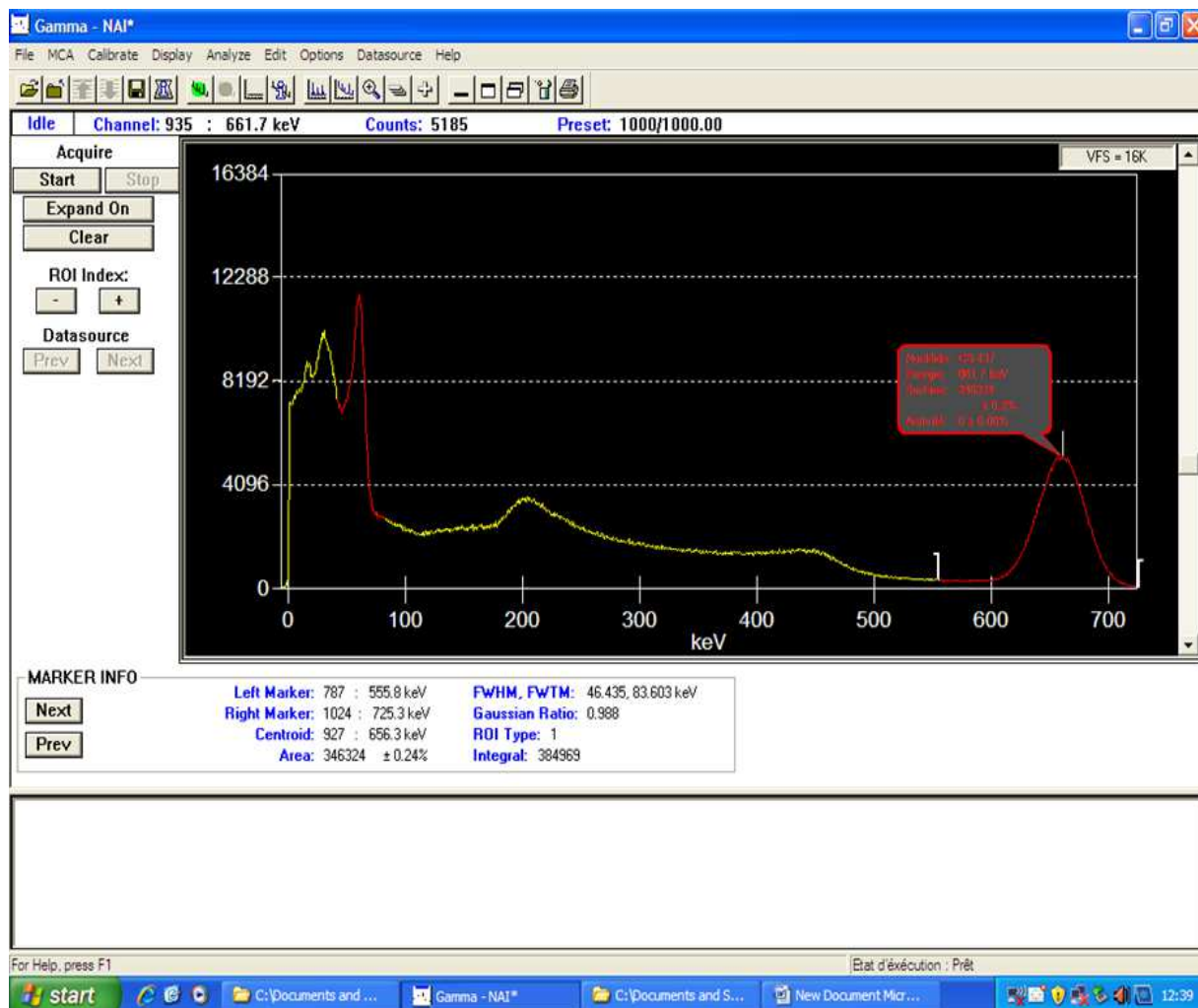


Figure IV.15 spectre analysé par le logiciel GENIE 2000.

Un exemple de calcul de coefficient d'atténuation μ pour l'échantillon du fer riche est présenté dans le tableau IV. 8 .

$$\text{Avec : } C_0 = \frac{\text{surface sans att}}{\text{Temps}}$$

$$\text{et } C = \frac{\text{surface att}}{\text{Temps}}$$

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

Tableau IV. 8 : Exemple de calcul de coefficient d'atténuation μ pour l'échantillon du fer riche.

E (KeV)	Ech	Xmoy (Cm)	delta Xmoy (Cm)	Surf sans att	Surf att	Temps (s)	C0 (CPS)	delta C0 (%)	C (CPS)	delta C (%)	log C0/C	μ (1/cm)	Segma (μ)	μ (cm ² /g)
121	FeR1	3,585	0,85	91378	18452	2000	45,69	0,51	9,23	2,30	1,60	0,45	0,11	0,09
244	FeR1	3,585	0,85	24192	10983	2000	12,10	1,51	5,4915	3,98	0,79	0,22	0,05	0,04
344	FeR1	3,585	0,85	46682	20235	2000	23,34	0,89	10,1175	2,23	0,84	0,23	0,06	0,04
661	FeR1	3,585	0,85	56452	26971	2000	28,23	0,66	13,4855	1,33	0,74	0,21	0,05	0,04
121	FeR2	3,270	0,94	76316	17511	2000	38,16	0,54	8,7555	1,98	1,47	0,45	0,13	0,09
244	FeR2	3,270	0,94	18806	8396	2000	9,40	1,66	4,198	4,12	0,81	0,25	0,07	0,05
344	FeR2	3,270	0,94	38766	19414	2000	19,38	0,89	9,707	1,67	0,69	0,21	0,06	0,04
661	FeR2	3,270	0,94	70028	43894	2000	35,01	0,6	21,947	0,93	0,47	0,14	0,04	0,03
121	FeR3	2,282	0,70	101338	28474	2000	50,67	0,49	14,237	1,38	1,27	0,56	0,17	0,11
244	FeR3	2,282	0,70	25774	9282	2000	12,89	1,44	4,641	3,86	1,02	0,45	0,14	0,09
344	FeR3	2,282	0,70	51457	24615	2000	25,73	0,78	12,3075	1,44	0,74	0,32	0,10	0,06
661	FeR3	2,282	0,70	87260	55902	2000	43,63	0,52	27,951	0,76	0,45	0,20	0,06	0,04

Le stand expérimental de mesure de laboratoire est montré dans les figures IV.16 et IV.17. La configuration expérimentale est importante car la géométrie du faisceau peut affecter le nombre de photons enregistrés en raison des processus de diffusion (I. Akkurt 2010). L'atténuation linéaire est étudiée pour les énergies suivantes : 122.78 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV émises par les sources ponctuelles l'euporium et le césium : 152Eu (122.78, 244, 344) KeV et 137Cs 661 KeV (Ferreira, T. R et al 2017).

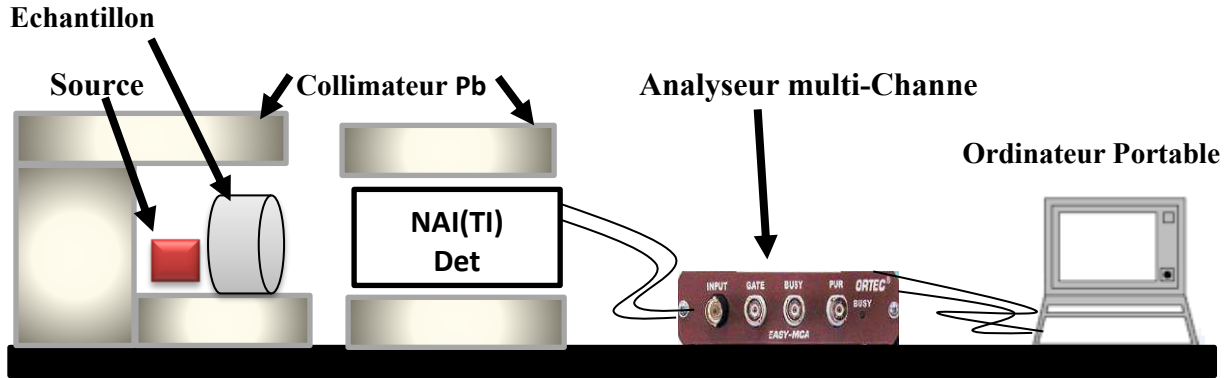


Figure IV. 16 Schéma du stand expérimental exploité durant les manipulations.



Figure IV.17 Stand expérimental exploité durant les manipulations.

Le coefficient d'atténuation $\mu \pm \sigma_\mu$ pour chaque échantillon tableau IV.9 possède une énergie donnée et est déterminé à partir des expressions (1) et (2).

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET ESSAIS DE VALORISATION DES STERILES FRANCS

Tableau IV. 9 Coefficient d'atténuation $\mu \pm \sigma_\mu$ des stériles francs du minerai de l'Ouenza.

Echantillon	Densité g/cm ³	Energie, KeV							
		121.78		244		344		661	
		μ	σ_μ	μ	σ_μ	μ	σ_μ	μ	σ_μ
FR1	4.9	0.446	0.106	0.202	0.0537	0.233	0.0558	0.206	0.0491
FR2		0.450	0.129	0.247	0.0718	0.211	0.0608	0.143	0.0410
FR3		0.556	0.170	0.448	0.138	0.323	0.0988	0.195	0.0597
FP1	3.7	0.113	0.0246	0.0972	0.0264	0.281	0.0614	0.198	0.0432
FP2		0.201	0.0527	0.0973	0.0289	0.132	0.0351	0.120	0.0315
FP3		0.308	0.0646	0.294	0.0638	0.243	0.0512	0.229	0.0481
M1	2.7	0.141	0.0242	0.0733	0.0189	0.0815	0.0155	0.0794	0.0140
M2		0.179	0.0133	0.222	0.0233	0.177	0.0151	0.0863	0.0757
M3		0.105	0.0147	0.107	0.0202	0.0942	0.0146	0.0876	0.0125
C1	2.8	0.270	0.0160	0.277	0.0246	0.250	0.0164	0.210	0.0126
C2		0.352	0.0101	0.289	0.0863	0.327	0.0946	0.228	0.0657
C3		0.275	0.0875	0.306	0.102	0.284	0.0913	0.229	0.0733

Les valeurs du coefficient d'atténuation μ obtenues du tableau IV.10, permettent de déterminer la moyenne pondérée $\bar{\mu} \pm \sigma_{\bar{\mu}}$ pour chaque type de minerai d'après les expressions suivantes.

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\sigma_{\mu_i}^2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_{\mu_i}^2}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\bar{\mu}} = \left[\sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_{\mu_i}^2} \right]^{-1/2} \quad (5)$$

Tableau IV.10 Résultats de calculs du coefficient d'atténuation linéaire total.

Echantillon	Fer riche		Fer pauvre		Marne		Calcaire	
Energie (KeV)	$\bar{\mu}$	$\sigma_{\bar{\mu}}$	$\bar{\mu}$	$\sigma_{\bar{\mu}}$	$\bar{\mu}$	$\sigma_{\bar{\mu}}$	$\bar{\mu}$	$\sigma_{\bar{\mu}}$
121,78	0.468	0.0738	0.148	0.0211	0.145	0.00913	0.272	0.0155
244	0.249	0.0410	0.114	0.0187	0.124	0.0119	0.279	0.0230
344	0.238	0.0380	0.188	0.0263	0.118	0.00868	0.253	0.0159
661	0.175	0.0278	0.165	0.0225	0.0854	0.00588	0.212	0.0122

Selon les résultats de calcul du coefficient d'atténuation linéaire total obtenus représentés dans le tableau IV.10, la valeur du coefficient le plus élevé est de fer riche avec une valeur de 121.78 KeV, par contre la valeur des coefficients pour le minerai de fer pauvre le calcaire respectivement dans l'énergie 244, 344KeV, enfin pour la marne elle a enregistré le plus faible coefficient dans l'énergie 661 KeV.

Les coefficients d'atténuation linéaire pour les différents types des stériles francs sont mesurés avec les énergies des photons équivalents à 121.78, 244, 344 et 661 KeV. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure IV.18.

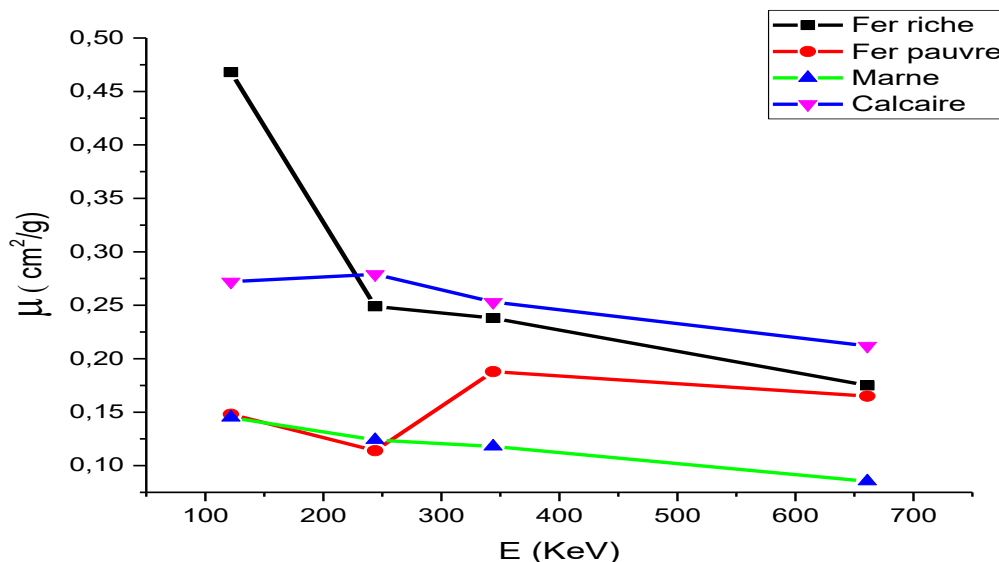


Figure IV.18 Variation du coefficient d'atténuation massique en fonction de l'énergie.

Il ressort clairement de la figure IV.18, que pour une énergie 121.78 KeV, une différence considérable entre le coefficient d'atténuation de minerais de fer riche et les autres catégories de stérile en fonction de l'énergie. La valeur μ pour le calcaire est de deux fois plus que les autres matériaux pour une énergie 244 KeV. Les deux produits restant (marne et fer pauvre) peuvent être séparés en dernier lieu avec une énergie de 344 KeV.

IV.5.3 Programme Xcom

Un programme informatique et une base de données sont présentés. Ils permettent de calculer, avec un ordinateur personnel, les sections efficaces de photons pour la diffusion, l'absorption photoélectrique et la production de paires, ainsi que les coefficients d'atténuation total, en tout élément, composé ou mélange, à des énergies allant de 1 keV à 100 GeV. (Berger et al. 2010) l'interface du programme Xcom est présentée dans la figure sur la figure IV. 19.

La présente expérience consiste à comparer le coefficient d'atténuation linéaire total dans les éléments : fer, silicium, calcium avec les différentes énergies pour clarifier la différence entre les éléments purs du tableau périodique. Les coefficients d'atténuation linéaire pour les différents éléments du tableau périodique : Fer, Silicium, Calcium sont mesurés avec les énergies des photons équivalents à 121.78, 244, 344 et 661 KeV. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.20.

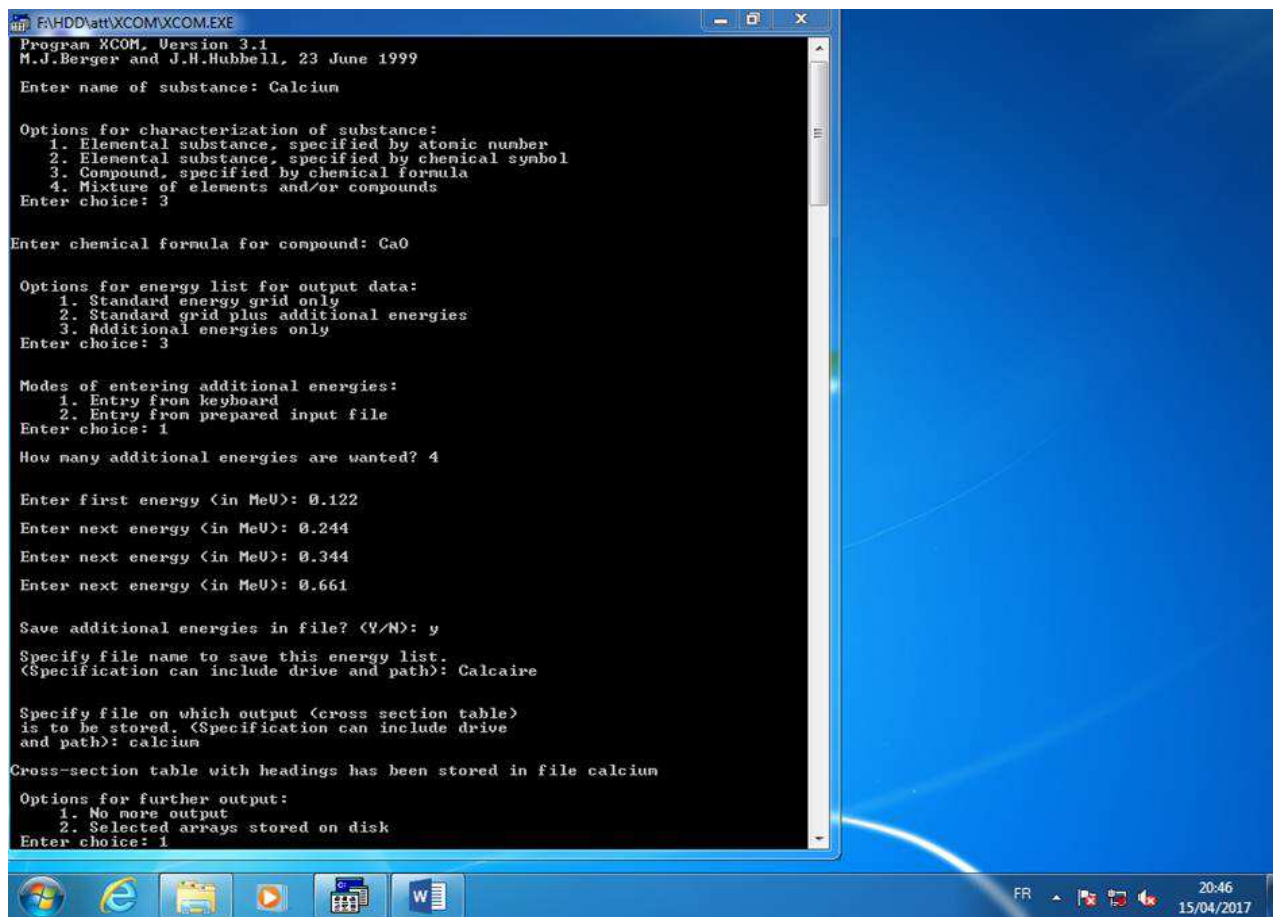


Figure IV.19 Interface du programme Xcom.

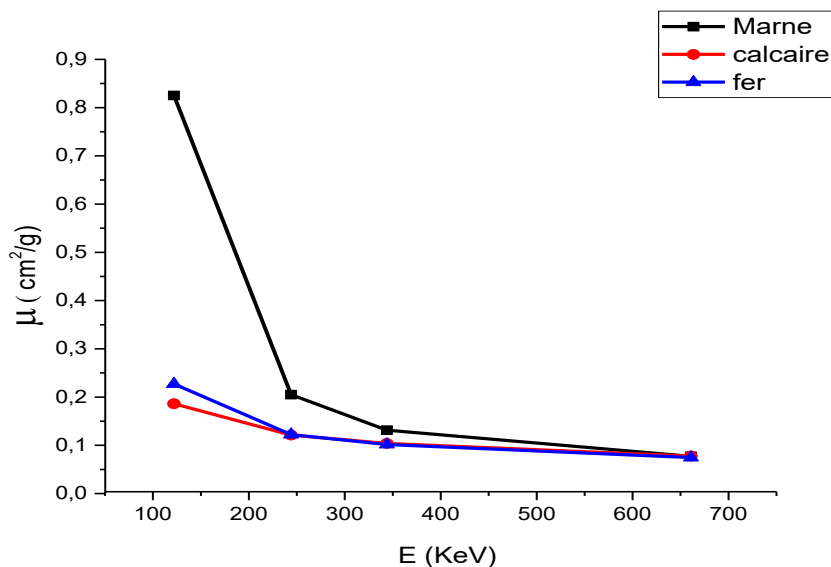


Figure IV.20 Variation du coefficient d'atténuation massique du Xcom en fonction de l'énergie.

Selon les résultats de calcul du coefficient d'atténuation linéaire total obtenus dans le tableau périodique des trois éléments : Calcium et silicium et fer, il ressort clairement que pour une énergie 121.78 KeV, une différence considérable entre le coefficient d'atténuation de fer et d'autres éléments en fonction de l'énergie.

III.5.4 Influence de l'épaisseur de l'échantillon sur le coefficient d'atténuation

L'épaisseur d'échantillon morcelé constitue un des facteurs principaux agissant sur le coefficient d'atténuation des rayons gamma (Azaryan, A. 2015; Kucuk, N et al . 2012), les valeurs de $\bar{\mu}$ est la somme des $\bar{x}$ de chaque échantillon pour chaque énergie sont représentés dans la figure IV.21.

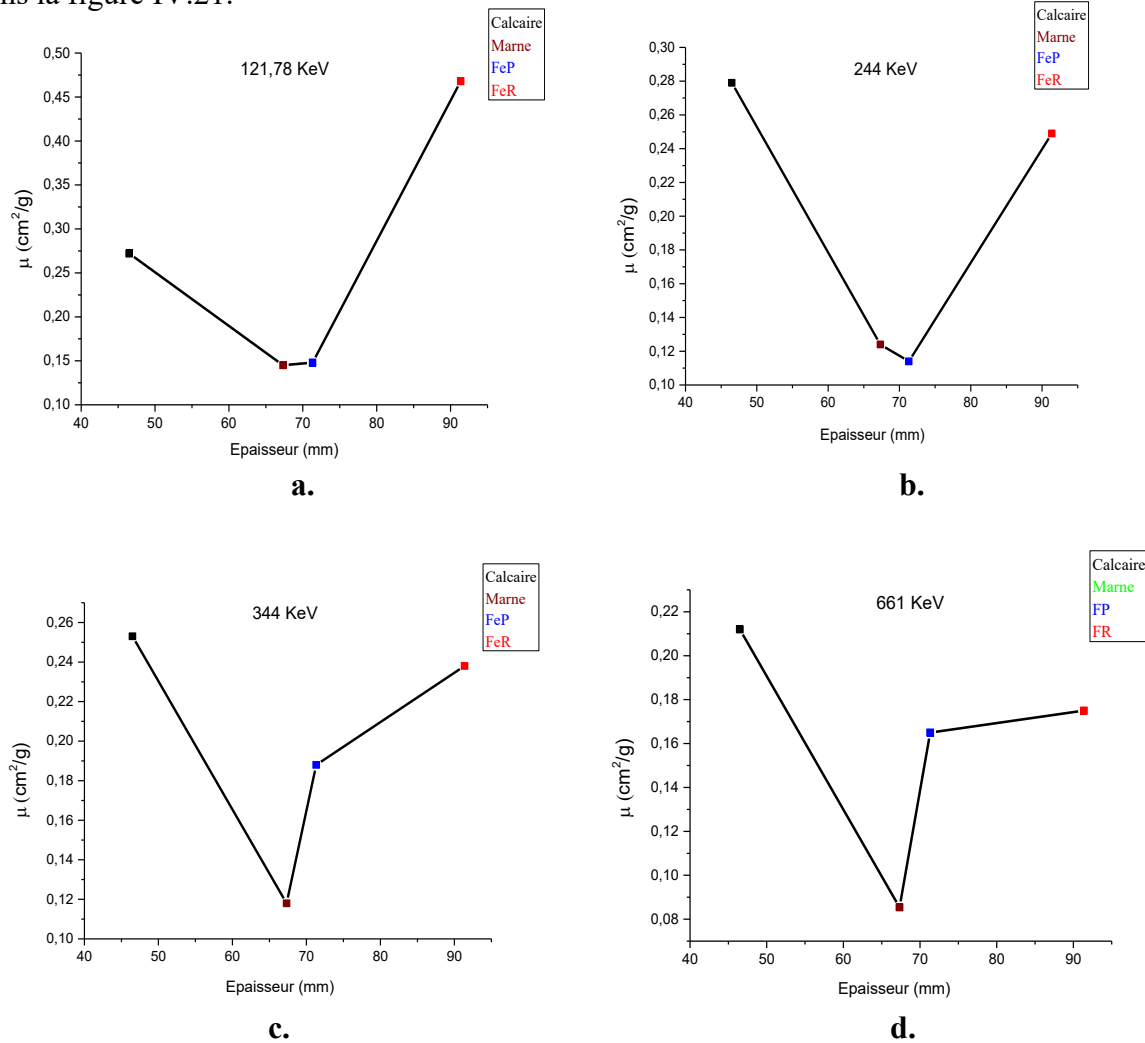


Figure IV.21 Représentation graphique de μ en fonction de l'épaisseur pour chaque énergie.

a - l'épaisseur en fonction de l'énergie 121,78 KeV; **b** - l'épaisseur en fonction de l'énergie 244 KeV; **c** - l'épaisseur en fonction de l'énergie 344 KeV; **d** - l'épaisseur en fonction de l'énergie 661 KeV.

Les coefficients d'atténuation en fonction de l'épaisseur des morceaux de minerai pour des énergies différentes sont représentés sur la figure IV.21, on voit que pour une épaisseur moyenne de 90 mm les valeurs du coefficient d'atténuation entre les différents matériaux sont importantes. Pour une source d'énergie Europium ¹³⁷, pour séparer le minerai de fer riche des autres catégories, on utilise une énergie de 121.78 KeV correspondant à $\mu = 0.45$ cm²/g. Dans le deuxième stade de séparation le calcaire des autres matériaux pour la même source d'énergie de même épaisseur on utilise une énergie de 244 KeV correspondant à $\mu = 0.25$ cm²/g. Enfin pour séparer le minerai de fer pauvre de la marne on utilise une énergie de 344 KeV correspondant à $\mu = 0.195$ cm²/g.

III.5.5 Influence de la teneur en fer sur le coefficient d'atténuation

La teneur du minerai de fer a un impact considérable sur le degré d'absorption des rayons gamma, c'est un facteur principal qui influe sur le coefficient d'atténuation des rayons gamma (Morkun, V., & Tron, V. 2014; Baştuğ, A et al 2010). Les valeurs de μ et les teneurs entre 32 % et 67 % de chaque échantillon pour chaque énergie sont représentés dans la figure IV.22.

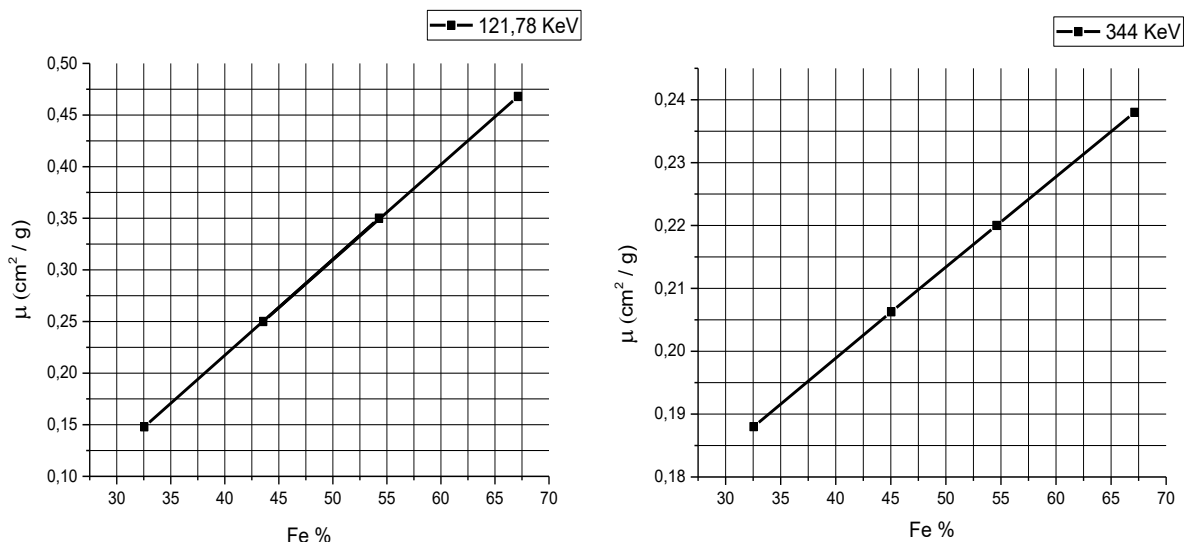


Figure IV.22 Influence de la teneur en fer sur le coefficient d'atténuation pour différentes énergies.

De la figure IV. 22 pour une énergie de 121.78 KeV avec un coefficient d'atténuation égal à 0.45 cm^2/g , on constate qu'on peut obtenir un concentré de fer de teneur 65% au premier étage de séparation. De même pour le minerai de fer pauvre, donc à partir d'une énergie égale à 344 KeV avec un coefficient d'atténuation égale à 0.195 cm^2/g on peut obtenir un concentré de teneur égale à 37.5% au deuxième étage de séparation. Ce dernier subira un traitement ultérieur profond après un broyage pour répondre aux exigences métallurgiques.

Par conséquent, le procédé de tri radiométrique par voie d'absorption des rayons gamma peut être appliqué les stériles francs de l'Ouenza.

Par conséquent, la méthode de tri radiométrique par absorption de rayons gamma peut être appliquée aux stériles de la mine de fer de Ouenza. Les étapes proposées pour la séparation des stériles sont présentées à la figure IV.23.

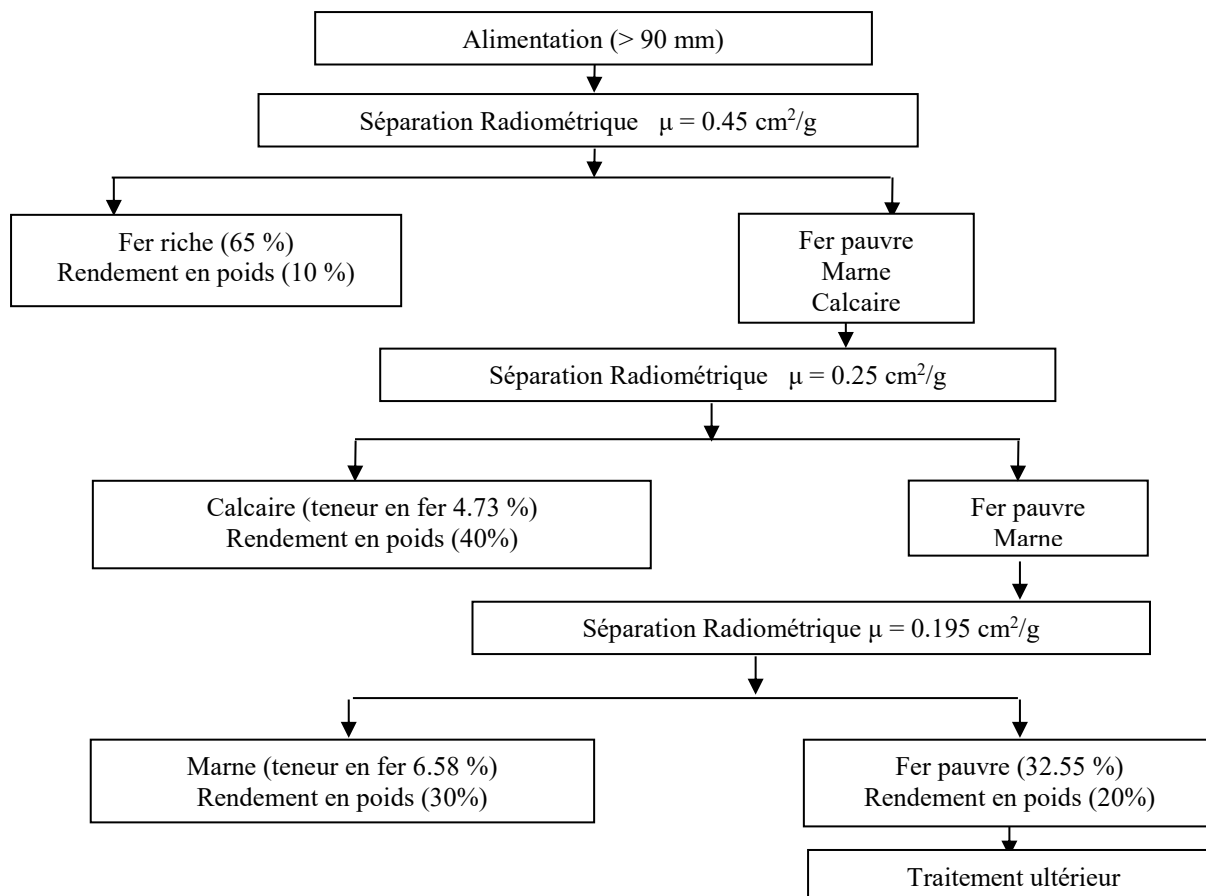


Figure IV.23 Schéma de séparation radiométrique proposé pour les stériles francs de la mine de l'Ouenza.

Conclusion :

- L'atténuation est étudiée pour les énergies 122 KeV, 244 KeV, 344 KeV et 661 KeV sont émises respectivement par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs .
- L'épaisseur de chaque échantillon est conditionnée par l'appareillage utilisé dans le laboratoire, l'épaisseur maximale admissible lors de la mesure est de **90 mm**.
- Les mesures des différents échantillons des stériles francs à l'aide du spectromètre gamma contenant un détecteur NaI (TI) 300 sert à déterminer des coefficients d'atténuation linéaires.
- Les coefficients d'atténuation en fonction de l'épaisseur pour des énergies différentes sont représentés sur la figure **IV.21**, on voit qu'une pour épaisseur moyenne de 90 mm les valeurs du coefficient d'atténuation entre les différents matériaux sont importantes.
- Pour une énergie de 121.78 KeV avec un coefficient d'atténuation égal à $0.45 \text{ cm}^2/\text{g}$, on peut obtenir un concentré de fer de teneur 65% au premier étage de séparation. Pour le minerai de fer pauvre, avec une énergie de 344 KeV avec un coefficient d'atténuation égal à $0.195 \text{ cm}^2/\text{g}$ on obtient un concentré de teneur égale à 37.5% au deuxième étage de séparation.
- Le procédé de tri radiométrique par voie d'absorption des rayons gamma peut être appliqué les stériles francs de l'Ouenza.

CHAPITRE V

EFFETS DES STERILES FRANCS SUR L'ENVIRONNEMENT

Introduction

En raison de sa structure géologique très variée, le sous-sol Algérien renferme de nombreux gisements miniers qui font l'objet d'exploitation et de valorisation (phosphates, minerais de fer, métaux précieux, substances utiles), conférant à ce secteur un rôle important dans l'économie nationale.

Cependant, l'exploitation de ces richesses n'est pas sans effet sur l'environnement et la santé des populations vivant dans les environs de ces sites. En effet, l'activité minière peut déséquilibrer les milieux naturels de plusieurs manières : par la transformation des paysages, le dépôt de déchets solides et le rejet d'effluents liquides et atmosphériques. Ce qui peut inévitablement porter préjudice à l'environnement et au cadre de vie des populations avoisinantes.

De nos jours, l'environnement est une préoccupation majeure pour des sociétés, l'audit environnemental apparaît donc comme un élément nécessaire aux entreprises pour améliorer leur rapport avec l'environnement et leur image publique.

V.1 Cadre législatif

-Loi n° 01 - 19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

-Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

- Loi n° 01-10 du 03 juillet 2001 portant la loi minière.

-Ordonnance n° 07-02 du 1er mars 2007 modifiant et complétant la loi n° 01-10 du 3 juillet 2001 portant loi minière.

-Loi n° 07-04 du 17 avril 2007 portant approbation de l'ordonnance n° 07-02 du 1er mars 2007 modifiant et complétant la loi n° 01-10 du 3 juillet 2001 portant loi minière.

-Décret exécutif n° 93-74 du 6 mars 1993 portant règlement général des exploitations des substances minérales.

-Décret exécutif n° 93-160 du 10 juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides industriels.

-Décret exécutif n° 93-161 du 10 juillet 1993 réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel.

-Décret exécutif n° 93-162 du 10 juillet 1993 fixant les conditions et les modalités de récupération et de traitement des huiles usagées.

-Décret exécutif n° 93-165 du 10 juillet 1993 réglementant les émissions atmosphériques de fumées, gaz, poussières, odeurs et particules solides, des installations fixes.

- Décret exécutif n°93-184 du 27 juillet 1993 réglementant les émissions de bruit.

- Décret exécutif n°03-410 du 05 novembre 2003 fixant les seuils limites des émissions de fumées, gaz toxiques et des bruits par les véhicules automobiles.

- Décret exécutif n° 06-02** du 7 Dhou El Hidja 1426 correspondant au 7 janvier 2006 définissant les valeurs limites, les seuils d'alerte et les objectifs de qualité de l'air en cas de pollution atmosphérique
- 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° 06-138** du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle
- **Décret exécutif n° 06-141** du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels
- **Décret exécutif n° 06-198** du 4 Joumada El Oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.
- Décret exécutif n° 07-144** du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
- Décret exécutif n° 07-145** du 2 Joumada El Oula 1428 correspondant au 19 mai 2007 déterminant le champ d'application, le contenu et les modalités d'approbation des études et des notices d'impact sur l'environnement.
- **Instruction n° 09** du 26/06/1986 relative à la protection de la santé des travailleurs exposés aux nuisances sonores (bruit).

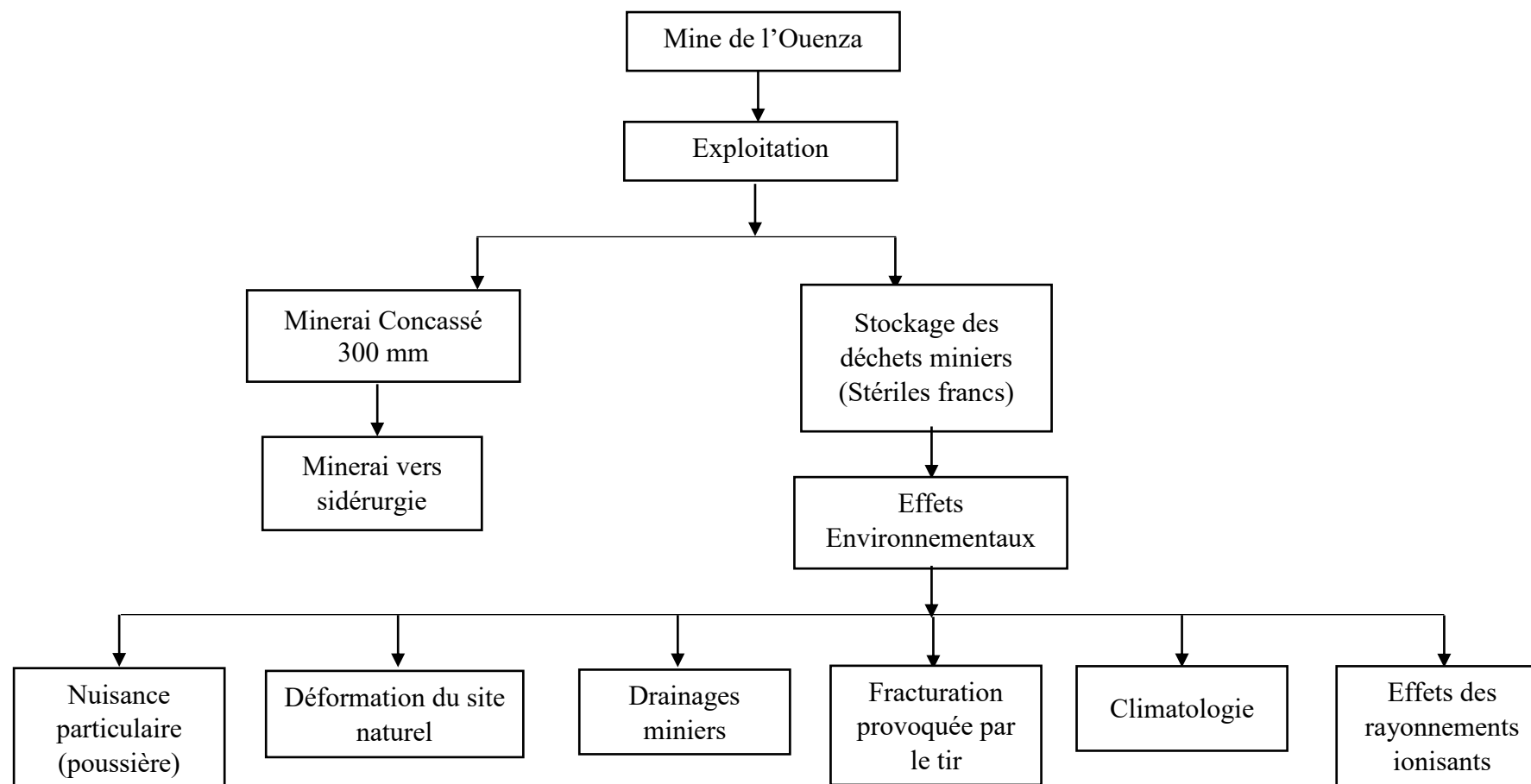


Figure V.1 Schéma des effets environnementaux causés lors de l'exploitation de la mine de l'Ouenza.

V.2 Historique de la mine de l'Ouenza

Les premiers travaux miniers avaient lieu dans la région de l'Ouenza à l'époque romaine où l'exploitation du Cuivre au niveau des Quartiers Douamis et Hallatif, comme l'atteste les vestiges encore existants sous formes de puits et de galeries. Cette activité minière se base sur l'exploitation du cuivre pendant les quatre premiers siècles de notre ère.

Aucune donnée originale n'a été signalée sur l'exploitation de minerais de fer pendant la période romaine ou médiévale (Aoudjehane et al., 1992).

Ce n'est que vers 1875 que le gisement de fer de l'Ouenza entre dans l'histoire minière moderne de l'Algérie, en passant par les étapes suivantes :

- En 1875, l'ingénieur des mines J. Tissot signale l'importance des affleurements des minéralisations de fer de l'Ouenza ;
- En 1878, le premier permis de recherche de fer dans la région de l'Ouenza accordé au prospecteur F. R. Pascal ;
- En 1895, les travaux de recherche minière ont été entamés sur l'ensemble de la région de l'Ouenza ;
- En 1901, le prospecteur F. R. Pascal obtient la concession de Djebel Ouenza, ce qui lui permettant de fonder une société d'exploitation ;
- En 1913, la constitution de la société de l'Ouenza a entamé les travaux préparatoires pour l'exploitation du gisement de fer de l'Ouenza ;
- En 1921, c'est le début de la mise en exploitation du gisement de fer de l'Ouenza ;
- En 1927, la société de l'Ouenza obtient la concession de la mine de Boukhadra ;
- En 1930, c'est le début de la mise en exploitation du gisement de fer de Boukhadra, avec la mise en service de la voie ferrée qui relie Boukhadra-Ain Chenia (Ouenza)-Oued Kebarit ;
- En 1939, électrification de la voie ferrée ;
- En 1949, la grosse mécanisation de l'exploitation minière de l'Ouenza ;
- En 1966, la nationalisation des sociétés minières en Algérie et la mise sous contrôle de l'activité minière de l'Ouenza par la SONAREM (société nationale de recherche et d'exploitation minière) ;
- En 1967, c'était le début d'aménagement des installations du SKIP pour un déblocage du minerai en provenance de la partie amont du gisement ;
- En 1983, restructuration de la SONAREM et création de l'EN FERPHOS (Entreprise Nationale du Fer et du Phosphate) ;
- En 1990, l'autonomie de l'entreprise publique EN FERPHOS ;
- En 2001, un premier contrat de partenariat avec une firme étrangère fût signé. Il s'agit d'une entreprise Indienne ISPAT. Ce partenariat s'est développé en 2006 avec l'accaparement des actions d'Arcelor par le groupe Mittal Steel détenteur de

l'entreprise indienne ISPAT. Une OPA qui donna naissance au groupe ArcelorMittal détenteur de 70% des actions de la mine de l'Ouenza contre 30% uniquement pour FERPHOS.

- En Octobre 2013, l'état Algérien a repris le contrôle de la mine en achetant 21% des actions d'ArcelorMittal dans la mine de l'Ouenza pour devenir majoritaire à hauteur de 51% et 49% pour ArcelorMittal.

Jusqu'à aujourd'hui, le gisement de fer de l'Ouenza constitue la principale source d'approvisionnement en minerai de fer du complexe sidérurgique d'El Hadjar situé à la wilaya d'Annaba où leur transformation conduit à l'élaboration de la fonte et l'acier répondant aux exigences de l'industrie sidérurgique moderne.

V.3 Déformation du site naturel

V.3.1 Glissements de terrains du quartier Zerga

La stabilisation de terrains constitue un des problèmes posés de longue date aux géotechniciens et aux gestionnaires de la mine de fer de l'Ouenza.

Sous l'effet des facteurs déclencheurs tels que des surcharges en amont du talus, sous forme des stériles francs stockés au hasard, l'effet de la sismicité due aux travaux de tir de mine et la présence de l'eau dans le massif composant le talus, ces facteurs pourraient être amenés aux déformations importantes inadmissibles. (Mostefaoui L. 2012)

L'exploitation à ciel ouvert se heurte à des sérieuses difficultés liées aux glissements de terrains. Parmi les plus importantes manifestations de glissements, nous avons celle du quartier Zerga, notamment les terrains situés au-dessus du corps minéralisé Nord-Zerga. Ces glissements ont mis en œuvre une surface globale de près de 40 000 m². Depuis plusieurs années se poursuivent des glissements successifs se prolongeant vers l'ouest, c'est à dire vers les installations de skip et vers les chantiers d'exploitation situés dans la partie du Chagoura Sud (Pic) et Chagoura-Nord, la continuation des glissements vers ces chantiers entraîne des retards dans l'exploitation. Vu l'ampleur de ces manifestations de glissements sur le quartier Zerga ; vu aussi que leur influence possible sur les autres chantiers de grande production des minerais et sur les voies d'accès, l'étude détaillée permettra de déterminer les causes et les risques des glissements et d'indiquer les mesures techniques à prendre afin d'assurer une meilleure exploitation dans toutes les dimensions du corps minéralisé.

V.4 Climatologie

Les conditions climatiques qui régissent la région de Tébessa favorisent une couverture végétale jugée limite et peu couvrante. On rencontre le pin d'Alep avec le genévrier phénicien couvrant le sol calcaire et localement le chêne kermès constituant de très belles forêts qui sont malheureusement en destruction. Ainsi l'Alfa qui ne pousse que sur les marnes et les grès qui sont localement exploités. Les alluvions ne permettent que des récoltes irrégulières de céréales. (Lazizi M., 2012).

La région d'Ouenza est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à faible pluviométrie. Un climat caractérisé par une période humide et très froide de l'automne à l'hiver et une période sèche et très chaude qui s'étend du printemps à l'été. La région

d'Ouenza ne possède pas de station météorologique. La station la plus proche se situe au nord, au niveau du barrage d'Ain Dalia à Souk Ahras, à environ 40 km à vol d'oiseau.

Le climat qui prévaut dans la région de Souk Ahras est complètement différent de celui de la région d'Ouenza ce qui pose problème avec les données et leurs représentativité.

Pour cela nous avons eu recours aux données de la région de Tébessa (Figure V.2) qui est à environs 90 km au Sud. Elle a un climat qui est plus proche de celui de la région d'Ouenza.

La région connaît des précipitations d'une moyenne annuelle de 540 mm et une température moyenne maximale de l'ordre de 40.5°C.

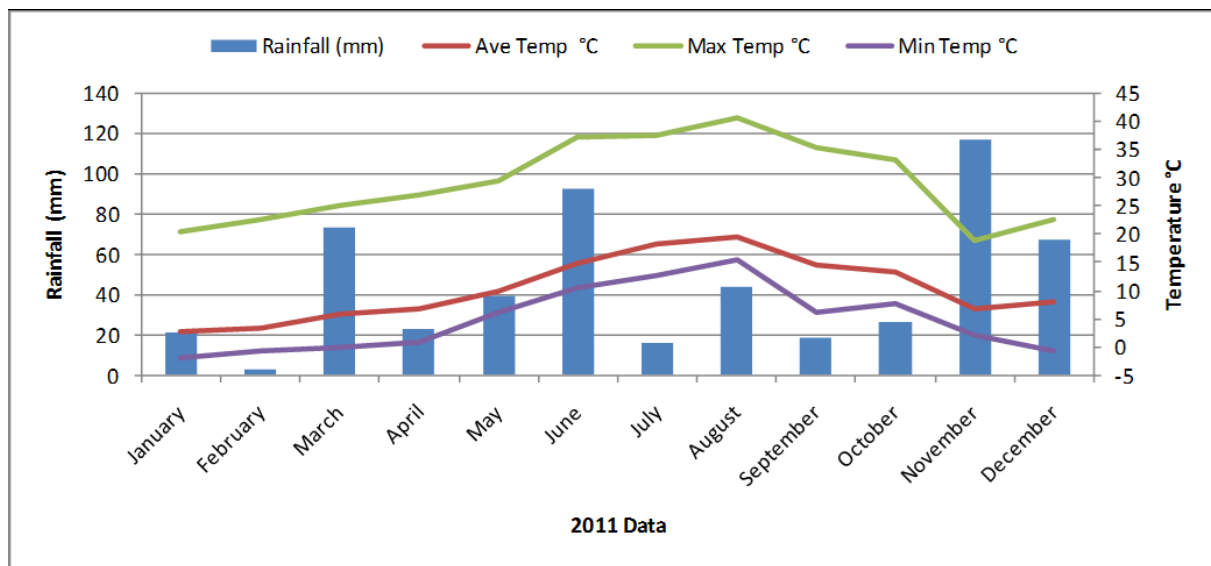


Figure V.2: Histogramme des précipitations et températures annuelles (Année 2011).

V.5 Nuisance particulaire (poussière)

V.5.1 Définitions et caractéristiques des poussières

V. 5.1.1 Définition générale des poussières

Les poussières correspondent aux particules se trouvant dans l'air et dont le diamètre est inférieur à 1 000 microns (μm). Elles sont naturellement présentes dans l'atmosphère et peuvent être (Babel M., 1996) :

- d'origine naturelle : résultat de l'action du vent (grains de sable et de limon provenant de l'érosion éolienne, embruns composés de chlorure de sodium, pollens, spores, etc.) ;
- issues de l'activité humaine : transport, chauffage, agriculture (moissons), industrie, dont l'exploitation des carrières.

Une partie des poussières, les particules secondaires, se forme dans l'air par réaction chimique à partir de polluants précurseurs comme les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, l'ammoniac et les composés organiques volatils.

V.5.1.2 Définition des poussières dans le domaine des granulats

Différence entre aérosol, poussière, fine, filler et sable. Un aérosol est un ensemble de particules, solides ou liquides, de diamètre inférieur à 1 micron, en suspension dans un milieu gazeux. Issus de l'érosion, naturelle ou anthropique, ils interviennent à l'échelle planétaire et locale dans les phénomènes de pollution de l'air.

Dans l'industrie du granulat, le terme de « poussière » s'applique à des particules solides, inertes, non hydrosolubles, de diamètre compris entre 0 et 40 microns (Piédoue, 1996). Le terme de poussière est parfois remplacé par celui de « fines » pour les éléments de diamètre inférieur à 80 µm qui correspond à la coupure basse du sable.

Le terme de filler, quant à lui, correspond à des « fines » commercialisables entrant dans la composition d'enrobés ou de béton ou pour la préparation de certains sables (Piédoue, 1996). La défillérisation est une technique qui consiste à extraire d'un produit la tranche granulométrique comprise entre 0 et 80 microns.

Les termes poussières, fines et particules seront employés indifféremment dans ce document pour caractériser les éléments inférieurs à 80 µm.

V.5.1.2.1 Bruit de fond et le fond continu

En l'absence de toute émission de poussières en provenance du site étudié, l'air contient naturellement des particules en suspension appelées aérosols, complétées par les poussières issues d'autres activités (poussières de combustion, de circulation...) qui forment un bruit de fond.

Lors du fonctionnement des activités du site, des poussières sont rejetées dans l'atmosphère où elles restent en suspension. Elles augmentent le bruit de fond naturel au droit de la carrière et dans les environs pour former le fond continu.

Si l'industriel cherche à maîtriser les poussières issues de son activité, le riverain est sensible à l'ensemble des poussières qu'il reçoit : c'est le cumul des impacts.

V.5.1.2.2 Les caractéristiques des poussières

La tendance naturelle des poussières à se libérer et à se mettre en suspension est directement liée à la nature du matériau (alluvionnaire, éruptif, calcaire). Mais elle dépend également de la teneur en humidité qui sera plus ou moins importante selon que le matériau sera naturellement hydrophobe ou hydrophile.

De même, la forme peut influencer sur l'envol et la vitesse de sédimentation. Les poussières vont donc être caractérisées par leur nature et leur granulométrie. Ces deux paramètres vont commander leur comportement dans l'air et leur nocivité sur l'homme.

Le tableau V.1 ci-dessous répertorie les distances parcourues par des particules minérales en fonction de la vitesse du vent, à partir d'un point d'envol pour un stock de granulats d'une hauteur de 15 m.

Tableau V.1 Distances parcourues par des particules minérales (Piédoue 1996).

Taille des particules	200 μm	100 μm	30 μm	10 μm	5 μm	1 μm
Vent à 10 km/h	0,03 km	0.15 km	0.6 km	14 km	42 km	140 km
Vent à 30 km/h	0.1 km	0.4 km	1.8 km	40 km	125 km	4165 km

De même, le graphique figure V.3 suivant indique la distance parcourue par des particules tombant d'une hauteur de 9 m.

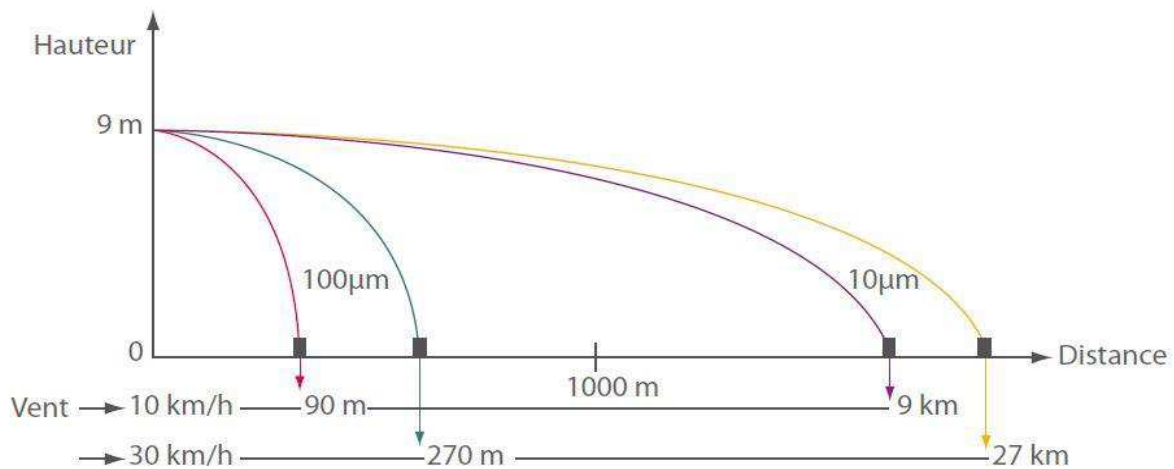


Figure V.3 : Influence du vent sur la propagation des poussières.

Ces données restent théoriques pour les zones proches du sol, car les vents ne sont jamais parfaitement laminaires à cause des obstacles (arbres, constructions, topographie...). Ainsi sur un site de carrière, les obstacles (reliefs, bâtiments, stocks) dévient les lignes de courant renforçant localement les vitesses et donc la capacité d'entraînement. A contrario, après l'obstacle, la vitesse diminue et les particules s'accumulent au sol comme présenté dans la figure V.4

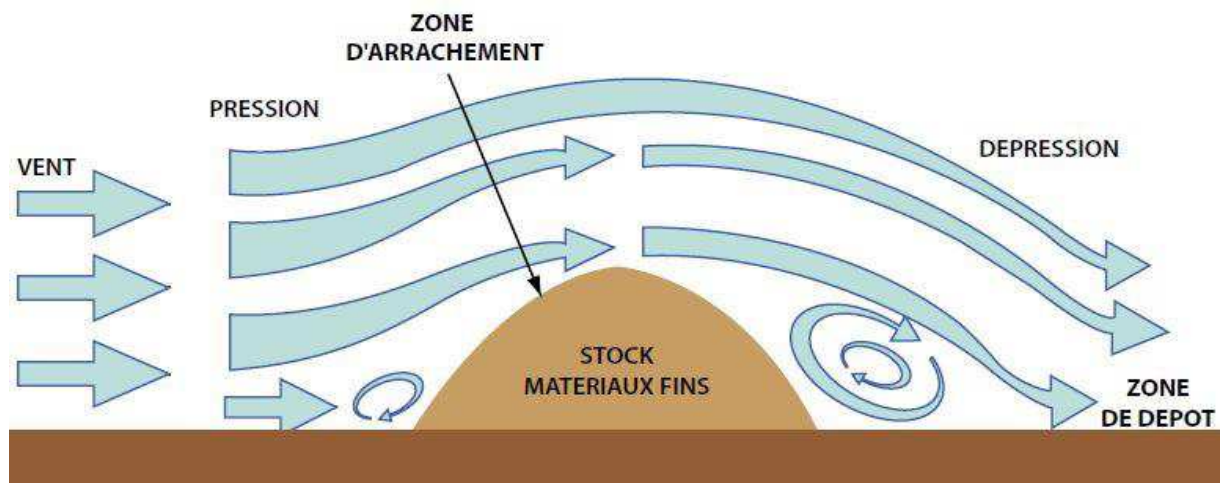


Figure V.4 Modification du vent par un stock de matériaux.

V.5.3 Importance des différentes sources de poussière

De façon globale, les différentes activités peuvent être classées en fonction des quantités de poussières produites, sont présentés dans le tableau V.2.

Tableau V.2 Classement des activités en fonction de leur importance.

Sources d'émission modérée	Sources d'émission importante	Sources d'émission très importante
Décapage	Transport par verse	Circulation des engins et tombereaux en carrière
Foration	Stockage/déstockage	
Minage	Évacuation des matériaux	Concassage
Transport par convoyeur		Criblage
Lavage		

Une étude INEIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) réalisée en 1998 a permis d'observer des concentrations allant de 1 à 10 mg/m³ et celles mesurées à proximité des points de stockage des produits fins pouvaient atteindre 100 mg/m³. L'étude de (Balon P. 1998) indique que les émissions les plus importantes sont liées aux activités ayant trait au roulage, aux opérations de concassage et à celle de criblage.

Le tableau V.3 ci-dessous propose un classement des grandes étapes de fabrication des granulats en fonction de la masse de poussières produites :

Tableau V.3 : classement des grandes étapes de fabrication des granulats (Campanac et al. 1990).

Masse de production de poussières inférieure à 0,1 g/h/m ³	Masse de production de poussières comprise entre 0,1 g/h/m ³ et 1 g/h/m ³	Masse de production de poussières supérieure à 1 g/h/m ³
• Extraction des roches • Concassage primaire • Aire de stockage	• Convoyeurs à bande • Stock de sable	• Installations secondaires et tertiaires

V.5.4 Analyse par secteur

V.5.4.1 Décapage de la découverte

Cette opération a pour but de mettre à nu le gisement à extraire, par retrait des couches superficielles. La découverte est constituée par la terre végétale, les roches plus ou moins altérées et les niveaux stériles. Les travaux sont faits de façon sélective pour bien séparer la terre végétale des stériles. Ces deux horizons serviront à la remise en état du site, après exploitation (Blanchard O., 1997).

Dès le retrait de la couverture végétale, le vent peut entraîner les matériaux les plus fins. De même les différentes manipulations sont susceptibles de libérer des fines.

Les stocks de matériaux : terre végétale et stériles peuvent constituer des sources d'envol de poussière. Cette source est ponctuelle, limitée dans l'espace et dans le temps, les quantités sont relativement peu importantes. Les facteurs aggravants sont le temps sec et

venteux et la siccité (État de ce qui est sec. La siccité s'exprime en pourcentage pondéral de la masse sèche par rapport à la masse totale) naturelle de la roche.

V.5.4.2 Extraction des matériaux

V.5.4.2.1 Exploitation des roches massives

Le matériau exploité est cohérent et l'extraction est réalisée à l'aide de tirs de mines.

Cette étape comprend la foration des trous destinés à recevoir les mines et l'abattage du matériau à proprement parler. L'importance de l'émission de poussières est variable en fonction de la méthode de tir et du type de gisement (CRAMAM 1985).

V.5.4.2.2 Foration

Des trous verticaux d'une quinzaine de mètres de profondeur et d'une dizaine de centimètres de diamètre sont réalisés par une foreuse qui travaille par percussion ou rotation. La roche est broyée : environ 20 % du volume de roche sont transformés en poussière. Les fragments sont évacués à l'extérieur du trou par circulation d'air comprimé (avec ou sans dépoussiéreur).

Cette source est semi-permanente, les émissions sont assez bien maîtrisées par l'installation de dépoussiéreur sur les foreuses actuelles (figure V.5). Les fines récupérées sont comprimées et posées au sol où elles restent susceptibles de s'envoler par grand vent ou lors du tir.

Les facteurs aggravants sont liés à la friabilité et la siccité de la roche ainsi qu'à la position des foreuses en secteur exposés aux vents (Sairanen M.2018)



Figure V.5 Foreuse avec tête aspiratrice.

V.5.4.2.3. Tirs

L'abattage se fait à l'aide d'explosifs introduits dans les trous forés. Au moment de l'explosion, il se produit une fragmentation importante de la roche en un temps très court, donc un nuage de poussières conséquent mais assez vite dispersé (figure V.6). Il faut remarquer que ce nuage est en majorité constitué par le soulèvement de poussières présentes sur le sol et remises en suspension par le souffle de l'explosion.

Il s'agit d'une source ponctuelle avec une fréquence variable selon l'organisation de l'exploitation (Hu, S., et al., 2016)

Le vent et l'état de dessiccation sont des facteurs aggravants.



Figure V.6 Nuage de poussières consécutif à un tir de mine.

V.5.4.3 Déplacement des matériaux

V.5.4.3.1 Utilisation d'une verse

Dans les régions à fort relief, certaines entreprises, pour éviter de faire circuler des tombereaux sur des terrains abrupts, utilisent une verse pour faire descendre les matériaux jusqu'au carreau. La gravité est alors l'agent de transport.

Les matériaux chutent par gravité, les poussières contenues dans la masse des matériaux sont libérées, d'autres poussières sont produites par attrition au sein des matériaux en mouvement.

Cette source est semi-permanente puisque les matériaux ne sont pas placés dans la verse lorsque les engins prélèvent des matériaux en pied de verse.

Facteur aggravant : la hauteur de chute et l'exposition aux vents peuvent aggraver la diffusion de la nuisance (Basta N. T., et al., 2015).

Il est donc recommandé de fonctionner à verse pleine : les matériaux sont déposés sur le sommet de l'éboulis formé par la verse.

Dans ces conditions, les poussières restent modérément importantes.

V.5.4.3.2 Transport des matériaux par tombereaux

Deux sources de poussières sont reconnues :

- la circulation des engins et des tombereaux sur les pistes et le carreau provoquent l'érosion du sol par frottement de la roche et l'envol des poussières préalablement déposées (attrition) (figure V.7);
- les matériaux transportés sont en général relativement grossiers et, de ce fait, peu sensibles à la déflation (Entraînement éolien de matériaux fins et secs.). Néanmoins, les pistes mal entretenues entraînent des secousses et des heurts qui peuvent favoriser la formation et l'envol des poussières (Aigbedion I., et al., 2007)



Figure V.7 Poussières soulevées par la circulation de l'engin.

Cette source est semi-permanente : elle est fonction du nombre d'engins et de tombereaux qui circulent sur le site. La circulation des engins participe de façon importante à l'empoussièrement général de l'exploitation.

Cette émission de poussières est très diffuse. Elle peut devenir conséquente dans le cas du va-et-vient des tombereaux pour alimenter la station de traitement à un rythme soutenu.

Les facteurs aggravants sont le temps sec et venté, la vitesse des tombereaux, le mauvais état des pistes.

V.5.4.3.3 Transport des matériaux par convoyeurs à bande

Les convoyeurs à bande sont utilisés :

- dans certaines exploitations pour faire transiter les matériaux extraits jusqu'aux unités de transformation ;
- systématiquement pour assurer le déplacement du matériau au sein de l'installation de traitement.

Les matériaux sont placés sur la bande (par un concasseur, un broyeur, un crible, une trémie, etc.), la zone d'alimentation du convoyeur, puis ils sont entraînés tout le long du parcours du

transporteur par traction de la bande. Le passage - ou chute - des matériaux d'une bande à une autre correspond au point de transfert. La destination finale des matériaux est un stockage en trémie ou au sol. À cette étape du transport, les granulats chutent à partir de l'extrémité du convoyeur jusqu'au niveau de leur point de stockage (Gao G., et al., 2018).

L'émission de poussières est due essentiellement au brin de retour de la bande. Lorsque les matériaux transportés sont légèrement humides, les particules les plus fines adhèrent à la bande ; lorsqu'elles sèchent, elles tombent et se dispersent essentiellement au niveau des rouleaux supports de la courroie transporteuse.

Lorsque la bande est brossée ou raclée, le point de nettoyage doit être protégé des risques d'envols depoussière. Il y a peu d'émissions de poussières au niveau du convoyeur, surtout si les matériaux sont humidifiés sur bande lors d'une rupture de charge et/ou si les tapis sont protégés par un capot (figure V.8). Cette source est quasiment permanente, durant la période quotidienne d'exploitation.



Figure V.8 : Convoyeur capoté.

V.5.4.4. Traitement des matériaux par concassage

V.5.4.4.1 Opérations de concassage

La première étape de l'élaboration des granulats est la réduction des matériaux bruts. Selon le taux de réduction désiré, les matériaux sont fragmentés dans différents concasseurs et broyeurs afin d'obtenir des produits de diamètre spécifique correspondant aux différentes classes granulométriques recherchées par la clientèle ou permettant des opérations de traitement ultérieures. La fabrication des minerais à partir de roches massives nécessite toujours plusieurs opérations de concassage (figure V.8). Ces opérations libèrent des particules fines (Ali W., et al., 2017)

Le concassage et le broyage produisent des fines susceptibles de s'envoler, les pièces en mouvement et la ventilation des appareils (refroidissement) sont également des sources d'envols de poussières.



Figure V.8 : Alimentation d'un concasseur.

Le concassage constitue une source permanente de poussières (pendant les heures de fonctionnement de l'exploitation) ; l'importance est variable selon le type de concasseur et selon sa position dans la chaîne de traitement : un broyeur tertiaire produit plus de fines que le concassage primaire.

V.5.4.4.1.1 Facteurs aggravants

Au niveau du concasseur giratoire, il peut y avoir un effet de cheminée entraînant une dispersion importante de poussières lors de la chute des matériaux broyés. Cet effet est produit par les ouvertures de socle des concasseurs, quand ceux-ci sont disposés au-dessus du niveau du sol.

V.5.4.5 Stockage et la livraison

V.5.4.5.1 Mise en stock

Lors du transport lui-même, des émissions de poussières sont possibles, le déplacement d'air lié à la vitesse de circulation provoquant les envols. Le déversement des matériaux fins depuis la benne d'un tombereau émet des poussières importantes (Stovern M., et al., 2014)

La répétition des opérations de stockage/déstockage rend cette opération quasi permanente. Le vent fort renforce la sensibilité aux poussières.

V.5.4.5.2 Stocks

Une fois réduits, traités et classés, les granulats sont acheminés vers des aires de stockage, où ils forment des tas individualisés. Ils peuvent également être placés dans des trémies (ouvertes) ou silos (enceintes fermées employées pour des produits plus pulvérulents).

Les matériaux peuvent alors être livrés par camions, trains ou barges. Ils peuvent également être transformés sur place en cas de présence sur le site d'une centrale à béton, d'une centrale de graves ou d'une centrale d'enrobage (Gonzales P., et al., 2014)

Les matériaux stockés peuvent être affectés par les vents, et surtout les plus fins, une partie de la production se transformant en poussières. La sécheresse et la chaleur vont conduire à un assèchement des produits et les rendre plus facilement mobilisables.

Les trémies restantes ouvertes au sommet, une perte de matériaux par déflation est possible. Les silos sont fermés mais, lors du remplissage du silo, l'air contenu dans le silo est chassé et entraîne des fines. Les événements sont donc classiquement équipés de filtres.

Cette source de poussières est permanente, même en dehors des périodes d'activité. Le rôle des vents est important, la position des stocks de produits fins doit donc intégrer la direction des vents dominants.

V.5.4.5.3 Chargement des matériaux pour l'expédition

La chute des matériaux depuis l'engin de chargement dans le véhicule de transport (benne, wagon, barge) est une source d'envol de poussières d'autant plus que les matériaux manipulés sont fins et secs et que l'opération est soumise aux vents.

V.5.4.5.4 Facteurs aggravants

- vitesse du véhicule ;
- nature du matériau ;
- granulométrie du matériau transporté ;
- degré d'hygrométrie du chargement ;
- état des voies de circulation.

V.5.4.5.5 Remise en état du site exploité

Les différentes couches de matériaux séparés lors des travaux de découverte sont stockées en vue du réaménagement du site. La terre végétale et les stériles peuvent être stockés sous forme de merlons de quelques mètres de hauteur environ (une hauteur maximale de 3 m est retenue pour la terre végétale afin de limiter les phénomènes de compaction qui altèrent ses qualités agronomiques, cette terre étant végétalisée pour maintenir une vie biologique et optimiser la qualité de la remise en état) (Djebbi C., et al., 2017)

La remise en état des carrières s'effectue progressivement tout au long des phases d'exploitation jusqu'à la fermeture du site. Elle est définie par l'étude d'impact et précisée dans l'autorisation d'exploitation avant même l'ouverture du site.

Il existe différents types de réaménagements possibles selon la nature de la carrière (en eau, à flanc de coteau...) et selon l'environnement dans lequel s'inscrit l'exploitation (milieu rural ou urbain). Des bases de loisirs, des zones d'habitation, des zones naturelles peuvent voir le jour sur des sites d'anciennes carrières. Il s'agit d'une source ponctuelle relativement peu importante.

V.5.5 Facteurs influençant l'empoussièrément

Indépendamment des techniques d'extraction et de traitement des matériaux, de nombreux facteurs peuvent influencer sur l'émission, la mise en suspension et le déplacement des poussières dans l'atmosphère et dans l'environnement proche de la carrière.

V.5.5.1 Facteurs favorisant la formation des poussières

V.5.5.1.1 Friabilité de la roche exploitée

Quand une roche est tendre, la formation de poussières est facilitée. La tendance naturelle des poussières à se libérer et à se mettre en suspension est donc directement liée à la nature du matériau : calcaire, marne, craie, sable...

Quand une roche est dure, le traitement devra être particulièrement intense pour obtenir les granulométries attendues. Les poussières seront émises au niveau des installations de traitement (Ekengoue C. M., et al., 2018)

V.5.5.1.2 Etat de dessiccation de la roche

Plus la roche est sèche, plus son traitement générera de la poussière. En effet, entre l'eau et les éléments minéraux se crée une force (tension superficielle pour des grains de sable - liaisons électrostatiques pour les argiles) qui les lie entre eux et apporte la cohésion à l'ensemble.

L'intensité des forces mises en jeu est variable selon la nature des matériaux et le chimisme de l'eau.

Certaines roches sont plus sensibles à la présence d'eau et, de ce fait, résistent mieux à la dessiccation (marnes, argiles).

V.5.5.2 Facteurs influençant la dispersion des poussières

V.45.5.2.1 Granulométrie des poussières émises

La granulométrie a une influence sur la mise en suspension et sur la sédimentation des poussières dans l'environnement (Foqué D., et al., 2017)

Plus les particules ont un petit diamètre, plus elles sont susceptibles d'être mises en suspension dans l'air et plus longtemps elles y resteront.

V.5.5.2.2 Forme de la poussière

Elle peut favoriser l'envol et/ou diminuer la vitesse de sédimentation d'une particule : une particule plate a le même comportement qu'une feuille pendant sa chute et se déposera donc plus lentement qu'une particule sphérique. La vitesse de chute est fonction du diamètre aérodynamique.

V.5.5.2.3 Conditions météorologiques

Les conditions atmosphériques (vent, sécheresse et précipitations) jouent un rôle majeur dans l'empoussièrément d'une exploitation. Elles interviennent principalement sur :

- la dessiccation des matériaux ;
- le déplacement des poussières, y compris par reprise de poussières sédimentées ;
- la formation de boues qui, en séchant, forment des poussières.

Les conditions extrêmes de dispersion des poussières sont :

- un terrain plat ;

- l'absence d'écran végétal ;
- une hygrométrie et des précipitations faibles ;
- un vent fort.

V.5.5.2.4 Vent

Les effets produits par l'action des vents sont très importants puisque, comme on l'a vu précédemment, ce sont eux qui vont provoquer, pour une part importante, l'envol des particules et surtout leur transport aux alentours des installations.

Le rôle des vents est fonction de la fréquence, de sa force, de sa direction et de la présence ou non de turbulence (Nicoleta-Maria M. 2016).

La direction des vents dominants varie avec la saison, tout particulièrement en bord de mer.

Les effets du vent peuvent se faire sentir sur de grandes distances. Ainsi, périodiquement.

La configuration des lieux peut guider les vents selon une direction privilégiée où un couloir de dispersion entraîne les poussières relativement loin (plusieurs kilomètres).

Les facteurs déterminants seront donc la position des appareils générateurs de poussières, les modes de constitution, les formes et les orientations des stocks par rapport aux vents dominants.

Pour un site donné, ce sont eux qui détermineront l'importance et l'étendue de la zone soumise à l'empoussièrement. Une particule de 30 microns tombant d'une hauteur de 15 m parcourra une distance de 1 800 m avec un vent de 30 km/h.

Tout déplacement des masses d'air, qu'il soit naturel (sens et force des vents) ou artificiel (ventilation des broyeurs), provoque une part importante de l'envol des poussières et leur transport à l'extérieur du site. Ainsi, le vent provoque :

- la dessiccation du matériau et réduit donc l'adhérence des éléments les plus fins à un support
- la remise en suspension des fines déposées au sol et sur les matériaux en traitement dans les parties de l'installation à l'air libre ;
- le transport par entraînement des fines.

V.5.5.2.5 Sécheresse

Un temps sec limite la présence d'eau et favorise la remise en suspension des poussières sous l'action du vent ou des passages de véhicules. D'une façon générale, les niveaux d'empoussièrement près des installations de traitement en plein air sont plus importants en période sèche (été) qu'en période humide (hiver). Plus que l'absence de précipitations, c'est la durée des périodes sèches qui est un facteur déterminant (Liu, A., et al., 2018).

Cette dispersion des poussières est directement liée à la granulométrie des particules :

- les grosses particules sont les plus affectées par les variations de conditions météorologiques. Quand la force du vent augmente, le taux des grosses poussières dans l'air augmente ;

- à l'inverse, la concentration des poussières fines (diamètre inférieur à 1,5 micron), en suspension dans un rayon de 2 km sous le vent d'un site, est sensiblement constante, quelles que soient la distance et la vitesse du vent. En effet, la granulométrie faible de ces poussières ne leur permet pas de sédimenter et elles restent soumises aux vents. Elles se comportent alors comme des aérosols gazeux (BRGM, 1989).

En période hivernale, les systèmes d'aspersion sont soumis au risque de gel. Ils ne sont donc pas activés et laissent les envols se faire.

V.5.5.2.6 Précipitations

Les précipitations humidifient le matériau et font tomber les poussières dispersées dans l'atmosphère aux alentours de l'exploitation. Selon leur fréquence et leur intensité, elles contribuent plus ou moins à limiter la dispersion des poussières. De même, le brouillard est composé de gouttelettes en suspension qui piègent les particules.

Cependant, les eaux qui entraînent les fines les déposent, constituant des boues qui en séchant vont créer des points d'émission potentielle de poussières.

V.5.5.2.7 Implantation géographique du site

L'implantation géographique d'un site aura évidemment une incidence sur l'émission de poussières, comme c'est le cas pour les régions du sud et du sud-est de la France qui ont un climat sec et venteux.

Les exploitations situées en zones réputées humides connaissent également des problèmes d'empoussièrement liés à d'autres facteurs, comme la configuration du site, l'entretien des installations. En outre, une conséquence de l'implantation d'une carrière dans une région pluvieuse peut être la formation de boues.

V.5.5.2.8 Type de gisement

L'émission de poussières est plus importante pour une exploitation de roches massives hors d'eau (teneurs en eau parfois proche de 0 %) que pour une exploitation de roches meubles en eau où le matériau exploité a un taux d'humidité élevé (Kesler S. E., et al., 2015).

Cependant, dès qu'il y a concassage de gros éléments, comme les graviers ou les galets, on peut être confronté à des problèmes de poussières.

V.5.5.2.9 Configuration du site

La topographie du terrain influence la dispersion des poussières hors de la carrière.

Dans les régions qui présentent une topographie accidentée, les secteurs protégés du vent alternent avec ceux qui sont exposés.

Un encaissement important, de par la topographie naturelle du site ou un rideau d'arbres plantés au plus près des installations, limite la dispersion rapide des poussières.

Une ouverture très importante vers l'extérieur favorise l'envol des poussières hors du site en produisant également un effet visuel.

Une ouverture étroite peut canaliser les vents et les renforcer localement (effet Venturi).

La localisation des éléments d'installations de traitement favorise ou limite la dispersion des poussières, selon qu'ils sont situés en hauteur ou en fond de carrière. Il en va de même pour l'orientation des stocks par rapport aux vents dominants : ils peuvent avoir une prise au vent plus ou moins importante selon leur taille et leur disposition sur le site.

Les installations en hauteur sont davantage soumises aux vents mais souvent plus faciles à barder. Les installations à développement horizontal nécessitent souvent plus de déplacement de matériaux.

V.5.5.2.9 Facteur production

Plus la production est importante, plus les quantités de poussières émises risquent d'être importantes.

De façon secondaire, il peut y avoir une influence de la production sur les niveaux d'empoussièrément.

La méconnaissance des spécifications concernant les fournitures de granulats peut amener à produire un matériau mal adapté aux besoins, par exemple la production de fines pour obtenir un matériau auquel on retirera, par criblage, une partie des fines excédentaires (production de poussières qui pourrait être évitée).

V.5.6 Impacts de l'empoussièrément dans la carrière et l'environnement

V.5.6.1 Sécurité sur l'exploitation et aux alentours

Si la concentration de poussières dans l'air est élevée, le nuage créé peut réduire la visibilité des conducteurs circulant aux abords de la carrière et ainsi être une source d'insécurité. La visibilité tombe, par exemple, de 500 m à 150 m quand la concentration des particules dans l'air varie de 1 mg/m³ à 200 mg/m³ (Reed L., et al., 2018)

En présence d'eau, les poussières constituent de la boue qui sera d'autant plus liquide que la quantité d'eau augmente.

Les précipitations, le ruissellement sur un site empoussiéré, génèrent de la boue. L'abattage des poussières à l'aide de système utilisant de l'eau peut provoquer la formation de quantités de boues plus ou moins importantes selon la gestion des eaux.

Ces boues altèrent la liaison véhicule/chaussée et peuvent être la source d'accidents lorsqu'elles s'accumulent sur les voies de circulation.

V.5.6.2 Riverains

Même si, a priori, les carrières ne semblent pas être à l'origine d'effets en matière de santé publique, les évolutions réglementaires en ce domaine amènent à s'interroger sur l'influence éventuelle des exploitations sur la santé des riverains. En effet, le décret du 20 mars 2000 a introduit la nécessaire prise en compte des effets des projets sur la santé dans les études d'impact. La présence de secteurs habités doit donc être prise en compte lors des réflexions en matière de lutte contre les poussières (Aïtondji A., et al., 2016).

Les mesures prises vis-à-vis de la santé des personnels permettent de limiter les conséquences sur les riverains.

Mais la présence possible, parmi les populations riveraines, de personnes plus sensibles conduit à renforcer les mesures de protection. Notons que les riverains ne bénéficient pas d'un suivi médical spécifique.

Les activités artisanales ou industrielles riveraines peuvent être sensibles à la présence de poussières : atelier de peinture, industrie électronique... et, plus largement, un fort taux de poussières est rarement compatible avec les opérations de finition et d'emballage.

V.5.6.3 Érosion des produits et perte de rentabilité

Dans les opérations de fabrication des granulats, les émissions non contrôlées de poussières peuvent influencer la régularité du calibrage des produits. La dispersion de particules commercialisables telles les fillers, produits riches constitués de fines, représente un manque à gagner pour l'exploitant. Sur un stock de matériaux fins en région Nord-Pas de Calais, la perte a été évaluée à 5 % de la masse stockée.

De même, les pertes lors du transport ou du stockage peuvent devenir notables.

V.5.6.4 Impact visuel

Les riverains sont sensibles aux salissures générées par des dépôts de poussières sur leurs biens.

Un envol dense de poussières va marquer le paysage. Les retombées importantes, par le blanchiment des surfaces, vont altérer la gamme chromatique perceptible.

Les poussières qui se déposent sur le sol, la végétation, les façades ou les toits, après un séjour plus ou moins long dans l'atmosphère, peuvent blanchir les différentes surfaces par effet de diffusion de la lumière. Ce phénomène sera d'autant plus important que la granulométrie des poussières sera faible (BRGM, 1989).

En règle générale, cette fine pellicule de poussières qui se dépose est lessivée avec les eaux météoriques.

Cette nuisance ne devient préoccupante que lorsqu'elle est durable. C'est le cas lors des émissions prolongées et des longues périodes de sécheresse.

Au final, un excès de poussières peut constituer un halo autour de la carrière qui va accroître l'impact visuel du site à l'ensemble carrière, nuage de poussières et zones blanchies par les retombées (Di Mauro B., et al., 2015).

V.5.6.5 Impacts sur le milieu naturel

Lorsque les retombées de poussières sont très importantes, la pellicule de poussières qui se dépose sur les végétaux peut être suffisante pour altérer la synthèse chlorophyllienne et ralentir la croissance des plantes (figure V.11). Le dépôt des poussières peut se faire sentir de façon plus importante pour l'agriculture en provoquant la diminution de la qualité et/ou de la quantité de certaines récoltes (Knight D., et al., 2018).

L'aspect poussiéreux des fruits est une entrave à leur commercialisation souvent mise en avant par les producteurs. Il fait craindre une évolution des caractéristiques des produits issus des procédés de transformation (vinification, industrie agroalimentaire...).

De façon indirecte, les fines, une fois déposées, peuvent être entraînées par les eaux de ruissellement. Elles contribuent alors à un excès de matières en suspension dans les rejets et peuvent altérer le milieu récepteur où vivent parfois des espèces protégées (écrevisses à pattes blanches...).



Figure V.11 Blanchiment de la végétation riveraine.

Ceci étant, ces mêmes poussières peuvent avoir, dans certains cas, un impact positif, soit par ajout d'amendement calcaire, soit en bloquant le développement de certains organismes parasites ou en favorisant la pollinisation.

V.5.6.6 Potentiel dangereux

Ce potentiel dangereux est directement lié aux caractéristiques intrinsèques du matériau extrait. Les carrières françaises exploitent des roches très variées, choisies les unes ou les autres pour leurs qualités mécaniques, de résistance à la chaleur ou aux attaques chimiques, de flexibilité ou de résistance à la traction, leur aptitude à être tissée (amiante), leur blancheur ou leur couleur, etc...

Dans la mine de l'Ouenza les roches principales sont essentiellement le calcaire, la marne, et les roches du minerai de fer (riche et pauvre), et du teneur de 58 % de silice.

Les formes et les caractéristiques physico-chimiques des minéraux qui composent une roche sont impérativement à connaître pour déterminer le potentiel dangereux. Il y a aussi une corrélation directe entre la taille des particules ou des fibres mises en suspension dans l'air et leur vecteur de transmission qu'est la poussière. (Guthrie Jr G. D., et al ., 2019)

Du point de vue sanitaire, les principales affections constatées avec certitude sur les sites d'extraction proviennent de ce qui est communément appelé la silice libre SiO_2 et que l'on retrouve dans la presque totalité des roches silicatées. La croûte terrestre contient approximativement 95% de minéraux silicatés. A titre d'exemple d'informations à transmettre, il y a la composition des différentes roches susceptibles d'être exploitées, de

façon à déterminer les pourcentages de quartz présents (entre autres) et estimer les concentrations siliceuses qui pourraient être émises par l'exploitation.

V.5.6.7 Effets sur la santé

En général, quel que soient leurs origines, les poussières sont susceptibles de provoquer des irritations des yeux, de la peau et aussi du tractus respiratoire (cas des toxicités aiguës). L'inhalation chronique de poussières silicatées peut par contre aboutir à l'apparition de pneumoconioses : silicose, pneumoconiose du houilleur, schistose, talcose, graphitose et autres pneumoconioses provoquées par ces poussières (Kortum E., 2007).. Les complications de ces affections peuvent se décrire de la manière suivante :

- complication cardiaque, insuffisance ventriculaire droite caractérisée,
- complications pleuro-pulmonaires: tuberculose ou autre mycobactériose sur ajoutée et caractérisée, nécrose caverneuse aseptique, aspergillose,
- complications non spécifiques: pneumothorax spontané, suppuration broncho-pulmonaire subaiguë ou chronique, insuffisance respiratoire grave.

Des enquêtes et études épidémiologiques pourraient être réalisées de façon à pouvoir établir des tableaux de correspondance entre les types de minerai extrait et leur potentiel de nocivité.(Tapia, J. S., et al ., 2018)

V.5.6.7.1 Voies d'exposition

La voie essentielle de pénétration des poussières dans l'organisme est la voie pulmonaire. Les poussières sédimentables (fractions granulométriques supérieures à 100 µm) et les particules en suspension (fractions granulométriques inférieures) se déposent dans la trachée, les bronches et les poumons et y persistent.

Cependant la voie d'exposition par ingestion n'est pas inexistante même si en générale elle s'avère indirecte, par le biais de la consommation d'eaux ou de produits végétaux au préalable exposés (d'où la nécessité de laver les fruits et légumes avant leur consommation).

V.5.6.7.2 Population concernée et populations sensibles

Les populations potentiellement concernées par les émissions de poussières générées par les activités des carrières d'extraction sont, en dehors des employés travaillant sur le site mais qui sont surveillés par les dispositions du RGIE, les habitants ou les tiers situés à proximité du site (Monneraud L., et al., 2016).

Les populations sensibles sont celles qui présentent des fragilités pulmonaires et notamment les enfants ou les personnes âgées, ainsi que les fumeurs et autres populations en déficience respiratoire

V.6 Drainages miniers

La manière dont on dispose des déchets miniers solides préoccupe les compagnies, la population et les gouvernements, en raison des dangers découlant de l'accumulation de matériaux souvent instables (physiquement mais aussi chimiquement) (Campbell B., 2010)

- Ex: Les stériles miniers constitués de particules assez grossières sont généralement considérés stables d'un point de vue mécanique mais peuvent être dans certains cas très « instables » d'un point de vue géochimique.
- Le drainage minier est le résultat de la circulation des eaux tant de surface que souterraines à travers les composantes d'un site minier (galeries de mines, haldes de stériles principalement).

Il existe plusieurs classes de drainage minier dont un des plus préoccupants est le drainage minier acide (DMA).

V.6.1 Alcalin

- pH du drainage > 9 .
- Alcalinité élevée.
- Exploitation :
 - Kimberlite (diamant)
 - Bauxite
 - Cendres volantes
 - Scories et autres

V.6.2 Neutre

- $6 < \text{pH du drainage} < 9$.
- Le drainage peut devenir alcalin ou acide dans le temps

V.6.3 Acide

- PH du drainage < 6 .
- Acidité élevée
- % de métaux lourds et sulfates très élevée
- Exploitation :
 - Métaux de base
 - Métaux précieux
 - Uranium
 - Charbon.

V.7 Effet de tir à l'explosif sur l'environnement

Une partie de l'énergie explosive utilisée pour fragmenter et abattre la matrice rocheuse (environ 20 %) se propage et se dissipe dans l'environnement sous forme d'ondes vibratoires solidiennes et aériennes qui s'amortissent avec la distance (Aloui M., et al., 2018).

Les structures situées à proximité des travaux peuvent être affectées par ces ondes vibratoires et présenter des risques de dommages et d'instabilité pendant la phase des travaux ou à plus long terme.

Des précautions particulières doivent être prises compte tenu des vibrations engendrées par les tirs à l'explosif et se propageant sous forme d'ébranlements vers les structures avoisinantes.

V.7.1 Structures sensibles aux vibrations

Par "structure", il faut entendre toute structure de génie civil allant d'un simple bâtiment à un ouvrage de génie civil exceptionnel, tel un château d'eau, un tunnel.

Les structures les plus couramment concernées sont les habitations individuelles ou collectives, les bâtiments industriels, les ponts et viaducs, les galeries techniques et ouvrages d'assainissement, les tunnels routiers ou ferroviaires. Les sites naturels sont également concernés (falaises, cavernes...) (Sołtys A., et al., 2018).

Les équipements situés à l'intérieur de ces bâtiments ou installations doivent être également pris en considération.

Les risques étant liés directement à la proximité, l'expérience montre qu'il convient de faire un inventaire dans une bande minimum de 200 m autour de l'axe du projet. Au-delà de cette distance, les amplitudes des vibrations sont généralement très faibles mais dans un contexte géologique particulier (horizon de marnes faisant office de réflecteur par exemple) des oscillations peuvent être ressenties beaucoup plus loin (1 à 2 kilomètres).

V.8 Effets des rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants dépendent de la dose.

L'étude des effets des rayonnements ionisants sur la matière vivante se situe à la frontière de la physique et de la biologie. Bien que les connaissances aient beaucoup progressé, elles demeurent incomplètes et empiriques. Pour démêler avec précision les effets des rayonnements, il faudrait identifier les doses de radioactivité subies par chaque partie de l'organisme, ce qui est matériellement impossible. Il faudrait surtout pouvoir remonter à l'origine de certains effets afin de les attribuer de façon sûre à la radioactivité ou à d'autres causes. Dans le cas de cancers, c'est généralement impossible (UNSCEAR 2009).

Le vivant est sensible aux radiations, les cellules du vivant sont sensibles aux agressions qu'elles soient chimiques ou radioactives. Les molécules d'ADN sont fragiles mais elles possèdent en même temps la capacité de réparer certains dommages à condition qu'ils restent limités (Monson K. L, et al., 2018).

Les effets d'une irradiation sont bénéfiques, quand l'irradiation touche des cellules malades, ou nocives s'ils touchent des cellules saines. Ils sont très variés, le rayonnement pouvant atteindre aussi bien une simple molécule d'eau qu'un fragment d'ADN. La matière vivante possède aussi une certaine faculté de réparation, du moins quand l'irradiation reste faible. Les conséquences d'une irradiation sont très difficiles à prévoir pour un individu en dehors du cas des fortes expositions (Elgazzar A, et al., 2015).

Les effets d'un rayonnement ionisant dépendent de sa nature, de la dose absorbée, de l'organe touché. La sensibilité aux radiations, la radiosensibilité, semble varier d'une personne à l'autre, notamment en fonction de l'hérédité. Des doses importantes (qui peuvent être bénéfiques quand elles sont brèves et localisées comme en radiothérapie) provoquent des effets bien identifiés appelés déterministes.

Effets de fortes expositions, effets « déterministes » liés à une forte irradiation homogène sur tout le corps. Ces effets peuvent être graves, voire mortels. Ils sont appelés

déterministes, car ils produisent toujours les mêmes symptômes, par opposition aux faibles doses qui ont seulement une probabilité (petite de causer un effet) (Rühm W. et al., 2018).

Les effets deviennent incertains pour les doses de l'ordre de celles dues à la radioactivité naturelle. Ils sont dits probabilistes, car une faible exposition n'a en général pas d'incidence mais peut éventuellement être à l'origine (avec une faible probabilité) de pathologies comme des cancers qui se manifestent des années après.

Il sera impossible d'attribuer l'apparition d'un cancer individuel à une telle exposition car ce cancer peut avoir eu bien d'autres causes. Mais, dans le cas d'un grand nombre de personnes exposées, un excès de cancers observés au sein de la population exposée peut mettre en évidence un effet (Mulinacci N, et al., 2018). De telles études épidémiologiques sont longues et délicates comme celles qui furent effectuées sur les irradiés d'Hiroshima et de Nagasaki.

V.8.1 Echelle de doses

Un classement des doses pour les expositions aiguës

En matière d'exposition à la radioactivité ou plus généralement aux rayonnements, qu'entend-t-on par fortes ou faibles doses. Le sujet fait l'objet de vifs débats. Pour les uns, toute exposition est dangereuse. Ils appelleront forte la moindre dose. Pour d'autres, les effets de la radioactivité ne doivent pas être surestimés. Ils appelleront moyennes ou faibles des doses que les premiers considèrent fortes. Ainsi, les expositions consécutives en France à l'accident de Tchernobyl relèvent des faibles doses, mais ce n'est pas la perception du public.

Le comité scientifique sur l'effet des radiations de l'ONU, l'UNSCEAR, a établi un classement des doses d'expositions aux radiations fondé sur les seuils d'apparition d'effets déterministes, c'est-à-dire des effets qui apparaissent obligatoirement chez toutes les personnes exposées au-delà d'un certain seuil. Les valeurs présentées dans la figure V.12 correspondent à des doses efficaces reçues lors d'une exposition globale aiguë, c'est à dire une dose reçue par le corps entier en une seule irradiation. Des effets déterministes apparaissent également après une exposition brève, unique mais élevée localisée à un organe ou un tissu biologique tels que les testicules (stérilité transitoire ou permanente), les ovaires (stérilité permanente), le cristallin (cataracte) ou la peau (érythème, nécrose).



Figure V.12 : Classement de doses (expositions aiguës).

Ce classement de référence des doses par l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2004), se rapporte aux doses efficaces reçues lors d'une exposition globale aiguë, c'est à dire une dose reçue par le corps entier en une seule irradiation. Il s'agit alors d'effets déterministes (apparition obligatoire à court terme de signes biologiques ou de symptômes post irradiation), et non pas d'effets stochastiques (éventualité d'effets à long terme : cancer, mutations héréditaires).

Il convient de distinguer ces expositions fortes et ponctuelles des expositions chroniques comme celles dues la radioactivité naturelle qui sont faibles mais quasi permanentes. Les effets déterministes des expositions aiguës sont ceux dont il faut le plus se préoccuper dans un contexte accidentel car ces expositions peuvent engager le pronostic vital. C'est la raison pour laquelle, le classement de l'UNSCEAR se rapporte à celles-ci.

En dessous de 200 milli-sieverts (mSv), les expositions globales aiguës sont considérées comme faibles et en dessous de 20 mSv comme très faibles. Les expositions aux rayonnements en médecine hors des radiothérapies et les expositions chroniques à la radioactivité naturelle entrent dans cette catégorie. Ce domaine de doses est caractérisé par l'absence d'effets déterministes, c'est-à-dire l'apparition à court terme de signes biologiques ou de symptômes post irradiation

Ces effets déterministes apparaissent pour les expositions globales aiguës classées comme moyennes, fortes et très fortes par l'UNSCEAR. Dans un domaine allant de 0.5 à 2 sieverts (Sv), on a affaire à une réaction générale légère avec typiquement asthénie, nausées, vomissements 3 à 6 h après l'exposition. Entre 4 et 4.5 Sv, on est à la DL50, c'est à dire que l'exposition va entraîner le décès de 50 % des personnes qui ont reçu cette dose. Les patients exposés à ces doses suite à une forte irradiation du corps entier présentent un syndrome aigu d'irradiation (SAI) dont la sévérité va dépendre de la dose reçue, de la durée d'exposition, du type de rayonnement et de la distribution de la dose dans l'organisme. Le SAI se caractérise par l'apparition de symptômes consécutifs à l'atteinte de la moelle osseuse (symptômes hématologiques), du tissu gastro-intestinal (symptômes digestifs) et du système nerveux central (symptômes neurologiques).

Considérer une dose de 1 Sv (1000 mSv) comme moyenne peut surprendre. Il s'agit effectivement d'une dose élevée par rapport aux limites réglementaires de dose efficaces qui visent à réduire au maximum le risque des effets probabilistes (cancer, mutations). Par contre, dans le domaine des irradiations aiguës avec leurs symptômes déterministes, une dose de 1 Sv apparaît effectivement moyenne.

V.8.2 Sievert : unité de dose biologique

Le sievert ou Sv est l'unité utilisée pour mesurer les doses biologiques les plus significatives pour un être vivant : dose efficace, dose équivalente, dose engagée Le sievert constituant une unité est assez grande, on exprime généralement les doses en millième de sievert (milli-sievert ou mSv). En Europe, la dose efficace annuelle à laquelle la population est exposée est en moyenne de 4 mSv par personne. Le sievert a remplacé une ancienne unité, le rem : 1 Sv = 100 rem) (Strom D.J. 2003).

V.8.3 Doses : limites légales

Une application du principe de précaution : des limites prudentes. les limites annuelles sont présentés dans le tableau V.4

Tableau V.4 : Limites annuelles pour la population d'exposition hors radioactivité naturelle et médecine. (ASN 2006).

Définition	Valeurs
Dose efficace corps entier	1 mSv/an
Doses équivalentes pour le cristallin	15mSv/an
Doses équivalentes pour la peau	50 mSv/an

Ces limites annuelles d'exposition pour la population sont celles du code de la santé publique. Ces limites s'appliquent à la somme des doses efficaces ou équivalentes reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de la médecine, dont celles résultant des activités nucléaires. La dose maximale admissible de 1 mSv par an représente environ 40 % de l'exposition naturelle. (Pour la peau, il s'agit de la dose moyenne par cm² de peau, quelle que soit la surface exposée).

La réglementation française fixe à 1 milli-sievert (mSv) par an la dose efficace maximale admissible résultant des activités humaines en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine. Il s'agit de "doses corps entier". Pour les expositions d'un organe ou d'un tissu, on considère les doses équivalentes. Ainsi, les limites de doses équivalentes pour le cristallin et pour la peau sont fixées respectivement à 15 mSv/an et à 50 mSv/an (Billon S. et al., 2005).

La limite de 1 mSv/an concerne le public en général. Les limites annuelles d'exposition pour les personnes sont présentées dans le tableau V.5. Elle se compare à l'exposition moyenne hors radioactivité et médical qui est de 0,060 mSv/an en France, dont l'exposition au nucléaire qui préoccupe le public ne représente qu'une partie. Pour les personnes qui travaillent avec des radiations ionisantes, la limite est de 100 mSv pour un ensemble de 5 années consécutives, le maximum pour une année ne devant pas dépasser 50 mSv (ASN 2006).

Tableau V.5 : Limites annuelles d'exposition pour les travailleurs.

	Dose efficace Corps entier	Dose équivalente Tissu, organe
Adultes Dose efficace Corps entier Mains, avant-bras, pieds, chevilles Peau Cristallin	20 mSv	500 mSv 500 mSv 150 mSv
Femme enceinte	1 mSv	
Jeunes de 16 à 18 ans Dose efficace Corps entier Mains, avant-bras, pieds, chevilles Peau Cristallin	6 mSv	150 mSv 150 mSv 50 mSv

Limites annuelles d'exposition pour les personnes amenées à être exposées du fait de leur activité aux rayonnements, en particulier les travailleurs du nucléaire et le personnel de la médecine nucléaire. Dans le cas des femmes enceintes, il s'agit de l'exposition de l'enfant à naître. Des dérogations préalablement justifiées sont admises dans certaines zones de travail et pour une durée limitée sous réserve de l'obtention d'une autorisation spéciale. Ces expositions exceptionnelles ne doivent pas dépasser deux fois la valeur limite annuelle d'exposition.

Une dose de 1 mSv est considérée en radioprotection comme une dose faible, voire très faible. La limite de 1 mSv/an peut sembler au premier abord très supérieure à la moyenne annuelle des 0,06 mSv résultant des activités humaines une fois le médical exclu et plus encore aux 0,002 mSv de l'impact d'une centrale nucléaire (Marsh R. M. 2018).

Mais d'un autre côté, les expositions à la radioactivité naturelle et au médical varient considérablement d'une personne à l'autre. Ces variations, notamment du fait de diagnostics et de traitements médicaux, dépassent allègrement la limite imposée pour la troisième cause d'exposition ... Si l'on appliquait la limite de 1 mSv à ces deux causes, on ne pourrait pas subir un scanner, il faudrait renoncer à l'avion, abandonner l'alpinisme, ne pas habiter la Bretagne ou la Corse (Squillaro T, et al., 2018).

Les cellules de notre corps ne font pas la différence entre un rayon d'origine naturelle, médicale et celui d'une centrale nucléaire. Si les fluctuations de l'exposition d'une personne à l'autre dépassent 1 mSv du fait de l'habitat ou des diagnostics ou des soins qui prolongent nos vies, il semble artificiel de continuer à réduire la limite pour la troisième cause d'exposition qui est mineure en comparaison (Rigaud O. 1998).

V.8.4 Principes de radioprotection

Des règles de bon sens adaptées à la nature des rayons (Métivie H., et al., 2006).

La nécessité de se protéger des radiations apparut très peu de temps après la découverte de la radioactivité (figure V.13). Après sa découverte des rayons uraniques, Henri Becquerel s'aperçut qu'un tube de matière radioactive, gardé dans la poche de sa veste, avait provoqué une brûlure comparable à un coup de soleil. Mais on n'imaginait pas leur nocivité.



Figure V.13 : Tests en boîte à gants.

Les moyens de protection sont très variés. Les principes sont basés sur des règles de bon sens et dépendent du pouvoir de pénétration du type de rayonnement (Robert N. 2000).

Quelques règles simples sont à respecter lorsque l'on a affaire à des substances radioactives. Il convient d'abord de se tenir éloigné, l'exposition variant pour les rayons gamma en raison inverse du carré de la distance. Si la source est intense, Il est nécessaire de placer la source derrière un blindage approprié, par exemple un écran de plomb (Esteban, Ó. 2018).

Dans les laboratoires, les sources radioactives sont rangées dans des châteaux de plomb. Elles sont soigneusement inventoriées et leur devenir est constamment contrôlé par des organismes de sûreté nucléaire. On prend des précautions durant leur transport.

Pour des travailleurs exposés, on cherche à limiter la durée d'exposition. On se protège du contact et de l'inhalation de poussières radioactives par des combinaisons étanches. Les gants, combinaisons et matériels contaminés par un contact avec des substances radioactives sont mis de côté et stockés comme des déchets de faible radioactivité.(la radioprotection aujourd'hui 2007).

V.8.5 Effets de ^{152}Eu et de ^{137}Cs sur la santé

La détermination du coefficient d'atténuation linéaire des échantillons des stériles francs par transmission d'un faisceau gamma est étudiée pour les énergies 121.78 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV émises par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs respectivement.

Pour savoir comment l'énergie affecte sur l'environnement, l'unité d'énergies ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs doit être convertie de KeV vers mSv, dans le tableau V.6 toutes les énergies sont converties.

Tableau V.6 : Les énergies en mSv.

Energie en KeV	Energie en mSv
121.78	1.06 e^{-10}
244	5.51 e^{-10}
344	3.91 e^{-10}
661	1.95 e^{-10}

Selon les résultats des énergies en mSv, et après la comparaison avec la dose limite nous concluons que l'énergie n'a pas d'effet sur l'environnement car sa valeur est très éloignée des doses limites.

Conclusion

- La région d'Ouenza est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à faible pluviométrie.
- D'une manière générale, les différentes activités minières peuvent être classées en fonction des quantités de poussières produites comme le décapage, le tir, et le chargement et transport, et le concassage.
- Indépendamment des techniques d'extraction et de traitement des matériaux, de nombreux facteurs peuvent influencer sur l'émission des poussières, la mise en suspension et le déplacement des poussières dans l'atmosphère et dans l'environnement proche de la carrière.
- Impacts de l'empoussièrement sur l'environnement d'une façon directe dans le nuage créé dans les carrières qui provoquent les travailleurs et la population situés à proximité du site, et sur le milieu naturel.
- Les poussières sont susceptibles de provoquer des irritations des yeux, de la peau et aussi du tractus respiratoire.
- Les effets des rayonnements ionisants dépendent de la dose.
- Les effets d'une irradiation sont bénéfiques, quand l'irradiation touche des cellules malades, ou nocives s'ils touchent des cellules saines.

Conclusion générale

D'après l'étude menée sur la caractérisation et la valorisation des stériles francs, la conclusion :

- La mine de l'Ouenza renferme d'énormes quantités d'un minerai de fer non phosphoreux, très riche et très pur, d'une teneur en fer moyenne de 53%.
- L'état des réserves de la mine de l'Ouenza montre qu'il y a une quantité énorme des réserves des stériles estimées 123 Mt par rapport au minerai 36 Mt.
- L'exploitation du gisement de l'Ouenza - Algérie génère de grandes quantités de déchets miniers solides qui sont entreposées en surface proche du site minier sous forme d'empilements, communément appelés haldes à stériles.
- La nature des stériles francs est constituée de quatre catégories : le calcaire, la marne, le minerai de fer riche et pauvre.
- Les méthodes les plus couramment utilisées pour le triage des stériles francs sont la séparation radiométrique et la séparation optique, généralement avec des roches morcelées plus de 50 mm et une différence entre les coefficients d'atténuation la méthode qui correspond est la méthode d'absorption gamma.
- L'atténuation est étudiée pour les énergies 122 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV qui sont émises respectivement par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs .
- L'épaisseur de chaque échantillon est conditionnée par l'appareillage utilisé dans le laboratoire, l'épaisseur maximale admissible lors de la mesure est de **90 mm**.
- Les mesures des différents échantillons des stériles francs à l'aide du spectromètre gamma contenant un détecteur NaI (Tl) 300 sert à déterminer des coefficients d'atténuation linéaires.
- Pour une énergie de 121.78 KeV avec un coefficient d'atténuation égal à $0.45\text{ cm}^2/\text{g}$, on peut obtenir un concentré de fer de teneur 65% au premier étage de séparation. Pour le minerai de fer pauvre, avec une énergie de 344 KeV avec un coefficient d'atténuation égal à $0.195\text{ cm}^2/\text{g}$ on obtient un concentré de teneur égale à 37.5% au deuxième étage de séparation.
- Le procédé de tri radiométrique par voie d'absorption des rayons gamma peut être appliqué les stériles francs de l'Ouenza.
- D'une manière générale, les différentes activités minières peuvent être classées en fonction des quantités de poussières produites comme le décapage, le tir, et le chargement et transport, et le concassage.
- Indépendamment des techniques d'extraction et de traitement des matériaux, de nombreux facteurs peuvent influencer sur l'émission des poussières, la mise en suspension et le déplacement des poussières dans l'atmosphère et dans l'environnement proche de la carrière.
- l'empoussièrement génère lors des travaux miniers influent d'une façon directe sur l'environnement (la population située à proximité du site, et sur le milieu naturel). Les effets des rayonnements ionisants dépendent de la dose, les effets d'une irradiation sont bénéfiques, quand l'irradiation touche des cellules malades, ou nocives s'ils touchent des cellules saines.

Références bibliographie



- A. Rannou, M Tirmarche (2004), Évaluation de l'exposition de la population française à la radioactivité naturelle – Radioprotection.
- A. A. Maslov, G.V. Kalyatskaya, G.N. Amelina (2007).,Technologie de l'uranium: études. manuel / - Tomsk: Maison d'édition Tomsk. Polytechnique University,. - 97 p. [in Russian].
- Abdurakhmanov, E.A. N.A. Donyarov. Navoi, (2008). Technologie d'enrichissement en minéraux non métalliques –144 p.[in Russian].
- Ahmed A. S. SEIFELNASSR, Eltahir M. MOSLIM, Abdel-Zaher M. ABOUZEID., (2012). Effective processing of low-grade iron ore through gravity and magnetic separation techniques. Physicochem. Probl. Miner. Process. 48(2), 2012, 567–578.
- Aigbedion, I., & Iyayi, S. E. (2007). Environmental effect of mineral exploitation in Nigeria. International Journal of Physical Sciences, 2(2), 33-38.
- Aïtondji, A. L., Toyi, M., Bogaert, J., & Sinsin, B. (2016). Impacts des activités d'extraction de gravier au Sud du Bénin et leurs perceptions des populations locales. Tropicultura.
- Akkurt, I., Akyıldırım, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., & Basyigit, C. (2010). Photon attenuation coefficients of concrete includes barite in different rate. Annals of Nuclear Energy, 37(7), 910-914.
- Alanyalı, H., (2006). « Application of magnetic separation to steelmaking slags for reclamation ». Waste Management 26 (10): 1133-39.
- Ali, W., Khan, S., & Ullah, N. (2017). Risk Management and Analysis of Silica Dust Hazards in Local Stone Crushing Industry. In 1st International Conference on (p. 27).
- Aloui, M., Bleuzen, Y., Essefi, E., & Abbes, C. (2018). Evaluation of ground vibrations and the effect of air blast in open-pit phosphate mines. Arabian Journal of Geosciences, 11(21), 686.
- Ambert P. (1992) L'émergence de la métallurgie en France méridionale. État actuel des connaissances. In : le Chalcolithique en Languedoc, Archéologie en Languedoc, n° 15, p. 51-58.
- Améon, R. (2003). Le radon dans les stations thermales: une source d'exposition aux rayonnements ionisants. Radioprotection, 38(2), 201-215.
- Aoudjehane, M., Bouzenoune, A., Rouvier, H., & Thibieroz, J. (1992). Halocinèse et dispositifs d'extrusion de trias dans l'Atlas saharien oriental (NE Algérie). Géologie Méditerranéenne, 19(4), 273-286.
- Arens, V. Zh.(2001). Géotechnologie physico-chimique: études. avantage.– M. Izd-vo Mosk. état corne University,. - 656 p.[in Russian].

- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, L., Chapuis, R., Julien, M., Belem, T., & Li, L. (2002). La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Congrès annuel de la société canadienne de génie civil, Montréal, Québec, Canada, 5-8.
- Autorité de sûreté nucléaire (ASN) française (2006).
- Avdokhin, V.M.(2006). Les bases de l'enrichissement minéral: études. pour les universités 2 tonnes / V.M. Avdokhin. - M.: Izd - dans Mosk.gog.gorn. University,. - V. 1: Processus d'enrichissement. - 417 s.[in Russian].
- Azaryan, A. (2015). Research of influence of monocrystal thickness NAJ (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation. Metallurgical and Mining Industry, (2), 43-46.

B

- B. Beckhoff, B. Kanngießer, N. Langhoff, R. Wedell et H. (2006). Wolff, Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, Springer, (ISBN 3-540-28603-9).
- Babel M., (1996) « La lutte contre le bruit et les poussières dans l'industrie extractive », Mines et Carrières, volume 78, p. 35-38.
- Balon P., Blanchard O., (1998) « Intégration des carrières dans leur environnement : mesure et contrôle des émissions de poussières » - Rapport de synthèse - UNPG - Ministère de l'Environnement, 55 pages,.
- Bamber, A. S. (2008). Integrated mining, preconcentration and waste disposal system for the increased sustainability of hard rock metal mining. Thèse de Doctorat. University of British Columbia, (Vancouver). 331 p.
- Barrés M. (1979) - Comportement hydrodynamique et évolution chimique de déchets miniers fins en décharge (effets sur l'environnement). Etude de la digue à stériles de St Salvy de la Balme (Tam). Rapport BRGM 79 SGN 662 HYD, 91 p.
- Basta, N. T., Whitacre, S. D., Kecojevic, V. J., Lashgari, A., & Lusk, B. (2015). Dust Characterization and Source Apportionment at an Active Surface Mine in West Virginia.
- Baştuğ, A., Gürol, A., İçelli, O., & Şahin, Y. (2010). Effective atomic numbers of some composite mixtures including borax. Annals of Nuclear Energy, 37(7), 927-933.
- Bellet, D. (1990). Etude des textures des superalliages monocristallins par diffraction et diffusion des rayonnements: X,[gamma] et neutrons (Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier (Grenoble)).
- Benarchid, Y., Taha, Y., Argane, R., & Benzaazoua, M. (2018). Application of Quebec recycling guidelines to assess the use feasibility of waste rocks as construction aggregates. Resources Policy.

- Berger, M.J., Hubbell, J.H., Seltzer, S.M., Chang, J., Coursey, J.S, Sukumar R, Zucker,D.S, Olsen, K., 2010. XCOM: photon cross sections database, NIST standardreference database (XGAM). <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>.
- Betier, G., Glangeaud, L., Jouhaud, M., Duplan, L., Hilly, J., Dubourdieu, G., & Juston, F. (1952). Etude sur les gisements de fer de l'Algérie. In Symp. sur les gisements de fer du Monde. XIX eme Congres Géol. Int. Alger (pp. 35-16).
- Black, S., Allen, D., North, M., Price, B., Rothnie, N., & Sharma, R. (2018). Applicability of the chromium reducible sulfur test for acid metalliferous drainage prediction in hard rock mining. *Applied Geochemistry*, 91, 45-53.
- Blackmore, S., Vriens, B., Sorensen, M., Power, I. M., Smith, L., Hallam, S. J., ... & Beckie, R. D. (2018). Microbial and geochemical controls on waste rock weathering and drainage quality. *Science of The Total Environment*, 640, 1004-1014.
- Blanchard O., (1997) « Stratégie de mesure et optimisation du contrôle de l'empoussiérage dans les carrières » - Rapport intermédiaire - UNPG - Ministère de l'Environnement,.
- Bocharov, V. A. V. Abryutin (2011). Technologie des minerais aurifères / M.: IzdHouse MISiS 420 p.[in Russian].
- Bouzenoune, A. (1993). Minéralisations périapiques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale) (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Bragina, V. I. (2009). Technologie d'enrichissement et de traitement des minéraux non métalliques: études. manuel / V.I. Bragin. - Krasnoyarsk: IPK SFU,. - 228 p. [in Russian].
- BRGM, (1989) .Comité de gestion de la taxe parafiscale sur les granulats, « Contribution à l'analyse, à la prévision, aux contrôles et aux moyens de réduction des émissions de poussières en carrières »,.
- BRGM, rapport R 38184 UPE SGN 94. Gestion des sites (potentiellement) pollués. Etude des sols. Guide technique. Annexe 14, Glossaire 1999.84p.
- Bureau de méthode Ouenza., (2015).
- Bureau européen pour la PRIP., (2004). Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la gestion des résidus et stériles des activités minières, p 632.
- Burt R., (1999). The role of gravity concentration in modern processing plants, *Minerals Engineering*, vol. 12, pp. 1291-1300.

C

- Caisse Régionale d'Assurance Maladie d'Alsace – Moselle (CRAMAM),(1985) « Réduction des émissions de poussières dans les installations de traitement des graviers : ballastières – gravières ». Note technique CRAMAM, n° 14, 13 pages,.
- Campanac R., Allombert J., Delobelle T., (1990) « Granulats », Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pages 411-441,

- Campbell, B. (Ed.). (2010). Ressources minières en Afrique: quelle réglementation pour le développement?. International Development Research Centre.
- Carly R. (1981) -Inventaire des dépôts et rejets miniers. Compte rendu de l'activité 1980. Rapport BRGM 81 SGN 208 ENV, 76 p. (112 mines métalliques et 86 mines F, Ba, amiante répertoriées).
- Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Liu, T., & Huang, J. (2013). Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings. *Construction and Building Materials*, 38, 1083-1088.
- Chen, Y., Zhang, Y., Chen, T., Zhao, Y., & Bao, S. (2011). Preparation of eco-friendly construction bricks from hematite tailings. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2107-2111.
- Chikhi-Aouimeur, F. (1980). Les rudistes de l'Aptien supérieur du Djebel Ouenza (Algérie-NE). Thèse Troisième Cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 27.
- Compton, A. H. (1923). A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. *Physicalreview*, 21(5), 483.

D

- Darezereshki, E., khodadadi Darban, A., & Abdollahy, M. (2018). Synthesis of magnetite nanoparticles from iron ore tailings using a novel reduction-precipitation method. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 336-343.
- Davisson, C. M. (1965). Gamma-ray attenuation coefficients. In *Alpha-, beta-and gamma-ray spectroscopy* (p. 827).
- Davisson, C. M. (1965). Interaction of γ -Radiation with Matter in *Gamma-ray Attenuation Coefficients; Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy*.
- Del Villar R., (2010). Compléments de minéralurgie (GMN-7008), Québec : Université Laval
- Di Mauro, B., Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., & Colombo, R. (2015). Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(12), 6080-6097.
- Djebbi, C., Chaabani, F., Font, O., Queralt, I., & Querol, X. (2017). Atmospheric dust deposition on soils around an abandoned fluorite mine (Hammam Zriba, NE Tunisia). *Environmental research*, 158, 153-166.
- Dubourdiou G. (1956) Etude géologique de la région de l'Ouenza (confins Algéro-Tunisien). *Bull Publ Serv Carte Géol Algérie* 10(1):1-659
- Dwari R. K., Rao D.S., Reddy P. S. R.(2013)., Magnetic separation studies for a low grade siliceous iron ore sample. *International Journal of Mining Science and Technology* 23 (2013) 1-5 Contents.

E

- Ekengoue, C. M., Lele, R. F., & Dongmo, A. K. (2018). Influence De L'exploitation Artisanale Du Sable Sur La Santé Et La Sécurité Des Artisans Et L'environnement: Cas De La Carrière De Nkol'Ossananga, Région Du Centre Cameroun. *European Scientific Journal*, ESJ, 14(15).
- Elgazzar, A. H., & Kazem, N. (2015). Biological effects of ionizing radiation. In *The pathophysiologic basis of nuclear medicine* (pp. 715-726). Springer, Cham.
- Elisaveta P., (2009). Studies on the Adsorption of Flotation Collectors on Iron Oxides. Luleå University of Technology Department of Chemical Engineering and Geosciences Division of Chemical Engineering, p94.
- Esteban, Ó. (2018). Multi-point gamma-ray monitoring at radioprotection levels with image devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 281, 117-123.

F

- FERPHOS., (2014).
- Ferreira, T. R., Pires, L. F., Brinatti, A. M., & Auler, A. C. (2017). Surface liming effects on soil radiation attenuation properties. *Journal of Soils and Sediments*, 1-13.
- Foqué, D., Zwertvaegher, I. K., Devarrewaere, W., Verboven, P., & Nuyttens, D. (2017). Characteristics of dust particles abraded from pesticide treated seeds: 1. Size distribution using different measuring techniques. *Pest management science*, 73(7), 1310-1321.
- Frimmel, H. (1988). Strontium isotopic evidence for the origin of siderite, ankerite and magnesitemineralizations in the Eastern Alps. *Mineralium Deposita*, 23(4), 268-275.

G

- Gao, G., Shen, J., & Liang, Q. (2018, July). Study of dust diffusion at transfer point of belt conveyor based on FLUENT. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1064, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- Gélinas, P., R. Lefebvre, M. Choquette, D. Isabel, J. Locat et R. Guay 1994 : Monitoring and modeling of acid mine drainage from waste rocks dumps. La mine Doyon case study. Final report presented to MEND Prediction committee. Rapport GRECI 1994, 12 p.
- Gil PP (1991) Las mineralizaciones de hierro en el anticlinal de Bilbao: Mineralogia, geoquímica y metalogenia. Ph D Thesis University of Pais Vasco, Bilbao.
- Giri, S. K., Das, N. N., & Pradhan, G. C. (2011). Magnetite powder and kaolinite derived from waste iron ore tailings for environmental applications. *Powder technology*, 214(3), 513-518.
- Gonzales, P., Felix, O., Alexander, C., Lutz, E., Ela, W., & Sáez, A. E. (2014). Laboratory dust generation and size-dependent characterization of metal and metalloid-contaminated mine tailings deposits. *Journal of hazardous materials*, 280, 619-626.

- Gosselin A., Blackburn D., Bergeron M., (1999). Protocole D'évaluation De La Traitabilité Des Sédiments, Des Sols Et Des Boues A L'aide Des Technologies Minéralurgiques. Sainte-Foy, Canada, p 148.
- Guthrie Jr, G. D., & Mossman, B. T. (Eds.). (2019). Health effects of mineral dusts (Vol. 28). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

H

- H. Hertz, (1887). Annals of Physics, 33, p. 983.[in German].
- Henri Métivier, Bruno Lauwers, Didier Paul, Isabelle Aubineau-lanièce (2006) Radioprotection et ingénierie nucléaire Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires,; EDP Sciences Éditions, (ISBN 2868837697), 9782868837691.
- Hoenig, et Thomas P., (2002). Préparation d'échantillons de l'environnement pour analyse minérale, Dossier P4150, Techniques de l'Ingénieur, p 12.
- Hu, S., Feng, G., Ren, X., Xu, G., Chang, P., Wang, Z., ... & Gao, Q. (2016). Numerical study of gas–solid two-phase flow in a coal roadway after blasting. Advanced Powder Technology, 27(4), 1607-1617.

I

- Idres, A., Abdelmalek, C., Bouhedja, A., Benselhou, A., & Bounouala, M. (2017). Valorization of mining waste from Ouenza iron ore mine (eastern Algeria). REM-International Engineering Journal, 70(1), 85-92.
- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INEIS),. (1998).

K

- Kefeni, K. K., Msagati, T. A., & Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review. Journal of Cleaner Production, 151, 475-493.
- Kell, MN (1988). Traitement combiné des minéraux. - L., Maison d'édition de l'Institut d'État de Moscou,. - 67 p.[in Russian].
- Kervasdoué, J. (2007). Les prêcheurs de l'apocalypse: pour en finir avec les délires écologiques et sanitaires, Plon.p98.
- Kesler, S. E., Simon, A. C., & Simon, A. F. (2015). Mineral resources, economics and the environment. Cambridge University Press.
- Kim, Y., Kim, M., Sohn, J., & Park, H. (2018). Applicability of gold tailings, waste limestone, red mud, and ferronickel slag for producing glass fibers. Journal of Cleaner Production, 203, 957-965.
- Knight, D., Lopata, A. L., Nieuwenhuizen, N., & Jeebhay, M. F. (2018). Occupational asthma associated with bleached chlorine-free cellulose dust in a sanitary pad production plant. American journal of industrial medicine, 61(11), 952-958.

- Kobzev, A.S. (2013). Directions of development and problems of radiometric methods for the enrichment of mineral raw materials. *Enrichment of ores*, (1), 13. [in Russian].
- Kobzev, A.S.(2008). Pré-valorisation des minerais aurifères: dépôts de Sukhoi Log avec une méthode de séparation photométrique polychrome.- 18 p.[in Russian].
- Kortum, E. (2007). Work-related stress and psychosocial risks: Trends in developing and newly industrialized countries. *The Global Occupational Health Network Newsletter*, special issue (July), 3-6.
- Kravets, B.N.(1986). Méthodes d'enrichissement spéciales et combinées / BN.Kravets. - M.: Nedra, - 304 p.[in Russian].
- Kucuk, N., Tumsavas, Z., &Cakir, M. (2012). Determining photon energy absorption parameters for different soil samples. *Journal of radiation research*, 54(3), 578-586.
- Kuranchie, F. A. (2015). Characterisation and applications of iron ore tailings in building and construction projects. PhD Thesis, Edith Cowan University.
- Kuskov, V.B.(2002). Traitement des minéraux et traitement: études. indemnité / V.B. Kuskov, M.V. Nikitin; Saint-Pétersbourg. corne in-t. - SPb, - 84 p.[in Russian].

L

- L. MOSTEFAOUI, (2012), Études géotechniques relatives à la stabilité de l'exploitation à ciel ouvert dans le quartier de ZERGA (Gisement de fer de l'OUENZA), Rapport n° : 0041/ALGEOS/2012.
- La radioprotection aujourd'hui et la voie du développement durable (2007), Agence pour l'énergie nucléaire et Organisation de coopération et de développement économique, , (ISBN 978-92-64-99014-2);
- Lazizi Malek., (2012)., La Mine de l'Ouenza Histoire et Avenir., Division Etude et développement Service Géologie., ArcelorMittal Tébessa Mine de l'Ouenza.
- Lèbre, É., Corder, G. D., & Golev, A. (2017). Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*, 107, 34-42.
- Les ressources minières françaises (1978-1991) - 14 volumes concernant Pb-Zn, W, Sn, Sb, Mn, Cu, Au, F, Ba, S, Hg, talc, amiante, andalousite. Rapports Inv. minier métropolitain, inédits.
- Li, C., Sun, H., Bai, J., & Li, L. (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1-3), 71-77.
- Li, C., Sun, H., Yi, Z., & Li, L. (2010). Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material. *Journal of hazardous materials*, 174(1-3), 78-83.
- Ligus, G. (2012). Municipal waste management model with the use of optical sortingelements. *Chemik*, 66, pp. 1229-1234.

- Liu, A., & Wu, Q. (2018, April). A Monthly, High-resolution Dust Emission list of Soil Wind Erosion over Beijing Plain Area. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 20, p. 5689).
- Louis Simonin, Jean-Claude Beaune (1982) ; La vie souterraine: les mines et les mineurs - Technology & Engineering - 306 pages.
- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612.

M

- M ., Nedra, (1983). Manuel de valorisation du minerai: spéc. et aux. processus - 383 p.[in Russian].
- Madre, M. (1969). Contribution à l'étude géologique et métallogénique du Djebel Ouenza (Est Algérien) (Doctoral dissertation).
- Mahjoubi, H., & Samama, J. C. (1983). Modèle de concentration supergene d'amas sideritique; le cas du Jebel Jerissa, Tunisie. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(1), 91-99.
- ManjitKumar, (2012). *Le Grand Roman de la physique quantique*, Flammarion, 636 p.
- Mann, K. S. (2018). Measurement of exposure buildup factors: The influence of scattered photons on gamma-ray attenuation coefficients. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 877, 1-8.
- Marsh, R. M. (2018). Arbitrary Radiation Dose “Limits” Must Not Set Standard of Care. *Journal of the American College of Radiology*, 15(3), 382-383.
- Masse, J.-P., Thieuloy, J.-P., 1979. Précisions sur l'âge des calcaires et des formations associées de l'Aptien sud-constantinois (Algérie). Conséquences paléogéographiques. *Bulletin de la Société géologique de France* 7, 21, 1, 65–71.
- Medhat, M. (2012). Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil. *Annals of Nuclear Energy*, 40(1), pp. 53-59.
- Medhat, M. E., & Abdel-Hafiez, A. (2016). Application of Gamma-Ray Attenuation in Studying Soil Properties. *Physical Science International Journal*, 10(2).
- Mfudi G. P., 2013. Modélisation d'un classificateur hydraulique { l'usine de bouletage d'Arcelor-Mittal. Université LAVAL, p 308.
- Mokrousov V. A. and. Lileyev V. A. Radiometric Beneficiation of Non-Radioactive Ores, Nauka, Moscow. 192p, 1979. [in Russian].
- Monneraud, L., Brochard, P., Raherison, C., Housset, B., & Andujar, P. (2016). Expérience de maladie chronique et vie professionnelle: les ajustements professionnels des travailleurs atteints de broncho-pneumopathie chronique obstructive. *Sciences sociales et santé*, 34(1), 39-63.

- Monson, K. L., Ali, S., Brandhagen, M. D., Duff, M. C., Fisher, C. L., Lowe, K. K., ... & Washington II, A. L. (2018). Potential effects of ionizing radiation on the evidentiary value of DNA, latent fingerprints, hair, and fibers: A comprehensive review and new results. *Forensic science international*, 284, 204-218.
- Morkun, V., & Tron, V. (2014). Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 4-7.
- Mulinacci, N., Valletta, A., Pasqualetti, V., Innocenti, M., Giuliani, C., Bellumori, M., ... & De Gara, L. (2018). Effects of ionizing radiation on bio-active plant extracts useful for preventing oxidative damages. *Natural product research*, 1-9.

N

- Nicolasj., (2006). Principes de l'échantillonnage dans l'environnement, Université de Liège, Liège, p 89.
- Nicoleta-Maria, M. (2016). IMPACT ON AIR ACTIVITIES IN PESTEANA NORD MINING AREA. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, 2, 411-418.
- Nikitin, M.V. (2001) Méthodes d'enrichissement spéciales et combinées: notes de cours pour étudiants spéciaux. 090300 / M.V. Nikitin; Saint-Pétersbourg. corne Saint-Pétersbourg-68 p.[in Russian].

O

- O. RIGAUD, (1998) La radioadaptation : aspects cellulaires et moléculaires d'une réponse aux faibles doses de radiations ionisantes, *Radioprotection* Vol. 33, no 4, pages 389 à 404.
- Othmanine, A. (1987). Les minéralisations en fluorine, barytine, Pb, Zn et fer sidéritique autour du fossé de Tebessa-Morsott (Algérie). Relation entre paléogéographie aptienne, diapirisme, structure et métallogénie (Doctoral dissertation, Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France).
- Outotec ., 2012. Copyright © 2012 Outotec Oyj. Tous droits réservés. Solutions de traitement des minerais d'Outotec, p 12.
- Ozyurt, O., Altinsoy, N., Karaaslan, Ş. İ., Bora, A., Buyuk, B., & Erk, İ. (2018). Calculation of gamma ray attenuation coefficients of some granite samples using a Monte Carlo simulation code. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 271-275.

P

- Pereira, O. C., & Bernardin, A. M. (2012). Ceramic colorant from untreated iron ore residue. *Journal of hazardous materials*, 233, 103-111.
- Petitprez J-F., (1996) « De la captation au dépoussiérage », *Mines et Carrières*, volume 78, pages. 51-55.

- Piédoue J., (1996)., Le dépoussiérage en carrières , Mines et Carrières, volume 78,pages 56-60.
- Pineau J. L., (1996). Application des techniques séparatives à l'échantillonnage des solides faibles teneurs en vrac (Les techniques-Mines et Carrières).
- Pohl, W., Amouri, M., Kolli, O., Scheffer, R., & Zachmann, D. (1986). A new genetic model for the North African metasomatic siderite deposits. *Mineralium Deposita*, 21(3), 228-233.
- Polkin, S. I.(1987). Enrichissement des minerais et des placers de métaux rares et précieux: études. pour les universités / S.I.Polkin. - 2e éd., Pererab. et ajouter. - M.: Nedra,. - 482 p.[in Russian].
- Puthiya Veetil Sanoop Kumar. (2014). Carbonatation directe gaz-solide des résidus miniers de serpentinite pour séquestrer chimiquement le Co2. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophiae doctor. Université du Québec, p 166.

R

- R. Jenkins, R. L. Snyder, éd.Wiley (1996).Interscience Introduction to X-ray Powder Diffraction, , , p347.
- Raddadi, M. C. (2004). Etude de la nature de la radioactivité gamma dans les roches carbonatées de plate-forme: analyses et interprétations environnementales, diagénétiques et géodynamiques (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Reed, L., & Nugent, K. (2018). The health effects of dust storms in the Southwest United States. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles*, 6(22), 42-46.
- Robert N. Cherry, Jr (2000), Encyclopédie de Sécurité et de Santé au travail,, Les rayonnements ionisants , 3e édition, chapitre 48, Organisation internationale du Travail, (ISBN 92-2-209203-1);
- Rouvier, H., Perthuisot, V., & Mansouri, A. (1985). Pb-Zn deposits and salt-bearing diapirs in Southern Europe and North Africa. *Economic Geology*, 80(3), 666-687.
- Rühm, W., Woloschak, G. E., Shore, R. E., Azizova, T. V., Grosche, B., Niwa, O., ... & Ban, N. (2015). Dose and dose-rate effects of ionizing radiation: a discussion in the light of radiological protection. *Radiation and environmental biophysics*, 54(4), 379-401.

S

- Sairanen, M., & Selonen, O. (2018). Dust formed during drilling in natural stone quarries. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(3), 1249-1262.
- Samilin, V.N.(2003). Méthodes spéciales de copaline à la cannelle / V.N.Samilin, V.S.Biletsky. - Donetsk: Skhid. vu Dim,. - 116 p.[in Russian].
- Samoilik V. G. (2015). Méthodes spéciales et combinées de traitement des minéraux: manuel de formation. – 420 p.[in Russian].

- Smati, A. (1986). Les Gisements de Pb-Ba et de Fe du JebelSlata (Tunisie du centre nord): minéralisations épigénétiques dans le Crétacé néritique de la bordure d'un Diapir de Trias, gisements de Sidi Amor Ben Salem et de Slata-Fer (Doctoral dissertation, ANRT).
- Sanjay kumar A et Sudhanshu K., (2014). Beneficiation of Iron Ore. Department of Mining Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, p 55.
- Sołtys, A., Pyra, J., & Winzer, J. (2018). The use of vibration monitoring to record the blasting works impact on buildings surrounding open-pit mines. In E3S Web of Conferences (Vol. 36, p. 02008). EDP Sciences.
- SOUBIAS, D. (1972). Contribution à l'étude minéralogique et métallogénique des gisements des carbonates des Pyrénées (Doctoral dissertation, Thèse. Univ. Paul Sabatier, Toulouse).
- Squillaro, T., Galano, G., De Rosa, R., Peluso, G., & Galderisi, U. (2018). Concise Review: The Effect of Low-Dose Ionizing Radiation on Stem Cell Biology: A Contribution to Radiation Risk. STEM CELLS.
- Stovern, M., Felix, O., Csavina, J., Rine, K. P., Russell, M. R., Jones, R. M., ... & Sáez, A. E. (2014). Simulation of windblown dust transport from a mine tailings impoundment using a computational fluid dynamics model. *Aeolian research*, 14, 75-83.
- Suhasaria, A., et Pathak, K. (2012). Application of Colour Based Ore Sorting through Image Processing. Department of Mining Engineering, Kharagpur, 6 p.
- Szabo P, Bilkei G., (2002). Iron deficiency in outdoor pig production. *J Vet Med A Physiol Pathol Clin Med*. 2002 Sep; 49(7): 390-1. PMID: 12440796.

T

- Tapia, J. S., Valdés, J., Orrego, R., Tchernitchin, A., Dorador, C., Bolados, A., & Harrod, C. (2018). Geologic and anthropogenic sources of contamination in settled dust of a historic mining port city in northern Chile: health risk implications. *PeerJ*, 6, e4699.
- Taqi, A. H., & Khalil, H. J. (2017). An investigation on gamma attenuation of soil and oil-soil samples. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(3), 252-261.
- Thibiéroz, J., & Madre, M. (1976). Le gisement de sidérite du Djebel Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de la mer aptienne. *Bull. Soc. Hist. at. Afrique du nord*, Alger, 67, 3-4.
- Tikhonov, E.E. Andreev, V.B. Kuskov, M.V. Nikitin;(2004).Méthodes d'enrichissement magnétiques, électriques et spéciales: études. avantage O.N. Saint-Petersbourg. état corne In-t - Saint-Petersbourg, - 103 p.[in Russian].
- Turaev, N.S. (2005). Chimie et technologie de l'uranium: études. manuel pour les universités / N.S. Turaev, I.I. Jerin. - M. TSNIATOMINFORM,- 407c.[in Russian].

U

- UNICEM, RGIE - Guide pratique UNPG, « Les granulats », Dossier pédagogique réalisé dans le cadre de la Convention générale de Coopération signée entre le ministère de l'Éducation Nationale et l'UNICEM, 1998.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2004), United Nations publications.
- USGS., (2008). Iron ore statistics and information. US Geological Survey Minerals Information, US Department of Interior; 2008, Available at: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron ore/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron%20ore/) [accessed on December 15, 2008].

V

- Villard, P. (1899). Sur les rayons cathodiques. J. Phys. Theor. Appl., 8(1), 148-161.
- Vocabulaire de la mine souterraine, revue Industrie minière, supplément à décembre 1982.

Y

- Yellishettya M., Mudd G., Mason L., Mohr S., Prior T., Giurco D., (2012). Iron resources and production: technology, sustainability and future prospects. Department of Civil Engineering, Monash University, p 60.
- Yi, Z. L., Sun, H. H., Wei, X. Q., & Li, C. (2009). Iron ore tailings used for the preparation of cementitious material by compound thermal activation. International journal of minerals, metallurgy and materials, 16(3), 355-358.
- Yu.O.Fyodorov, O.V.Korenev, V.A.Korotkevich (2006). Expérience et pratique de la séparation radiométrique aux rayons X (RRS)[in Russian].

Résumé :

La mine de l'Ouenza produit annuellement deux Millions de tonne de stériles francs, ces derniers sont entreposés en surface sous forme d'empilements dans différentes décharges à proximité des sites d'exploitation de la mine à ciel ouvert. La gestion de ces stériles constitue un défi environnemental car il présente un danger pour la région car ils provoquent un problème de gestion et d'occupation de surface dans la mine.

La plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement résultent d'une combinaison de l'éventuel mouvement dans l'espace de ses particules solides et du potentiel de ses composants chimiques sur la pollution du site.

L'objectif de cette étude consiste à caractériser et valoriser ces stériles issus des différentes décharges par méthodes physiques et par voie sèche. Cependant des échantillons représentatifs sont prélevés sur site pour connaître et identifier les différents composants constituant les stériles francs de la mine de l'Ouenza et leurs propriétés physico-chimiques. L'observation macroscopique révèle trois catégories de matériaux constituées de fer hématitique représentant 15%, de marne 35%, et de calcaire 50%.

Pour identifier ces stériles, une caractérisation est réalisée par DRX des différentes catégories et de l'échantillon initial, l'analyse chimique des trois catégories de matériaux issus des stériles francs de la mine de fer de l'Ouenza par FX. Les résultats obtenus montrent que la composition minéralogique comporte : la calcite, le quartz et l'hématite. Des essais de mesure du coefficient d'atténuation massique des échantillons des stériles francs par transmission d'un faisceau gamma en géométrie mince sont réalisés. L'atténuation est étudiée pour les énergies 122 KeV, 244KeV, 344 KeV et 661 KeV émises par les sources ponctuelles de ^{152}Eu et de ^{137}Cs respectivement.

Les meilleurs résultats sont atteints avec l'épaisseur des échantillons comprise entre 50 et 90 mm et une gamme des énergies comprise entre 122 et 661 KeV, ceci contribue fortement à la séparation radiométrique des stériles francs de la mine de fer de l'Ouenza. De ce fait, ce travail de recherche réside dans la possibilité d'application du procédé radiométrique utilisant les rayons gamma. Par conséquent, la teneur en fer dans le minerai de fer traité par ce procédé peut atteindre 67.13%.

Mots clés : minerai de fer, Ouenza, stériles francs, radiométrie, rayons gamma.



ABSTRACT

The Ouenza mine produces an annual two million tons of waste rocks, the latter being stored at the surface in the landfills at various dumps near the mining sites of the open pit mine. The management of these waste rocks is an environmental challenge because it poses a danger for the region because it causes a problem of management and surface occupation in the mine.

Most impacts that a mine residue can have on the environment result from a combination of the possible movement in space of its solid particles and the potential polluting capacity of its chemical components.

The objective of this study is to characterize and valorize these waste rocks from different landfills by physical and dry methods. However, representative samples are collected on site to know and identify the various components constituting the waste rocks of the Ouenza mine and their physicochemical properties. The macroscopic observation reveals three categories of materials consisting of hematite iron representing 15%, marl 35%, and limestone 50%.

To identify these waste rocks, a characterization is carried out by XRD of the various categories and the initial sample, the chemical analysis of the three categories of materials from the free waste rock of the Ouenza iron mine by FX. Tests for measuring the mass attenuation coefficient of free-waste samples by transmission of a gamma beam in thin geometry are carried out. Attenuation is studied for 122 KeV, 244KeV, 344 KeV and 661 KeV energies emitted by point sources of ^{152}Eu and ^{137}Cs , respectively.

Different raw samples are analyzed by DRX and FX. The results obtained show that the mineralogical composition includes: calcite, quartz and hematite. The best results are achieved with the thickness of samples between 50 and 90 mm and a range of energies between 122 and 661 KeV, this contributes greatly to the radiometric separation of waste rocks from the iron mine of Ouenza. Therefore, this research work lies in the possibility of applying the radiometric method using gamma rays. As a result, the iron content in the iron ore processed by this process can reach 67.13%.

Key words: iron ore, Ouenza, sterile francs, radiometry, gamma rays.

ملخص

يُنتج منجم الحديد بالونزا مليون طن سنوياً من نفايات الصخور، ويتم تخزين الأخيرة على السطح في شكل مكسبات في مقالع مختلفة بالقرب من مواقع التعدين في منجم الحفرة المفتوحة. تعتبر إدارة هذه النفايات الصخرية تحدياً بيئياً لأنها تشكل خطراً على المنطقة لأنها تسبب مشكلة في الإدارة والمساحات في المنجم.

تنتج معظم التأثيرات التي يمكن أن تحدثها مخلفات الصخور على البيئة من مجموعة من الحركة المحتملة في الفضاء لجزيئاتها الصلبة والقدرة الملوثة المحتملة لمكوناتها الكيميائية. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد خصائص هذه النفايات الصخرية وتقييمها من مدافن النفايات المختلفة بالطرق الفيزيائية والجافة. ومع ذلك، يتم جمع عينات تمثيلية في الموقع لمعرفة والتعرف على المكونات المختلفة التي تشكل منجم الحديد بالونزا والخصائص الفيزيائية الكيميائية. يكشف الفحص المجهر عن ثلاث فئات من المواد المكونة من حديد الهيماتيت تمثل 15%، المارل 35%، والحجر الجيري 50%.

لتحديد وتنفيذ هذه الصخور العقيمة، وتوصيف بواسطة XRD وفئات مختلفة من العينة الأولية، التحليل الكيميائي من الفئات الثلاث من المواد الصخور العقيمة من منجم الحديد بالونزا التي كتبها FX. يتم إجراء اختبارات لقياس معامل التوهين الجماعي لعينات النفايات الحرة عن طريق إرسال حزمة جاما في الهندسة الرقيقة. تتم دراسة التوهين لـ 122 كيلو فولت، و 244 كيلو إلكترون فولت، و 344 كيلو إلكترون فولت، و 661 كيلو إلكترون فولت من الطاقة المنبعثة من مصادر نقطية من ^{152}Eu و ^{137}Cs ، على التوالي.

يتم تحليل العينات الخام المختلفة بواسطة DRX و FX. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن التركيبة المعدنية تشمل: الكالسيت والكوارتز والهيماتيت. يتم تحقيق أفضل النتائج مع سمك العينات ما بين 50 و 90 ملم ومجموعة من الطاقات بين 122 و 661 كيلو إلكترون فولت، وهذا يساهم إلى حد كبير في قياس الإشعاع للصخور العقيمة لمنجم الحديد بالونزا. ولذلك، فإن هذا البحث يكمن في إمكانية تطبيق طريقة قياس الإشعاع باستخدام أشعة غاما. نتيجة لذلك، يمكن أن يصل محتوى الحديد في خام الحديد المعالج بهذه العملية إلى 67.13%.

الكلمات الرئيسية: معدن الحديد، الوزن، الصخور العقيمة، قياس الإشعاع، أشعة غاما.