



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET GEOLOGIQUES

DEPARTEMENT DES SCIENCES GEOLOGIQUES

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

de MASTER en Géologie

Spécialité : Ressources Minérales Et Environnement

THEME

**Caractérisation des rejets miniers du complexe minier de
Kherzet Youcef (Sétif)**

Encadré par :

M. ISSAAD.M

Réalisé par :

DORE MATHE EMMANUEL

OUEDRAOGO BOUKARE

Soutenu publiquement le 04 Juillet 2017 devant le jury composé de :

Mme. IZRI.D	Maître-assistante	FSBSA/UMMTO	Présidente
M. ZEGHOUANE.H	Maître de conférence	FSBSA/UMMTO	Examineur
M. ISSAAD.M	Maître-assistant	FSBSA/UMMTO	Promoteur

Promotion : 2016-2017

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout puissant qui nous a donné la santé, le courage et la motivation nécessaire à la réalisation du présent travail. Nous Lui rendons également grâce pour toutes ces années d'expérience nouvelle qu'Il nous a donnée de vivre ici en terre algérienne.

Ensuite, à M. ISSAAD, notre enseignant et promoteur, nous exprimons toute notre profonde gratitude. Malgré vos occupations bien nombreuses, vous avez toujours répondu à nos fréquentes sollicitations.

Nous remercions aussi les membres du jury en l'occurrence Mme IZRI et M. ZEGHOUANE respectivement présidente et examinateur pour avoir bien voulu évaluer notre travail.

A M. AMROUCHE qui nous a apporté son aide pendant la phase d'étude microscopique, nous exprimons notre reconnaissance.

Nous remercions également Mme ABDERRAHMANE de nous avoir assisté et guidé lors de nos nombreuses séances de travaux au laboratoire de sédimentologie et d'avoir effectué les courbes cumulatives de nos analyses granulométriques.

Enfin, nous ne saurons terminer sans remercier nos professeur(e)s et le personnel du Département des Sciences Géologiques, pour tous les enseignements qu'ils nous ont procurés durant tout notre cursus universitaire.

DEDICACES

Je dédie ce présent travail

A mon Père **DORE GOPA** et ma mère **FOFANA MARCELLE** pour leur soutien incommensurable. Merci encore papa et maman d'être présent pour moi.

A mes frères et sœurs : **LOUISE, DANIEL, JACQUES, ANGE, LAZARE et PRINCESSE.**

A Mes Oncles **DAVID, APPOLINAIRE, COMTE, GEORGE** et ma tante **KEMENE**

A la famille **DORE**, la famille **GONOTEY**, la famille **TRAORE** et la famille **FOFANA.**

A mes ami(e)s d'Algérie ceux-là même qui m'ont permis de tenir bon d'une manière ou

d'une autre tout au long de ces 5 années en particulier : **A. Emmanuel, Fabrice, Anicet, Hyppolite, Dorcas, Akou, Emma, Eunice, Gbinmin, Mouna, Nibé, Vicky, Antonio, Igiraneza ; A Charles KRA et Joël KRA .**

Le meilleur pour la fin, je dédie ce travail à **DIEU** pour tous les bienfaits et toute la grâce qu'il continue de me procurer !!!

Emmanuel

DEDICACES

Je dédie mon mémoire :

A ma **Djamila** qui mérite bien plus qu'une dédicace !

A ma **mère** pour tous ses sacrifices et ses bénédictions ;

A mon **père** pour avoir été là depuis le commencement de cette aventure ;

A mes frères **Adama, Mahamadi** et **Inoussa** et sœurs **Aminata** et **Fatimata**, pour leurs concessions et pour leur soutien inconditionnel ;

A mon frère **Sada**, en souvenir de tous ces défis que nous avons relevés ensemble;

A mon oncle **Robert**, à sa femme **Catherine** et à leurs enfants, **mes cousines**, pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant mon cursus ;

A mon grand-père **Edmond** pour ses conseils et ses prières ;

A mon ami **KONKOBO Noaga** ;

A la communauté burkinabé de Tizi-Ouzou et de Sidi Bel Abbés ;

A mes camarades et ami(e)s de ma promotion ;

A mon ami et binôme **Doré** ;

A mon promoteur **M. ISSAAD** ;

A **M. Désiré ROUAMBA**, mon premier instituteur.

Boukaré

RESUME

L'activité minière ne va pas sans conséquences néfastes pour l'environnement. Le présent travail concerne le comportement environnemental des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef situé à Aïn Azel (Wilaya de Sétif), et plus précisément leur pouvoir générateur de drainage minier acide (DMA). C'était une mine de Pb et de Zn d'un gisement polymétallique de type Mississippi Valley Type.

Le complexe minier de Kherzet Youcef n'est plus en activité depuis 1991. Cependant, sa laverie a servi à enrichir le minerai de la mine de Chaabet El-Hamra jusqu'en 2006. Depuis lors, leurs résidus miniers sont exposés aux conditions atmosphériques dans une digue d'environ 07 ha.

Avec une granulométrie majoritairement sableuse, une minéralogie à forte dominance carbonatée, une composition élémentaire dominée par les éléments Pb et Zn, des conductivités électriques faibles, des redoxs positifs et des pHs > 7 , ces rejets miniers s'avèrent non générateurs de DMA. Cela s'explique par l'abondance des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) neutralisateurs de DMA.

Mots clés : Kherzet Youcef, rejets miniers, Pb-Zn, DMA

ABSTRACT

Mining goes with harmful consequences for environment. This work is about the environmental behavior of the tailings of the mining complex of Kherzet Youcef located at Aïn Azel (Wilaya of Setif), especially their ability to generate acid mine drainage (AMD). The commodities exploited there were Pb and Zn and the ore deposit, a Mississippi Valley Type carbonate-hosted ore deposit.

The mining complex of Kherzet Youcef is closed since 1991. However, its processing facilities (washerie) have been used to enrich the ore of the mine of Chaabet El-Hamra till 2006. Since then, their tailings are exposed to atmospheric conditions in a tailings dam of about 07 ha.


With a granularity predominantly sandy, a mineralogy dominated by carbonate minerals, an elementary composition dominated by Zn and Pb, low electric conductivities, positive redoxs and pHs > 7 , those tailings turn out to be non-acid mine drainage generators. This is due to the abundance of carbonate minerals (calcite and dolomite) that neutralize AMD right after its formation.

Key Words: Kherzet Youcef, tailings, Pb-Zn; AMD

SOMMAIRE

PARTIE I : GENERALITES	1
Chapitre I : Généralités	2
I. Introduction Générale	3
II. Problématique	4
III. But du travail	5
IV. Cadre géographique et milieu naturel	5
IV.1. Cadre géographique	5
IV.1.1. Situation géographique	5
IV.1.2. Population et Economie	6
IV.2. Milieu naturel	6
IV.2.1 Le climat	6
IV.2.2 La pédologie	6
IV.2.3 La faune et la flore	7
V. Historique des travaux.....	7
VI. Cadre géologique	7
VI.1. Géologie régionale	7
VI.2 Lithostratigraphie	9
VI.3. Géologie locale	10
VI.3.1. Localisation de la mine de Kherzet Youcef	10
VI.3.2. Lithostratigraphie du Djebel Hadjar Labiod	10
VI.3.3. Tectonique de la zone d'étude	13
VI.3.4. Minéralisation	14
VI.3.5. Hydrogéologie de la zone d'étude	14

VII.	HISTORIQUE DE LA MINE ET METHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT	15
VII.1.	Historique de la mine	15
VII.2.	Méthode d'exploitation	16
VII.3.	Méthode d'enrichissement	17
VII.4.	La digue	20
Chapitre II : Généralité sur le drainage minier acide (DMA)		22
I.	Définition	23
II.	Processus de formation du DMA	24
III.	Neutralisation du DMA	25
PARTIE II : MOYENS ET METHODES D'ETUDE		27
I.	INTRODUCTION.....	28
II.	Analyse granulométrique par tamisage à sec	28
III.	La DRX	28
IV.	La XRF	31
V.	Méthode pH de PATE	32
PARTIE III : RESULTATS OBTENUS ET DISCUSSIONS		34
I.	Résultats obtenus	35
I.1	Résultats de l'étude granulométrique	35
I.2	Résultats de l'étude minéralogique	37
a.	Etude par DRX	37
b.	Etude microscopique	38



c. Etude par XRF	38
II. Discussion	39
III. Prédiction du comportement des déchets miniers	41
III.1. pH – Conductivité	42
III.2. pH – redox	43
IV. Conclusion	44
PARTIE IV : CONCLUSION GENERALE	45
Conclusion générale	46
Bibliographie	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : localisation géographique de la zone d'étude	5
Figure 2 : Schéma structural des Maghrébides avec localisation de la zone d'étude (Wildi, 1993)	8
Figure 3 : carte géologique schématique des monts des Hodna (J. Glaçon 1967)	9
Figure 4 : Log stratigraphique du massif Hadjar Labiod (ENOF, 1990)	12
Figure 5 : Coupe hydrogéologique Schématique de la région de Kherzet Youssef (Geomine, 1990)	15
Figure 6 : Mode d'exploitation du complexe minier de Kherzet Youcef	16
Figure 7 : Réactifs de flottation de la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef	18
Figure 8 : Cellules de flottation de la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef.	19
Figure 9 : Schéma technologique de la laverie de complexe minier de Kherzet Youcef	20
Figure 10 : Digue de tailings du complexe minier de Kherzet Youcef	21
Figure 11-12 : Les effets visibles du DMA de la rivière du RIO TINTO	23
Figure 13 : Les phases de la formation du drainage minier acide.....	25
Figure 14 : Les RX dans le spectre électromagnétique	29
Figure 15 : Principe de la DRX	30
Figure 16 : Diffractomètre de poudre	30
Figure 17 : Diffractomètre de monocristal	30
Figure 18 : Différents types de Spectromètre de fluorescence X	31
Figure 19 : Principe de base de la XRF	32
Figure 20 : Appareillage utilisé dans la méthode pH de PATE	33
Figure 21 : Courbes cumulatives des échantillons KY 2, 5, KY8 et KY9.....	35
Figure 22 : Courbes cumulatives des échantillons KY10, KY12, KY13 et T 15-16.....	36

Figure 23 : Diffractogramme de la DRX	37
Figure 24 : Minéralogie des déchets miniers observée sous le microscope métallographique.....	38
Figure 25 : Sables fins	39
Figure 26 : Sables grossiers	39
Figure 27 : Minéralogie des rejets miniers de la mine de Kherzet Youcef observée sous la loupe binoculaire.....	40
Figure 28 : Graphique de la conductivité en fonction du pH	42
Figure 29 : Graphique du redox en fonction du pH.....	43



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Mécanismes et réactions de la formation du DMA	24
Tableau 2 : Les éléments majeurs des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef	38
Tableau 3 : Les éléments traces des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef	39
Tableau 4 : Les pH et les conductivités électriques des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef	42
Tableau 5 : Les pH et les redox des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef	43



LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

BRMA : Bureau de Recherches Minières de l'Algérie

Dj. : Djebel

DMA : Drainage minier acide

DRA : Drainage rocheux acide

DRX : Diffraction des rayons X

ENOF : Entreprise nationale des produits miniers non ferreux et des substances utiles

ETMs : Eléments traces métalliques

MVT : Mississippi Valley type

SMA : Société des mines d'Ampère

XRF : X-ray fluorescence



PARTIE I :

GENERALITES

CHAPITRE 1 :

GENERALITES

I. INTRODUCTION GENERALE

Sur le plan géochimique, les éléments chimiques se répartissent dans les réservoirs géochimiques (atmosphère, océan, croûte océanique, croûte continentale, manteau et noyau) dans des teneurs relativement faibles appelées clarkes. Ces teneurs naturelles assurent un équilibre géochimique. Cependant, dans les gisements les teneurs d'un ou de plusieurs éléments chimiques dépassent leurs clarkes respectives. Il s'y produit alors une perturbation locale de l'équilibre géochimique qui peut, sous l'influence d'autres facteurs, avoir des effets plus ou moins néfastes pour l'environnement.

Un gisement, généralement enfoui, est souvent ramené en surface par divers phénomènes tel que la tectonique. Et suite à l'érosion, il arrive que l'environnant autour du site soit pollué par les éléments chimiques issus du gisement ; ou qu'il y ait, en fonction de la nature du minerai et des conditions atmosphériques, du drainage rocheux acide (DRA).

Ces nuisances environnementales liées à un gisement sont accélérées et surtout amplifiées par les activités anthropiques en occurrence l'activité minière. En effet, de l'exploration au traitement en passant par le développement et l'exploitation, chaque phase du cycle de vie d'une mine est susceptible d'engendrer des problèmes environnementaux. La phase de traitement est de loin la plus polluante et le drainage minier acide (DMA) est le problème environnemental le plus important.

Le gisement exploité dans le complexe minier de Kherzet Youcef situé à Aïn Azel dans la Wilaya de Sétif, objet de notre étude, est un gisement polymétallique à Plomb-Zinc de type Mississipi Valley Type (MVT). Il est encaissé dans une formation carbonatée de nature dolomitique d'âge barrémien. Au cours des nombreuses années d'activité de la mine, plusieurs millions de tonnes de déchets miniers ont été générés et confinés sous les conditions atmosphériques, dans une aire de stockage de 07 ha, la plus grande à l'échelle nationale.

Le présent travail constitue notre projet de fin d'étude du second cycle. Il se propose, à travers un certain nombre d'analyse des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef, de juger de leur pouvoir générateur de DMA.

Bien qu'il soit généralement admis que les gisements de type MVT et/ou les déchets issus de leur mise en valeur ne produisent pas de DMA, grâce principalement au pouvoir neutralisateur d'acidité des minéraux carbonatés (calcite, dolomite), chaque site

reste tout de même unique car en effet, plusieurs facteurs tels que le climat, la pluviosité et l'hydrographie peuvent influencer considérablement le comportement environnemental des déchets miniers.

Alors l'extrapolation du comportement environnemental d'un type de gisements est spatialement limitée à une échelle régionale. Les résultats de ce présent travail peuvent donc, avec, bien entendu, une certaine marge d'erreur, être appliqués aux gisements algériens de type MVT qui se concentrent presque exclusivement dans la partie Nord du pays.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

- ❖ Une première partie consacrée aux généralités où nous abordons les cadres géographique et géologique de la zone d'étude, l'historique de la mine et les généralités sur le drainage minier acide ;
- ❖ Une deuxième partie traitant des méthodes et moyens d'étude (analyse granulométrique, DRX, XRF et Méthode pH de PATE) ;
- ❖ Une troisième partie consacrée aux résultats des différentes analyses et leurs discussions et enfin ;
- ❖ Une conclusion générale.

II. ROBLEMATIQUE

En général, le DMA ne se déclenche pas pendant l'activité de la mine ou tout de suite après sa fermeture grâce aux minéraux neutralisants (principalement les carbonates). Il peut survenir seulement lorsque ces derniers auront tous été consommés, d'où un temps de latence.

Le complexe minier de Kherzet Youcef, objet de notre étude, n'est plus en activité depuis 2006. Ses rejets miniers sont confinés dans une digue sous des conditions atmosphériques depuis au moins 11 ans pour certains (déchets de la mine de Chaabet El-Hamra) et 27 ans pour d'autres (déchets du complexe minier de Kherzet Youcef). On peut alors se demander si la nature carbonatée du stérile (encaissant) sera en mesure d'empêcher l'apparition de DMA.

III. BUT DU TRAVAIL

Le but du travail est d'estimer le pouvoir générateur d'acidité des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef. Pour ce faire, nous allons mesurer deux catégories de paramètres des rejets miniers : des paramètres de caractérisation tels que la granulométrie et la composition minéralogique et élémentaire et des paramètres de prédiction de leur comportement environnemental dont les pH, les conductivités électriques et les redox.

IV. CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

IV.1 Cadre géographique

IV.1.1 Situation géographique

Sétif est une ville d'Algérie située à 300 km à l'Est de la capitale Alger, dans une région appartenant au domaine méridional des hauts plateaux.

Mais c'est à environ 50km au Sud de Sétif dans la Frange semi-aride qu'est localisée la mine de Kherzet Youssef, notre zone d'étude. La mine est localisée sur une colline à proximité de l'agglomération d'Ain Azel qui est une Daïra de Sétif.

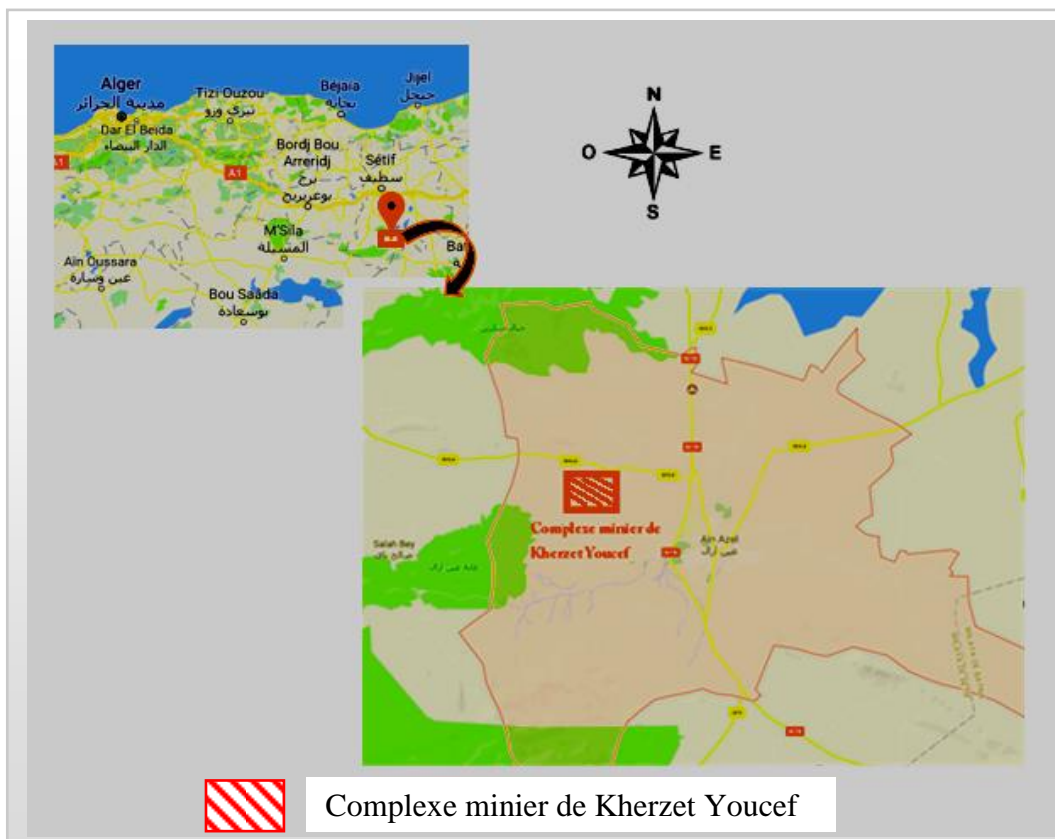


Fig.1 Localisation géographique de la zone d'étude

IV.1.2 Population et économie

Avec une densité moyenne estimée à 5 habitants par kilomètre carré, les activités économiques fars de la population de la daïra d'Ain Azel sont l'agriculture dominée par les cultures maraichères, la culture de céréales et l'industrie représentée par le complexe minier de Kherzet Youssef et de Chaabet EL Hamra, (**Attoucheik, 2006**).

IV.2 Milieu naturel

IV.2.1 Le climat

La région de Ain Azel est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride, représenté par un hiver moyennement tempéré et par un été chaud et sec.

Dans cette région, les précipitations moyennes annuelles sont estimées à 298mm, la température moyenne est de 15°C. Le mois de Juillet est considéré comme le plus sec avec 3mm de précipitation. Le phénomène d'évapotranspiration (transfert de l'eau terrestre vers l'atmosphère par évaporation et par transpiration des végétaux) est beaucoup plus ressenti pendant cette période. De Septembre à Avril le taux d'humidité est assez homogène et peu élevé. Mais le mois de Mai est le plus humide avec 43mm de précipitation caractérisée par des pluies sous forme d'averses, (**Bousdira D., 2009**). Vu le climat qui prévaut durant cette période, il y a une possibilité de formation d'eau acide. En effet, le climat est un facteur très influent dans le processus de génération d'acidité des rejets miniers. Le DMA et la mobilité des métaux lourds sont pratiquement inexistantes en climat aride et polaire tandis qu'en zones chaudes et humides, ils constituent un danger environnemental réel, (**Geoffrey S. Plumlee and J. Thomas Nash, 1995**).

IV.2.2 La pédologie

Dans la région de Aïn Azel les sols rencontrés sont de type argileux, limono-argileux, argilo-sableux, limono-sableux et sableux. En raison de leur propriété peu perméable, ces sols sont généralement des réservoirs d'eaux de précipitation et de ruissellement favorisant l'infiltration dans les nappes souterraines, (**Bousdira D., 2009**).

IV.2.3 La faune et la flore

La faune de notre zone d'étude est généralement représentée par plusieurs espèces d'oiseaux aquatiques dont *la Tadorne de Bélon* qui est l'espèce la plus régulière. Pour ce qui est de la flore, on note la présence abondante de *la Typha angustifolia* près de l'aire de stockage du minerai et *l'Hirschfelda* qui se développe à la périphérie de la mine (Bousdira D., 2009).

V. HISTORIQUE DES TRAVAUX

L'ensemble des travaux antérieurs réalisés sur le site du complexe minier de Kherzet Youcef avaient pour but principal l'évaluation de la pollution des sols, des sédiments de l'Oued Ennza, des eaux de surface et des eaux souterraines (nappes phréatiques) par les éléments métalliques en traces (Pb, Zn, Cd). Les travaux de Medkour, (1994), de l'ANRH, (2005) et de Attoucheik, (2006), avaient tous établi l'existence d'une contamination importante des eaux et des sols par les ETM en particulier par Zn et Pb. Les teneurs de ces derniers étaient respectivement dix (10) fois et trois (3) fois supérieures aux normes, (Bousdira, 2009).

Cependant, en 2009, soit 03 ans après la fermeture de la mine de Chaabet El-Hamra dont le minerai fut enrichi dans la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef jusqu'en 2006, une nouvelle étude réalisée par Bousdira concluait à une baisse des teneurs des ETM dans les horizons superficiels (0 à 30 cm) par rapport à celles mesurées lors des études antérieures. Ceci serait lié à l'inactivité de la mine et aussi à une migration de la charge polluante vers les horizons inférieurs, ce qui constituerait un danger pour les nappes profondes, (Bousdira, 2009).

VI. CADRE GEOLOGIQUE

Afin de prédire le comportement des rejets de la mine de Kherzet Youssef, il est important de connaître la géologie de la région notamment la lithologie, les caractéristiques de la roche encaissante, la forme du gisement, l'hydrogéologie, etc..

VI.1. Géologie régionale

Géologiquement, la mine de Kherzet Youssef se localise dans les Maghrébides Nord-Est de L'Algérie, dans la bordure Nord des monts du Hodna, (voir figure ci-

dessous). Cette région est caractérisée par une vaste plaine creusée aux pieds de l'Atlas Tellien. Elle est entourée par des massifs tels que:

- La chaîne de Tarf Djedough-Mansourah
- L'anticlinal de Ouled Tebbène et le Dj Boutaleb
- le Dj Guetiane
- Le Dj Gouzi, Dj Tazila et Dj Foural.

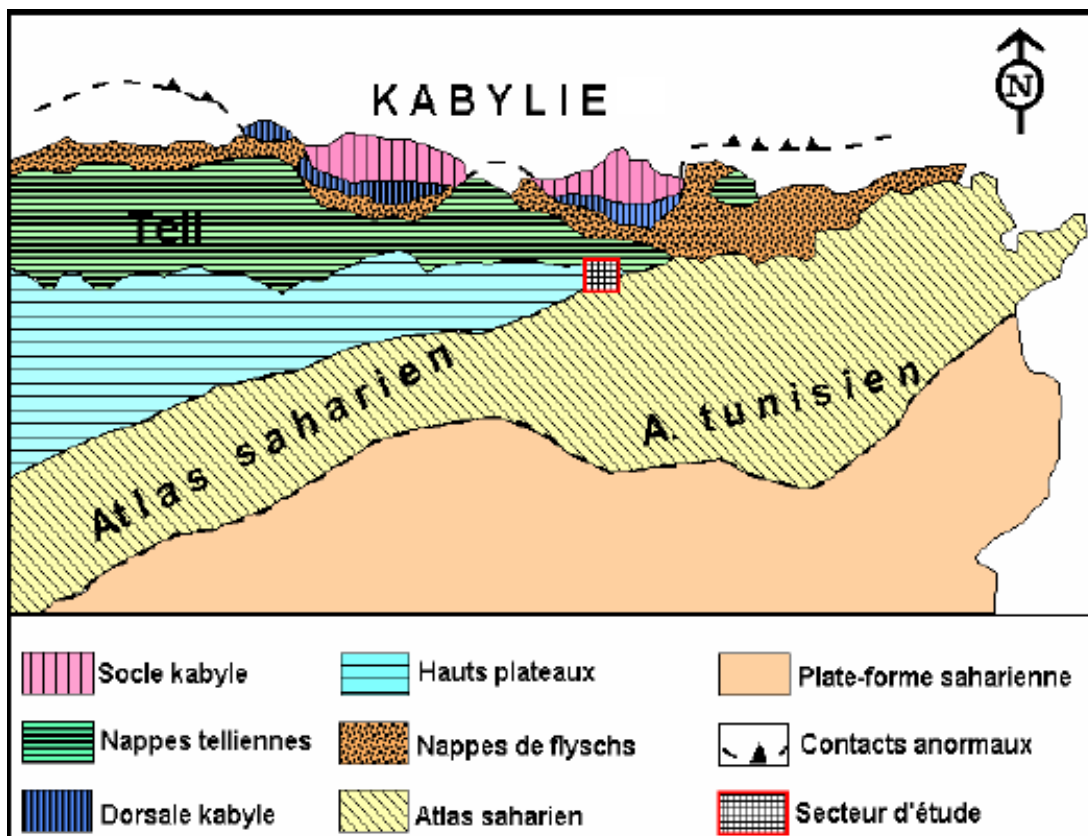


Fig.2 Schéma structural des Maghrébides avec localisation de la zone d'étude (Wildi, 1993)

Dans cette partie des Maghrébides, nous distinguons deux principaux ensembles (voir figure 3):

- Du Sud au Nord, L'autochtone essentiellement carbonaté datant du Jurassique au Crétacé reposant sur un socle plissé de la plateforme épi-hercynienne. Cet ensemble est représenté d'une part par les Dj Boutaleb et Foural dans la partie Est des monts du Hodna, et d'autre part par les dépressions de Salah Bey et Ain Azel à l'Ouest, tous 2 séparés par le Dj Hadjar Labiod.
- Dans la partie septentrionale, l'allochtone Sud Sétifien et caractérisé par des nappes de charriage sous forme d'écailles limitées par des cisaillements et

représentées par :

- L'unité inférieure du Dj Kalaoum
- L'écaille de Ain Lahdjar
- L'écaille du Dj Sékrine
- L'écaille du DJ Youssef

Le Trias observé dans certains affleurements de cette partie aurait probablement joué un rôle de "tapis roulant" lors du charriage des nappes, (Attoucheik, 2006).

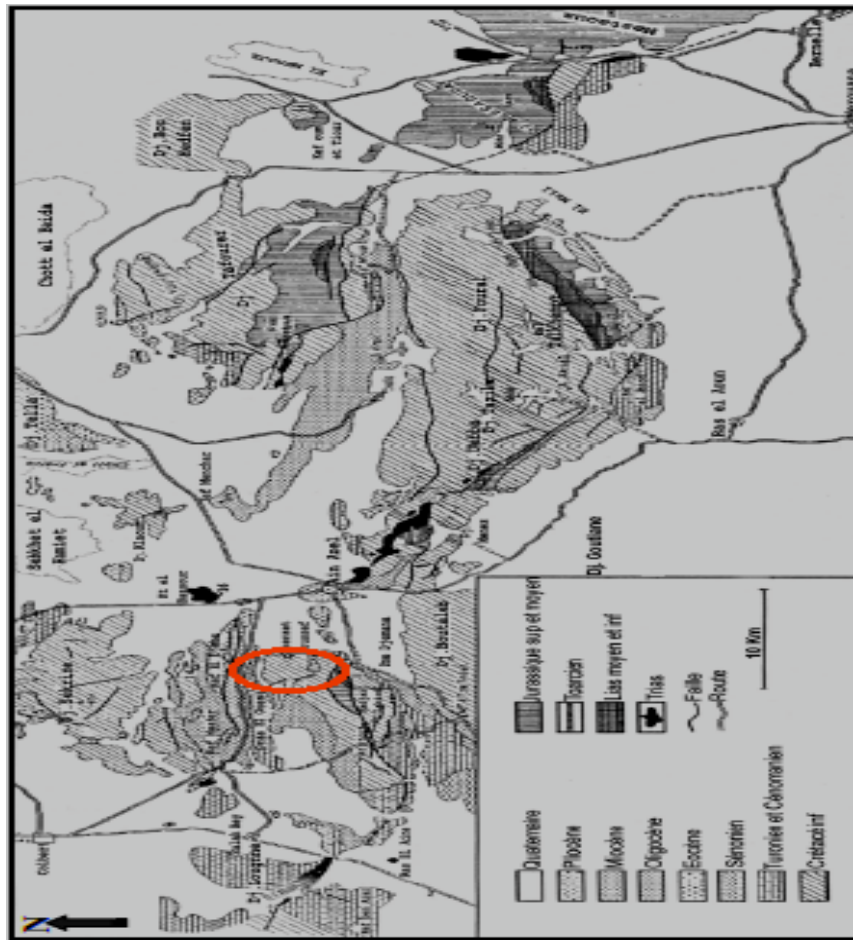


Fig.3. Carte géologique Schématique de la partie orientale des monts des Hodna (J. Glaçon, 1967)

VI.2. Lithostratigraphie régionale

Les formations lithostratigraphiques observées dans la région du Hodna sont citées ci-dessous. De la formation la plus ancienne à la formation la plus récente on a :

- Le Trias est formé d'évaporite (gypse), d'argile et marnes bariolées et des calcaires dolomitiques en lambeaux.
- Le Jurassique formé de la base au sommet de :

- Calcaires à intercalations marneuses
 - Marnes (jaunâtres, blanchâtres ou rouges violacées)
 - Dolomies et calcaires dolomitiques
 - Calcaires à intercalations marneuses
- Le Crétacé est formé d'une alternance de marnes et de marno-calcaires.
 - Le Néogène est formé quant à lui d'une alternance de conglomérats, grès, argiles, marnes et gypses dans le Miocène, et d'une alternance de conglomérats, grès, argiles et marnes dans le Pliocène.
 - Le Quaternaire débute par des alternances d'argiles, de limons et de sables. Le tout est coiffé par des alluvions (bloc à remplissage limoneux argileux, graviers et cailloux), (**Attoucheik, 2006**).

VI.3. Géologie locale,

VI.3.1. Localisation de la mine de Kherzet Youssef

La mine se situe à la limite nord des monts du Hodna. Le gisement se trouve dans une série de couches monoclinales appartenant au flanc Nord-Est du Dj Hadjar Labiod. Cette zone est séparée de la plaine d'Ain Azel par la faille Nord-Sud de Kherzet Youssef. A l'Ouest, le massif Hadjar Labiod est bordé par la plaine de Salah Bey. Au Nord, on trouve le mont de Draâ El Mais et au Sud le Dj Ain Khala, (**Attoucheik, 2006**).

VI.3.2. Lithostratigraphie du Dj Hadjar Labiod

Les formations lithostratigraphiques rencontrées à l'Ouest de la faille de Kherzet Youssef précisément au niveau du flanc Nord-Est du Dj Hadjar Labiod (Zone d'étude) sont généralement des carbonates d'âge Crétacé. L'étude lithostratigraphique fait ressortir de la base au sommet, les formations suivantes :

VI.3.2.1 Le Crétacé

Les formations de cet étage sont généralement carbonatées et sont beaucoup plus importantes dans notre zone d'étude. Elles sont représentées par :

- **Barrémien inférieur** : Il est caractérisé par une alternance de calcaires marneux gris, de marnes jaunes, de dolomies et de grès. Les niveaux dolomitiques et gréseux contiennent parfois des Gastéropodes et des Lamellibranches. Cette formation a une épaisseur d'environ 160m.
- **Barrémien Supérieur** : Composé de deux ensembles. Le premier d'une épaisseur de 130m est caractérisé par une alternance complexe de couches de grès beige, de marnes gréseuses et de calcaires zoogènes sur lequel repose le deuxième ensemble qui est représenté par une couche de calcaire à Orbitolines et Térébratules d'environ 140m d'épaisseur.
- **Aptien inférieur** : Il fait 140m d'épaisseur et commence par des marnes jaunes sur lesquelles se dépose un banc de dolomie massive de grande extension latérale qui est surmontée d'une alternance plus ou moins régulière de marnes, calcaires zoogènes et de calcaires à Orbitolines.
- **Aptien supérieur** : C'est la formation la plus épaisse (soit 320m). Elle est constituée par une intercalation de calcaires organogènes, de grès, de marnes et de calcaires marneux gris.
- **Albien** : Un net changement lithologique est observé. Cet étage est caractérisé par une alternance marno-calcaire recouverte par des terrains quaternaires faisant 175m d'épaisseur.
- **Vraconien** : Il est constitué par des grès grossiers à la base superposés par des marnes jaunes à Ammonites avec des intercalations de calcaire gréseux. Il a une épaisseur de 60m.
- **Cénomaniens** : Cet ensemble débute par une alternance de marnes et calcaire marneux et se termine par des bancs de calcaire fossilifères (300m d'épaisseur)
- **Turonien** : Cette formation a environ 120m d'épaisseur et est constituée de calcaires à restites de rudistes sur lesquels se déposent des dolomies massives à rognon de Silex.
-

VI.3.2.2. Le Miocène

Avec environ 200m d'épaisseur, il est composé du bas vers le haut par :

- Des conglomérats à fragments de calcaires et de dolomies
- Une série de calcaires gréseux à intercalations marneuses

- Des bancs métriques de dolomies
- Des calcaires à silex grisâtres n'excédant pas le centimètre

VI.3.2.3. Le Quaternaire

- Ensemble inférieur : Des marnes lacustres et des calcaires
- Ensemble supérieur : c'est le toit du massif, représenté par des alluvions grossiers intercalés de limons et sables limoneux sur lesquels se déposent d'autres formations alluvionnaires à grès et galets moins grossiers, (voir figure ci-dessous).

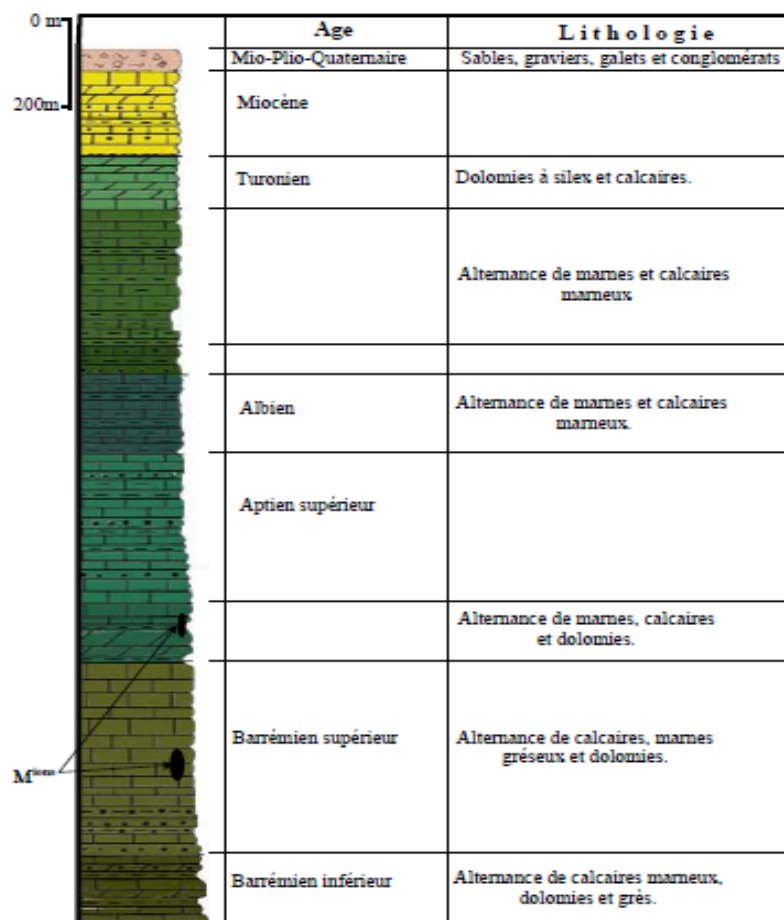


Fig.4 Log stratigraphique du massif Hadjar Labiod (ENOF, 1990)

VI.3.3. La tectonique de la zone d'étude

Le massif de Hadjar Labiod est un anticlinal d'orientation Est-Ouest. Il est découpé par des failles de direction Est-Ouest et Nord-Sud. La faille méridienne de Kherzet Youssef est la plus importante car elle est en relation directe avec le gisement. Il s'agit d'une faille normale qui joue horizontalement et verticalement. Elle pend vers

l'Est avec des angles variant de 65° à 85°, (**Attoucheik, 2006**).

Cette faille est accompagnée par des accidents secondaires cassants perturbant ainsi les séries carbonatées. Ces structures sont des canaux favorables à l'écoulement des solutions acides générées par l'activité minière vers les aquifères.

VI.3.4. La minéralisation

Le gisement de Kherzet Youssef est encaissé dans les formations barrémiennes précisément dans les roches dolomitiques. La minéralisation débute à environ 25m de la faille de Kherzet Youssef (beaucoup plus abondante) et s'étend à l'Ouest de celle-ci sur 150m suivant la direction des couches.

Le minerai se présente sous forme de sulfures avec une paragenèse simple dont les principaux minéraux métallifères sont : le cuivre gris, la pyrite, la marcassite, la galène et la sphalérite. Ces sulfures sont souvent associés à des minéraux d'oxydation.

VI.3.4.1. Les sulfures

Dans notre gisement, ce sont des minéraux pouvant générer de l'acidité, une fois qu'ils ont été enlevés de leur milieu naturel et exposés dans les conditions atmosphériques.

Les sulfures les plus fréquents sont représentés par la pyrite (FeS₂), la marcassite (FeS₂), la sphalérite (ZnS) et la galène (PbS). Ils s'observent généralement sous forme de disséminations et de filons dans la roche dolomitique. On peut aussi les retrouver au voisinage des failles sous forme massive.

L'analyse spectrale quantitative ainsi que l'analyse à la microsonde de ces minéraux ont permis de mettre en évidence les éléments en traces suivants : Zn, Ga, Ge, Ni, Co, As, Cd, Ag, Be, Fe, Pb, Mn, (**Bousdira, 2009**).

VI.3.4.2. Les minéraux de la gangue

La plupart de ces minéraux sont dites acidovores car ils agissent comme des tampons neutralisants des solutions acides lorsque les sulfures ne sont plus dans leur milieu naturel et génère de l'acidité.

Il s'agit de la calcite (CaCO₃) qui est l'acidovore le plus efficace, la lolomite (Ca, Mg)(CO₃)₂, la barytine (BaSO₄) et de la fluorite (CaFe₂).

D'après l'étude de la composition chimique des minéraux de la gangue, on

distingue les éléments suivants : MgO, MnO, FeO, Pb, Cu, Zn, Cd, Ca, S, (**Bousdira, 2009**)

VI.3.5. Hydrogéologie de la zone d'étude

Suite à l'accident survenu le 02 Juin 1990 dans la mine de Kherzet Youcef, l'étude hydrogéologique et géophysique réalisée par un bureau d'étude canadien (GEOMINE) a permis de distinguer quatre (04) nappes phréatiques dans différentes formations, de part et d'autres de la faille de Kherzet Youssef, (voir la figure 5 ci-dessous) :

- La nappe barrémienne : Elle se trouve dans un ensemble faisant environ 700m d'épaisseur et elle affleure à un niveau piézométrique d'environ 929m d'après le piézomètre H2, H3 et H7.
Comme on l'avait souligné plus haut, c'est dans les formations du Barrémien que le minerai est encaissé.
- La nappe albo-aptienne : Cette nappe aquifère se trouve dans le compartiment Est de la faille de Kherzet Youssef. Elle est constituée par des éléments poreux représentés par des formations de calcaires karstiques avec des intercalations de grès et de calcaires marneux. La nature peu perméable de la couche argilo-sableux au-dessus de la nappe albo-aptienne ainsi que la barrière étanche formée par la faille de Kherzet Youssef permet d'isoler et de piéger hydrauliquement la nappe mio-plio-quadernaire.
- La nappe mio-plio-quadernaire : Située au voisinage immédiat de la faille de Kherzet Youssef, elle se trouve dans le compartiment Est au niveau de la plaine Ain Azel. Cette nappe peut avoir une épaisseur de 250m et son niveau piézométrique était de l'ordre de + 930 m en 1982.
- L'unité D2 : C'est une nappe aquifère constitué de grès qui se trouve dans le compartiment Est de la faille de Kherzet Youssef, (**Bousdira, 2009**).

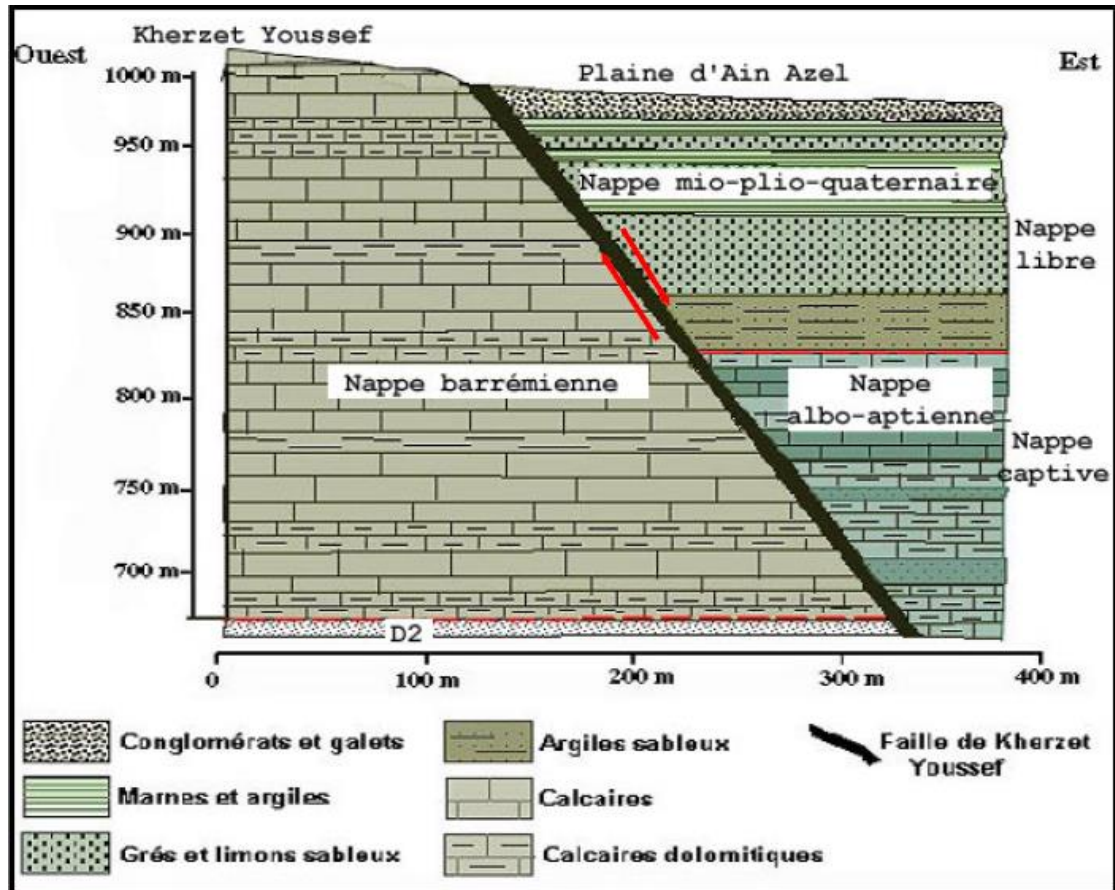


Fig.5 Coupe hydrogéologique Schématique de la région de Kherzet Youssef (Geomine, 1990)

VII. HISTORIQUE DE LA MINE ET METHODES D'EXPLOITATION ET DE TRAITEMENT

VII.1 Historique de la mine

L'histoire du complexe minier de Kherzet Youcef remonte à plus d'un siècle. Le gisement a été découvert en 1899 à partir d'affleurements de « chapeaux de fer ».

L'exploitation a consisté dans un premier temps à l'extraction du minerai oxydé jusqu'en 1906. Ensuite celle du minerai sulfuré s'est faite, par intermittence, jusqu'en 1954 par la Société des Mines d'Ampère (SMA) via le puits n°1 entre les côtes 938 et 920m.

Une étude géologique du gisement par des sondages miniers réalisée par le B.R.M.A. entre 1953 et 1963 a permis d'estimer son tonnage à 1.6 Mt et ses teneurs à 18.4% Zn et 3.6% Pb (Bousdira, 2009).

En 1963, une entreprise yougoslave (RUDIS) reprend les travaux d'exploitation en ouvrant le puits n°3 (238.5m) à la côte 835m, avec un débit d'eau de 420m³/h, l'ennoyage du site survint en 1971.

En 1975, une société bulgare, (Bulgargeomine) entama le dénoyage, et poursuivit l'exploitation par le puits n°3 de 1979 à 1987 entre la cote 835 et 775m avec un débit hydrique de 740m³/h.

Après 1987, les réserves exploitables se sont épuisées et la proximité de la nappe phréatique grésosableux (cote 672m) empêcha l'approfondissement du puits n°3 (**Attoucheik, 2006**).

Le 02 Juin 1990 le complexe minier de Kherzet Youcef fut inondé à cause d'un débit hydrique de 36000 m³.h⁻¹. Cette catastrophe coûta la vie à 19 mineurs et sonna en même temps les cloches de la fermeture de la mine. Cependant, la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef fut utilisée pour la concentration du minerai de la mine de Chaâbet El Hamra, située à 12 kms au Sud-Est du complexe minier de Kherzet Youcef entre 1994 et 2006, (**BOUSDIRA D., 2009**).

VII.2 Méthode d'exploitation

L'exploitation du complexe minier de Kherzet Youcef a été effectuée par voie souterraine, (voir figure ci-dessous).



Fig.6 Mode d'exploitation du complexe minier de Kherzet Youcef

VII.3 Méthode d'enrichissement

Le traitement du minerai se faisait flottation. Cette dernière consiste à ajouter à la pulpe, des produits chimiques jouant chacun un rôle bien déterminé, à extraire les particules minérales désirées par fixation de ces dernières à des bulles d'air qui les ramènent en surface en formant une mousse. Pour ce faire, les particules minérales doivent être de taille fine. Des phases mécaniques de concassage et de broyage préalables sont alors indispensables.

Les réactifs utilisés dans ce procédé sont de quatre catégories, (voir figure 7 ci-dessous) :

- **Les collecteurs** : Ils imprègnent les surfaces minérales et donnent ainsi aux particules minérales les propriétés d'adhésion aux bulles d'air. En d'autres termes, ils les rendent aérophiles (ou hydrophobes).
- **Les moussants** : Ils augmentent la durée de vie des bulles d'air à la surface de la pulpe, leur permettant ainsi de rester stables assez longtemps pour être collectées. Sans eux, les bulles s'éclateraient et leur charge minérale retomberait dans la pulpe.
- **Les déprimants** : Ces composés chimiques inorganiques ont la capacité de rendre une substance donnée non-flottable même en présence d'un collecteur approprié. Les déprimants sont ceux utilisés pour déprimer la blende et la pyrite. Ils permettent alors de flotter la galène
- **Les activants** : Ils ont une action contraire à celle des déprimants. Ils rendent flottable une substance déprimée. Ils sont introduits après la flottation de la galène pour flotter la blende, (**D. V. Subba Rao, 2011**).

Type de réactifs	Nom des réactifs
Collecteurs	-Aerofloat (acide crésylthiophosphorique) -Les Xanthates $S=C$ <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; margin-left: 10px;"> $\begin{array}{l} \text{OR} \\ \text{SX} \end{array}$ </div> R : radical X : K ou Na
Les moussants	-Huile de pin (20-80 g/T de minerai traité) -Crésol (50-200g/T de minerai traité)
Les déprimants	-Le cyanure de sodium -La chaux -Les chromates et les bichromates -Le silicate de soude
Les activants	-Le sulfate de cuivre $CuSO_4$

Fig.7 Réactifs de flottation de la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef (Y. Boulkrouche, 1994)

A Kherzet Youcef le minerai passait par les trois étapes suivantes :

- **La préparation mécanique à sec** : Après avoir subi un pré-criblage à 80mm, un concassage primaire et un criblage, le tout-venant (granulométrie de 0 à 350mm en moyenne) est réduit à une granulométrie de 0 à 15mm.
- **Broyage-classification** : A cette étape, le minerai est broyé par un broyeur à boulets muni d'un classificateur à spirale.
- **Flottation-filtration** : Le dispositif compte en tout quarante machines dont quatorze pour la flottation du Plomb, 18 pour Zinc et 8 pour le relavage. Le concentré en Pb

et en Zn, récupéré à partir des mousses du troisième relavage, renferme 35% en Pb et 53% en Zn avec un taux de récupération de 88%, (**Attoucheik, 2006**). La figure 8 ci-dessous montre les unités de flottation et les broyeurs.



Fig.8 Cellules de flottation de la laverie du complexe minier de Kherzet Youssef

La figure 9 (ci-dessous) résume le mécanisme d'enrichissement du minérai de la mine de Kherzet Youcef.

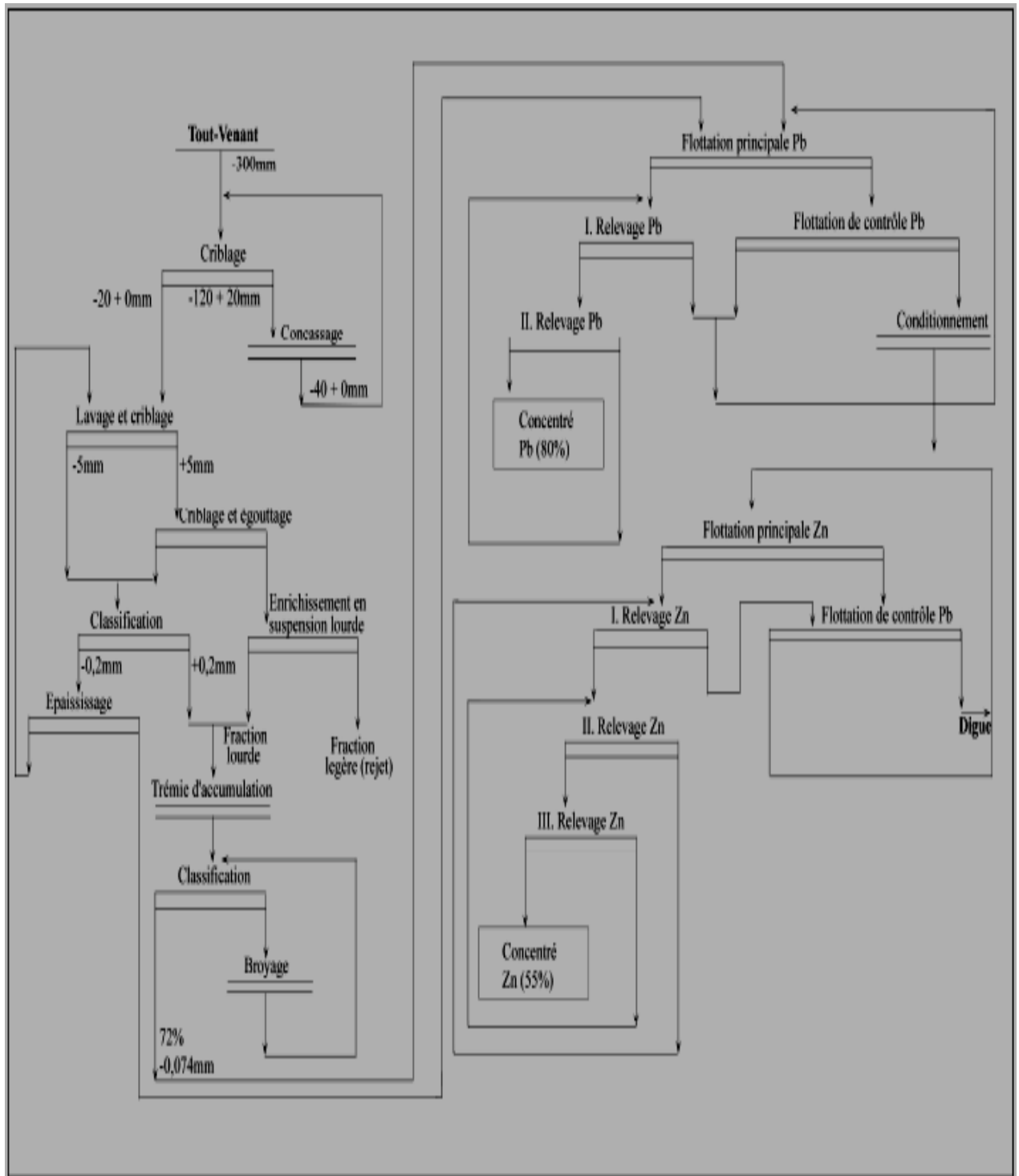


Fig.9 Schéma technologique de la laverie de complexe minier de Kherzet Youcef (BOUSDIRA D., 2009)

VII.4 La digue

Avec une superficie d'environ sept hectares et un volume estimée à 5600 m³, l'aire de stockage des rejets miniers du complexe de Kherzet Youcef est la plus grande digue en Algérie, (voir figure ci-dessous). A partir des données de production de la

mine entre 1979 et 1989 (92 180 t de Zinc métal et 15 318 t de Plomb métal (ATTOCHEIK, 2006)) et de la teneur en Zinc et Plomb du minerai (respectivement 8.29% et 0.92%), nous avons pu estimer une quantité du tout-venant qui est de l'ordre de 1 167 187. 839 t ; soit une quantité de rejets miniers de 1 059 689. 839 t au cours de la même période (10 ans) d'activité. A ces déchets s'ajoutent ceux des activités antérieures de la mine et ceux de la mine de Chaabet El-Hamra dont le minerai fut enrichi dans la laverie du complexe minier de Kherzet Youcef jusqu'en 2006.



Fig.10 Digue de tailings du complexe minier de Kherzet Youcef

CHAPITRE 2 :
GENERALITE
SUR LE
DRAINAGE
MINIER ACIDE
(DMA)

I. DEFINITION

Le drainage minier acide (artificiel) ou drainage rocheux acide (naturel), est un phénomène chimique et biologique qui conduit à la production d'eau acide suite à l'oxydation des sulfures métalliques. Théoriquement, cette oxydation résulte des réactions chimiques et biologiques dues à l'exposition à l'eau et à l'air (conditions atmosphériques) des minéraux sulfureux acidogènes tels que : la pyrite, la marcassite, l'arsénopyrite, la pyrrhotite. Ces réactions libèrent des substances dans le milieu entraînant par la suite la précipitation des métaux lourds tels que (Zn, Pb, As, Cd...) solubles lorsque le pH est bas, (**Aubertin et al., 2002**).

Mais en pratique, il faut signaler l'intervention de la bactérie *Thiobacillus ferrooxidans* (omniprésente dans les eaux des mines) en tant que catalyseur de certaines réactions dans la formation d'eaux acide.

Les rejets du concentrateur qui n'ont pas été utilisés comme remblais sous terre lors de l'exploitation de la mine sont entreposés à la surface dans des aires de stockage, et c'est ceux-là même qui sont d'autant plus susceptibles de générer du DMA. Composés de roches finement broyées, ces rejets exposent ainsi aux conditions atmosphériques d'importantes surfaces de grains de minéraux sulfureux amplifiant les processus de DMA.

Les effets du drainage minier acide sont facilement distinguables à l'œil nu, (voir les figures 11 et 12 de la page suivante) et sont caractérisés par des précipités jaune-rougeâtres d'hydroxyde ferrique sur les lits des cours d'eau, dégradant ainsi le milieu aquatique, (**Sylvie B, 1993**).



Fig.11



Fig.12

Les effets visibles du drainage minier acide de la rivière Rio Tinto, Espagne

II. PROCESSUS DE FORMATION DU DMA

La pyrite, étant le sulfure de fer le plus commun et le plus acidogène dans les rejets miniers, sera utilisé comme exemple dans le tableau ci-dessous pour les différentes réactions chimiques et biologiques liées au processus de formation de DMA, (BOUSDIRA 2009).

Mécanismes	Réactions
Oxydation directe de la pyrite par l'oxygène produisant des sulfates du fer ferreux et de l'acidité	(1) $2FeS_2 + 2H_2O + 7O_2 \Rightarrow 2Fe^{2+} + 4SO_4^{2-} + 4H^+$
Le (Fe^{2+}) libéré par l'oxydation de la pyrite est oxydé par l'oxygène en fer ferrique (Fe^{3+}). Cette oxydation peut être catalysée par la bactérie <i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	(2) $2Fe^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \Rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O$
A un pH > 3 le (Fe^{3+}) précipite sous forme d'hydroxyde ferrique en libérant d'avantage d'acidité	(3) $Fe^{3+} + 3H_2O \Rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+$
A un pH ≤ 3 la réaction ci-dessus ne se produit plus. Le (Fe^{3+}) va alors rester en solution et va oxyder la pyrite. C'est une réaction d'oxydation indirecte de la pyrite par le (Fe^{3+}). Elle est beaucoup plus acidogène.	(4) $FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \Rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$
L'équation globale de la génération du DMA	$FeS_2 + 15O_2 + \frac{7}{2}H_2O \Rightarrow Fe(OH)_3 + 2H_2SO_4$

Tableau.1 Mécanismes et réactions de la formation du DMA

Le processus de génération de DMA s'effectue suivant un ordre logique défini dans le temps et que l'on peut regrouper en trois phases :

- Les phases I et II se déroulent à des pH suffisamment élevés. L'oxydation directe de la pyrite par l'eau et le dioxygène produit du Fe^{2+} . Ensuite ce dernier s'oxyde pour donner du Fe^{3+} qui, à son tour réagit avec l'eau pour produire de l'hydroxyde de fer et des ions H^+ .
- Le milieu devient de plus en plus acide et le pH baisse régulièrement. Quand celui-ci devient ≤ 3, le Fe^{3+} en solution oxyde la pyrite et cette réaction génère beaucoup plus d'ions H^+ et par conséquent le milieu devient très acide. C'est la phase III. Toutes ces phases sont résumées dans la figure suivante :

-

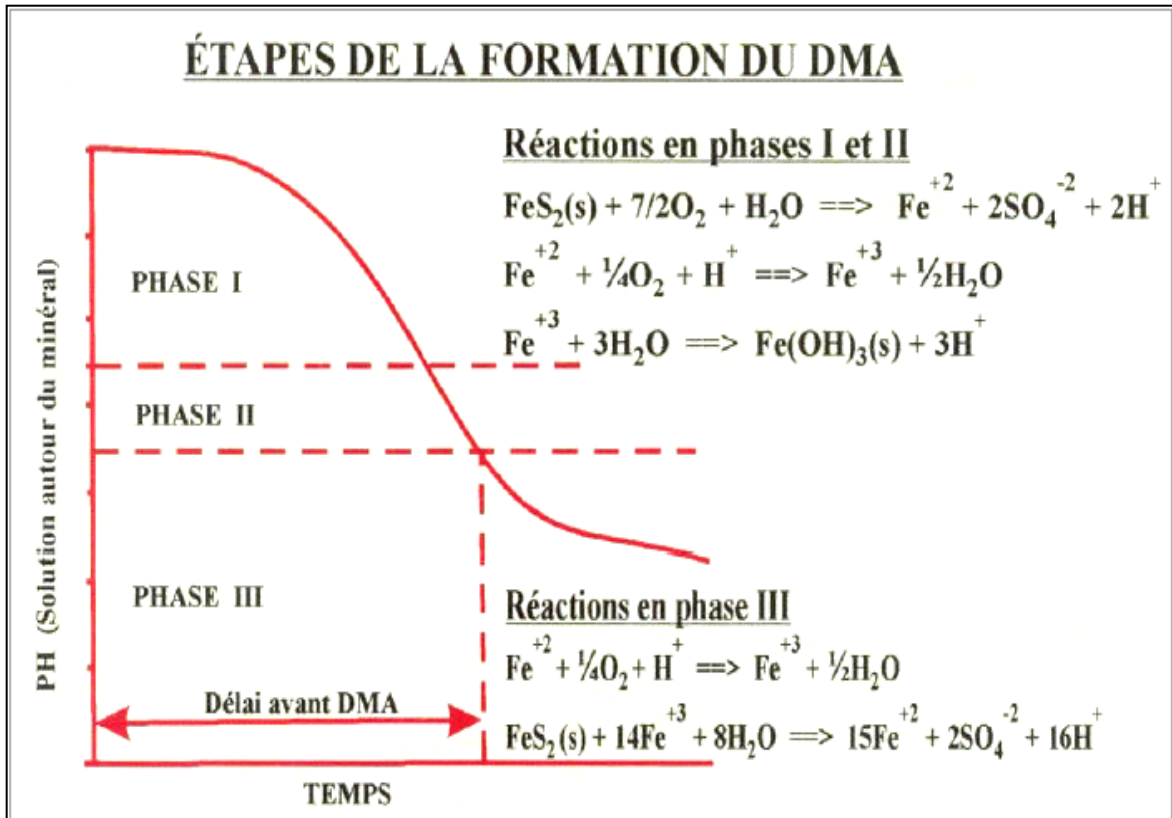


Fig. 13. Les phases de la formation du drainage minier acide

En réalité, le processus de génération de DMA est régi par plusieurs facteurs rendant complexe son mécanisme de production d'eau acide : la disponibilité de l'oxygène, la température, le pH, la conductivité, l'activité chimique du (Fe^{3+}), la présence d'éléments en trace, l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher le processus de génération d'acide, la granulométrie, l'aire de stockage des sulfures métalliques, (Sylvie B, 1993).

En plus de ces facteurs, viennent s'ajouter des minéraux acidovores présentes dans la gangue, qui par leur disponibilité et/ou leur abondance, arrivent à annihiler le processus de génération de DMA.

III. NEUTRALISATION DU DMA

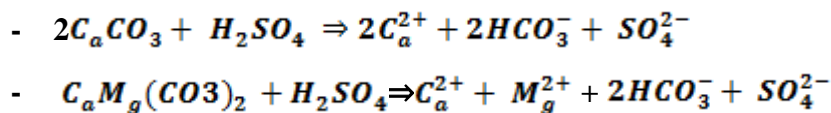
Il existe plusieurs façons de neutraliser le processus de production d'eau acide qui sont regroupées en deux catégories. La première est réalisée de façon naturelle

lorsque le DMA est en cours de formation, alors que la deuxième nécessite l'action de l'homme dans ce cas le DMA a déjà été produit.

Dans le premier cas, les minéraux acidovores présents dans la plupart des rejets miniers peuvent annihiler le mécanisme de génération des acides. Il s'agit des carbonates en l'occurrence de la calcite (le plus efficace) (C_aCO_3), la dolomite ($C_aM_g(CO_3)_2$) et l'ankérite ($C_aMnM_g(CO_3)_2$).

En effet, ces carbonates lorsqu'ils sont en quantité suffisante, neutralisent l'acide résultant de l'oxydation des sulfures évitant ainsi, la baisse du pH qui favorise le développement des Thiobacilles.

Le mécanisme de neutralisation de l'acide sulfurique (issu de l'oxydation des minéraux acidogènes) par la calcite et la dolomite sont illustrés par les équations ci-dessous :



Ces réactions donnent lieu à la production de bicarbonate (HCO_3^-) et de sulfate (SO_4^{2-}).

Concernant la deuxième catégorie, plusieurs procédés existent pour pouvoir traiter les eaux acides. Nous avons les méthodes comme :

- l'extraction par solvant ou par électrolyse
- la distillation
- l'osmose inverse
- la neutralisation chimique
- Ozonisation, (Sylvie B, 1993).

PARTIE II :
MOYENS
ET METHODES
D'ETUDE

I. INTRODUCTION

La capacité des rejets miniers à générer du drainage minier acide dépend de plusieurs de leurs propriétés physico-chimiques telles que leur granularité, leur composition minéralogique et élémentaire. On peut aussi prédire le comportement des rejets miniers en mesurant leurs pH, leur redox et leurs conductivités électriques. A cet effet, cette section présente les méthodes et moyens employés dans la présente étude pour la caractérisation des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef.

II. ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE SEC

L'analyse granulométrique par tamisage à sec est une méthode analytique qui permet d'étudier la granularité d'un échantillon. Autrement dit, la distribution dimensionnelle des grains. Avant d'aborder le mode opératoire, des définitions de quelques termes techniques propres à la méthode nous semblent nécessaires :

- **Le tamisat** : C'est la quantité de matériaux passée à travers un tamis.
- **Le refus** : C'est la quantité retenue par un tamis.
- **Le refus cumulé** : C'est la somme de tous les refus du tamis, c'est-à-dire le refus du tamis lui-même plus ceux des tamis de mailles supérieures. Le refus cumulé est exprimé en pourcentage (%) ou en gramme.

Le mode opératoire est simple. Il consiste à classer les grains de l'échantillon à l'aide d'une série de tamis emboîtés les uns dans les autres avec des dimensions de mailles décroissantes de haut en bas. L'échantillon est préalablement séché à l'étuve et désagrégé. Il est ensuite placé dans le tamis du haut et par vibration, on répartit les grains dans les différents tamis en fonction de leur grosseur, (voir figure ci-dessous).

Le refus de chaque tamis est pesé et le refus cumulé est calculé, (**GHOMARI F. et BENDI-OUIS A., 2008**).

III. LA DRX

Les rayons-X (RX) sont un rayonnement électromagnétique invisible à l'œil nu et dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0.1Å et 100Å ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$). Dans le spectre électromagnétique ils sont compris entre les rayons gamma et les UV, (figure 14).

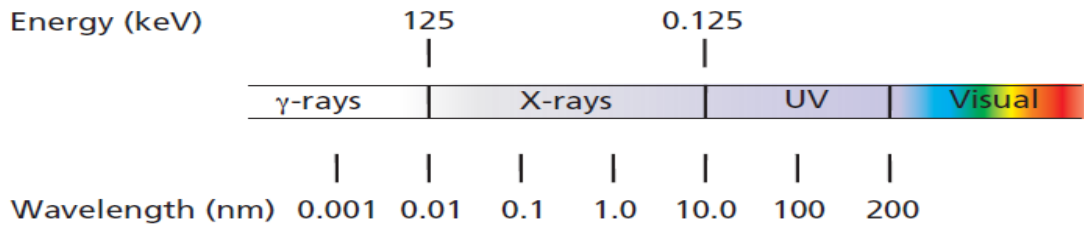


Fig.14 Les RX dans le spectre électromagnétique

Définition : La Diffraction aux Rayons X (DRX), également appelée radiocristallographie est définie comme la diffraction d'un faisceau monochromatique de RX par la matière cristalline. La technique consiste à envoyer un faisceau monochromatique de RX sur un échantillon en poudre ou en plaquette solide et un détecteur fait le tour pour mesurer l'intensité des rayons X réfléchis selon la direction. Elle utilise les RX dont $0.5 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 2.5 \text{ \AA}$ et n'est pas utilisable sur la matière amorphe, **(Pierre G., 2012)**. La DRX a pour but l'identification des phases minérales présentes dans l'échantillon. Dans le présent travail, elle a été employée pour déterminer la composition minéralogique des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef.

Principe : En rappel, un cristal est un agencement périodique tridimensionnel d'atomes ou de molécules disposés selon les plans réticulaires. Ces derniers se regroupent en familles repérée chacune par son indice de Miller (hkl). Les plans réticulaires d'une même famille sont séparés par une distance inter-réticulaire **d**.

Lorsqu'un échantillon est bombardé par un faisceau de RX, on obtient une diffraction lorsque la condition de Bragg est satisfaite, (fig. 15) :

$$2d\sin\theta = n\lambda, \text{ où}$$

θ est l'angle d'incidence,

n est un nombre entier appelé «ordre de diffraction», et

λ est la longueur d'onde des rayons X

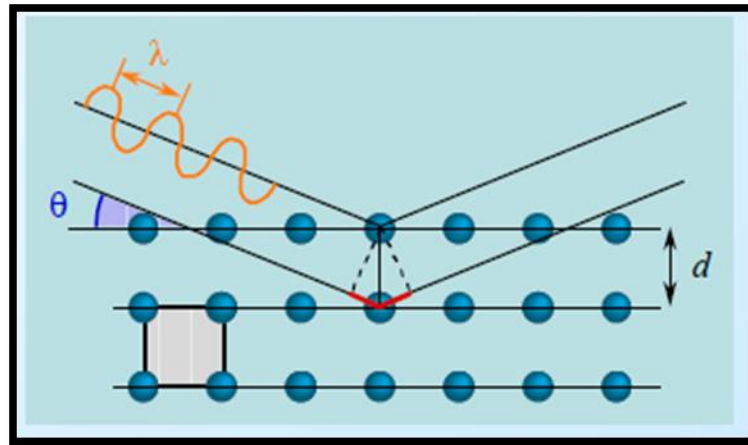


Fig.15 Principe de la DRX

A l'angle 2θ , chaque plan réticulaire, selon son orientation, réfléchit le rayonnement avec une intensité qui lui est propre et constitue alors sa signature spectrale. La DRX consiste donc à enregistrer les différentes signatures spectrales des plans réticulaires d'un échantillon et à l'aide de l'équation de Bragg à calculer les distances inter-réticulaires et ainsi de déterminer les familles de plans présentes dans l'échantillon, (LADJALI H., 2011).

Appareillage : L'appareil utilisé en DRX se nomme diffractomètre. Il en existe deux types selon que l'échantillon soit en poudre ou un solide, (fig. 16 et 17).

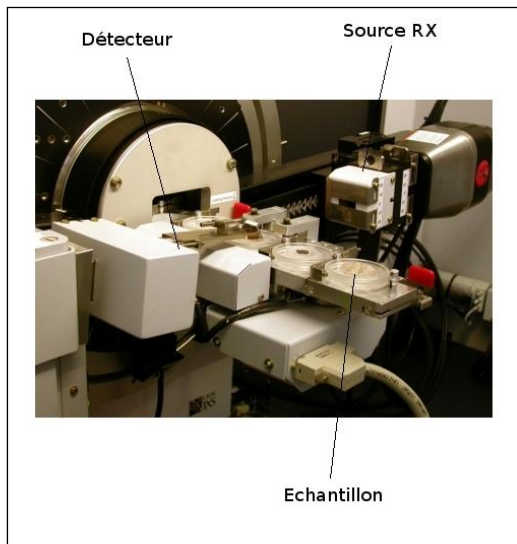


Fig.16 Diffractomètre de poudre

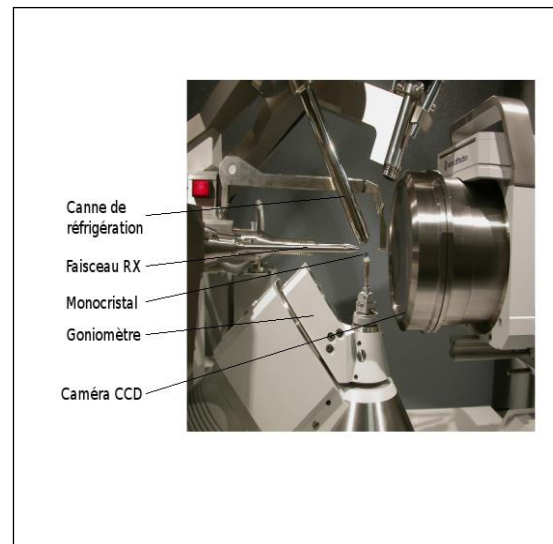


Fig.17 Diffractomètre de monocristal

IV. LA XRF

La spectrométrie de fluorescence X ou SFX, (en anglais : XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode analytique qui permet de déterminer la composition élémentaire d'un échantillon. A la fois qualitative et quantitative. Elle est entre autre utilisée pour l'analyse des éléments majeurs et des éléments en traces. La XRF est également employée pour l'analyse des sols en vue de quantifier ou de détecter des éléments polluants, (**Karl W. et Andy B., 2017**)

Appareillage : Le spectromètre de fluorescence X comporte à la base trois unités : une source de rayons-X (tube à rayons-X), un échantillon et un détecteur. On rencontre des spectromètres de fluorescence X portatifs utilisables directement sur le terrain et des spectromètres de fluorescence X de laboratoire, (voir fig. 18) (**Philippe B. et al. 2013**).



Fig.18 Différents types de Spectromètre de fluorescence X

Principe : Le principe de base de cette méthode repose sur le comportement des atomes de la matière lorsqu'ils sont bombardés par un faisceau de rayons X de forte intensité. En effet, le faisceau de rayons X incident est partiellement absorbé par l'échantillon. Par interaction avec ce dernier, Les atomes entrent dans une phase d'excitation en s'ionisant. Lorsque la radiation incidente est suffisamment énergétique ; c'est-à-dire ayant une énergie supérieure à l'énergie de liaison entre l'électron et le noyau de l'atome, il y a éjection d'électrons des couches internes (K, L) et subséquemment une déstabilisation de la structure atomique.

Pour retrouver la stabilité, des électrons des couches externes viennent remplacer ceux manquants sur les couches internes. Ces transitions orbitales sont accompagnées

d'émissions d'une radiation X appelée radiation fluorescente. C'est cette dernière qui est captée et enregistrée par le détecteur, (Karl W. et Andy B., 2017).

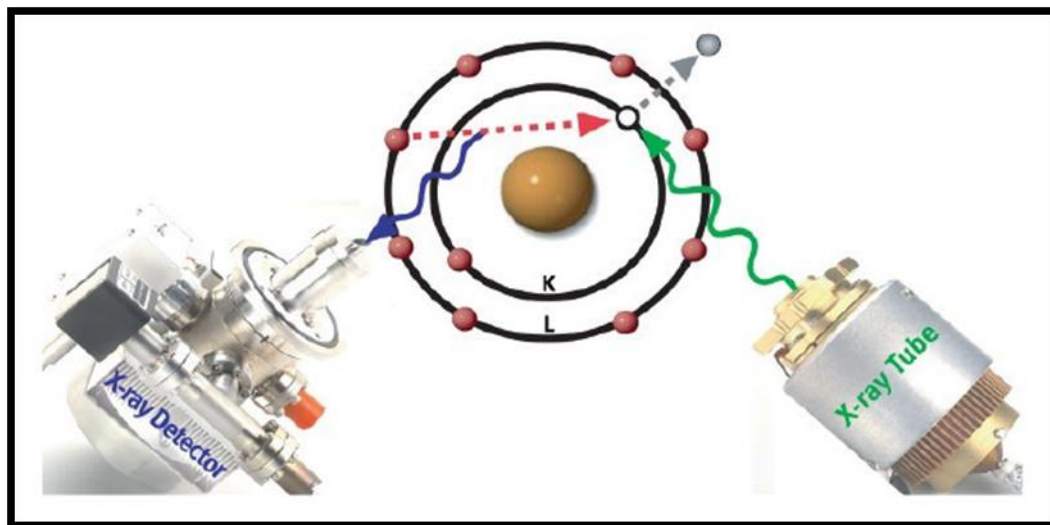


Fig.19 Principe de base de la XRF

Cette radiation fluorescente est en réalité une combinaison des spectres d'émission atomiques de tous les atomes présents dans l'échantillon. Le spectre d'émission atomique d'un atome donné constitue sa signature et représente ainsi un moyen d'identification de cet atome. C'est ainsi que l'on obtient la composition élémentaire de l'échantillon par l'analyse du spectre du rayonnement fluorescent X, (Source internet : Wikipédia).

V. METHODE pH de PATE

Cette méthode analytique permet la mesure de paramètres tels que le pH, le Redox et la conductivité électrique.

Mode opératoire : Le pH-mètre est calibré avec une solution acide (pH 4.00) et une solution neutre (pH 7.00). Ensuite à l'aide d'une balance, on prélève 02 g d'échantillon dans un récipient (bêcher, verre jetable, ...). On y ajoute de l'eau distillée jusqu'à saturation. On laisse les préparations se décanter pendant une quinzaine de minutes et ensuite on introduit les électrodes du pH-mètre dans la solution pour mesurer, selon le type d'électrode, le pH ou le Redox. Le même mode opératoire permet de mesurer la conductivité électrique à l'aide d'un résistivimètre. Les électrodes sont nettoyées avec

de l'eau distillée d'une mesure à l'autre pour éviter une contamination entre les différentes préparations, (CHRIS M. et al., 2017). Les figures suivantes résument le dit mode opératoire :

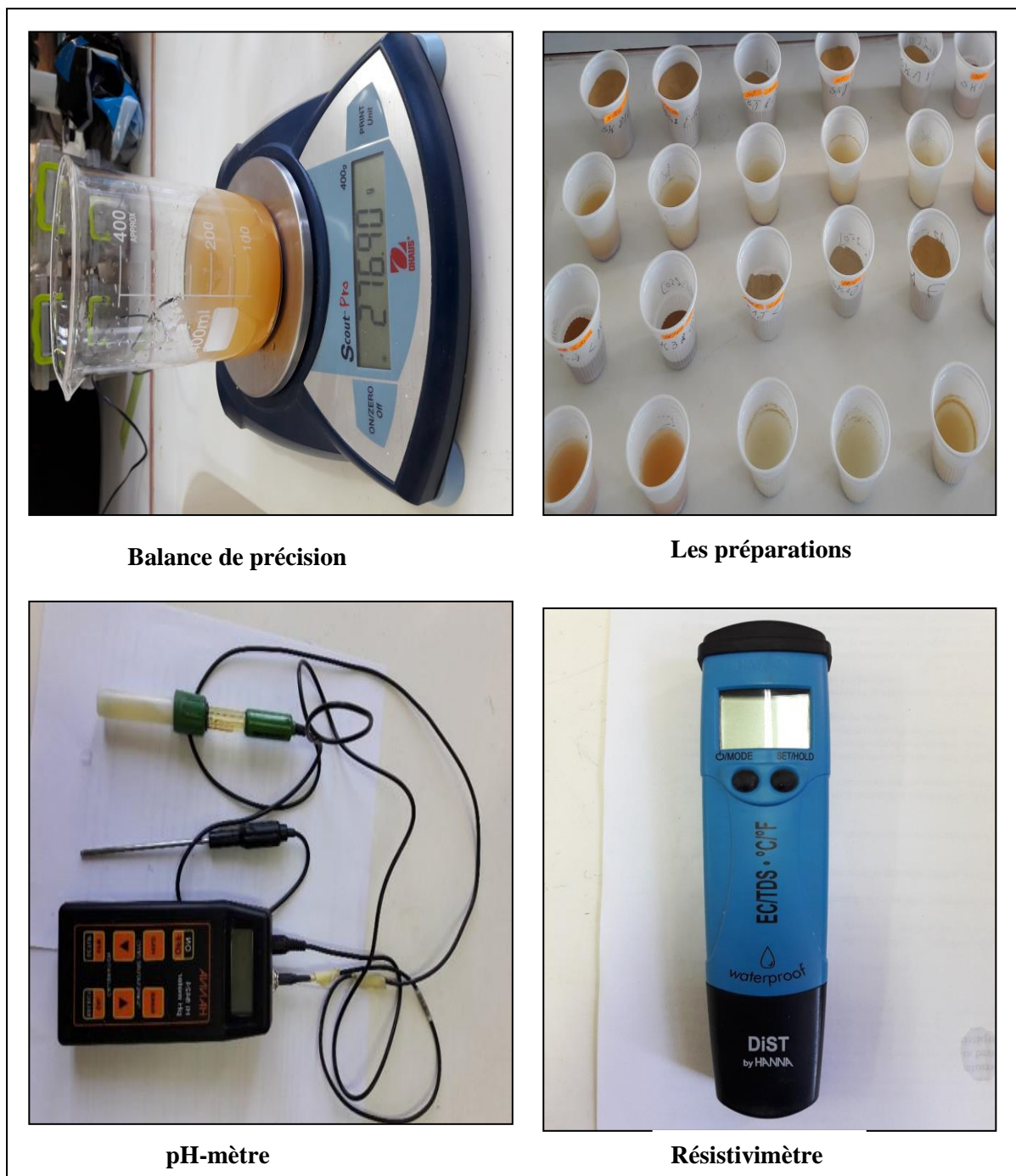


Fig. 20 Appareillage utilisé dans la méthode pH de PATE

PARTIE III :
RESULTATS
OBTENUS
ET
DISCUSSION

I. RESULTATS OBTENUS

I.1 Résultats de l'étude granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométriques sont exprimés sous forme de graphes, (voir fig.20 et fig.21 ci-dessous).

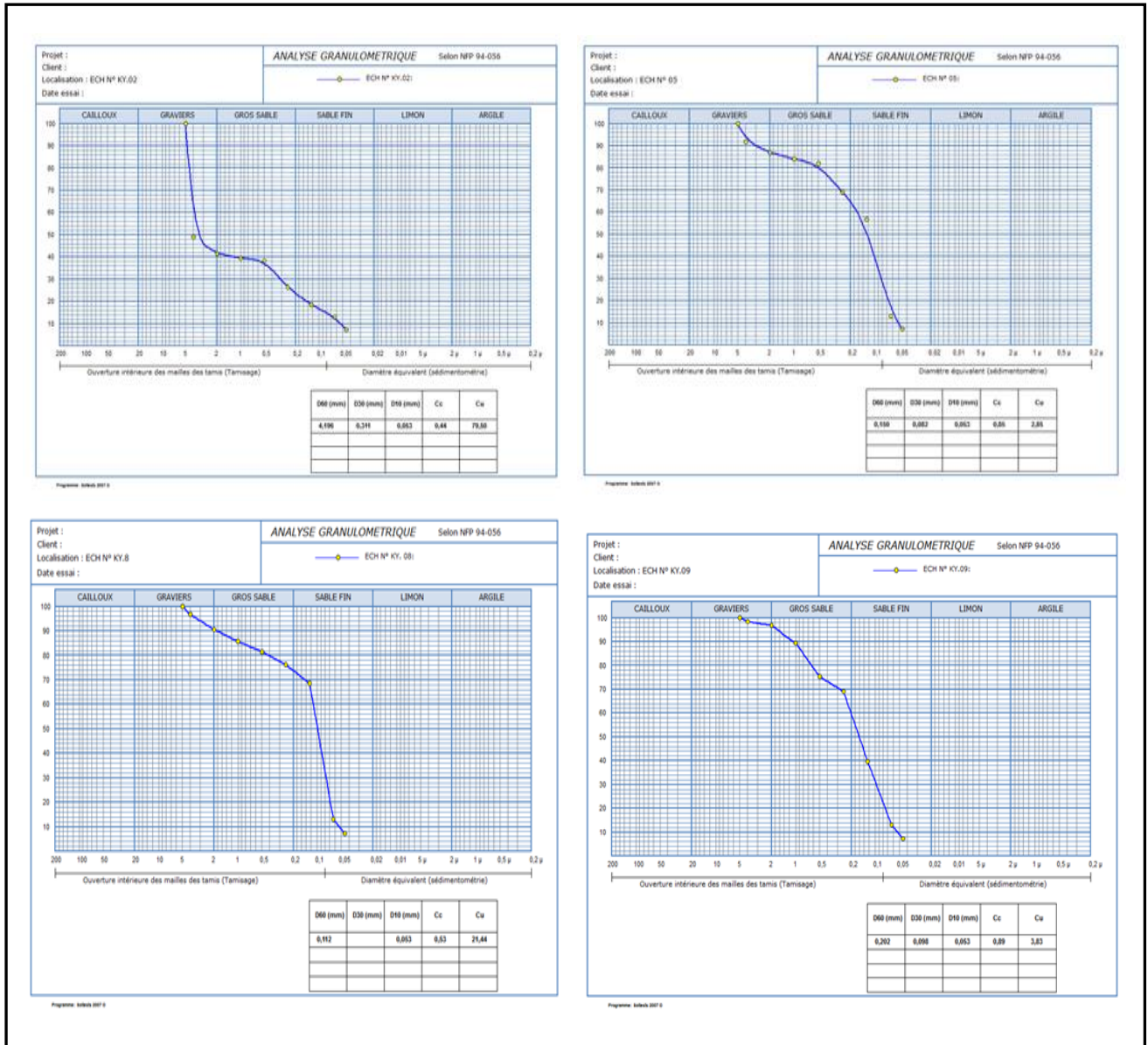


Fig.21 Courbes cumulatives des échantillons KY 2, 5, KY8 et KY9

Ces résultats montrent que les échantillons KY2 ; 5 ; KY8 et KY9 sont composés principalement de sables grossiers et de sables fins avec une petite quantité de graviers.

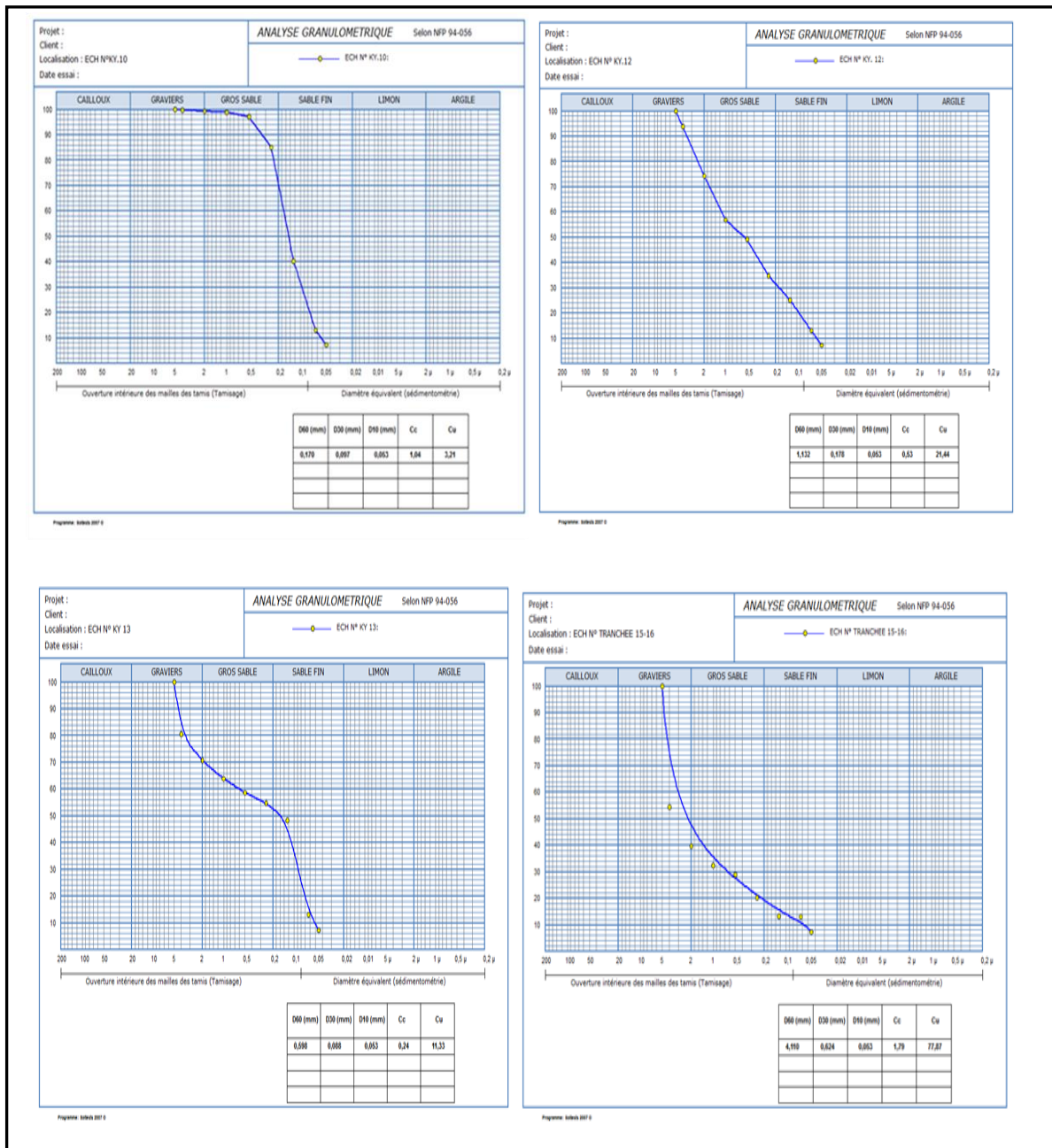


Fig.22 Courbes cumulatives des échantillons KY10, KY12, KY13 et T 15-16

Ces résultats sont semblables aux précédents. Les échantillons KY10, KY12, KY13 et T15-16 sont aussi composés principalement de sables grossiers et de sables fins avec une petite quantité de graviers.

I.2. Résultats de l'étude minéralogique

a. Etude par DRX

Le diffractogramme obtenu de la DRX est donné ci-dessous (voir fig.22).

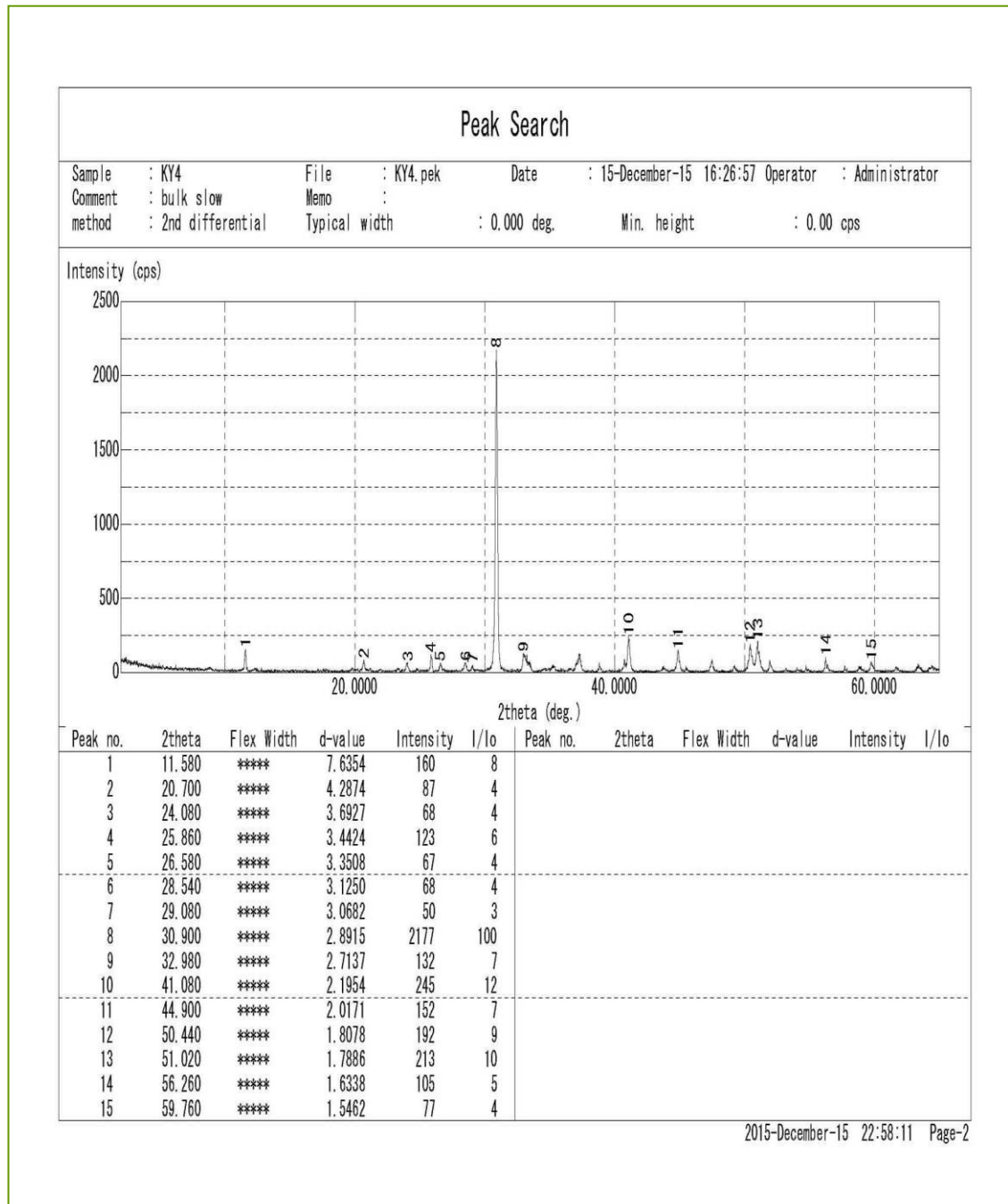


Fig.23 Diffractogramme de la DRX

Chaque pic du diffractogramme représente un minéral et l'intensité du pic, sa quantité.

b. Etude microscopique

L'étude microscopique a été réalisée à l'aide d'un microscope métallographique dans le but d'identifier les sulfures métalliques acidogènes présents dans les rejets miniers du complexe miniers de Kherzet Youcef, (voir fig.23 ci-dessous).

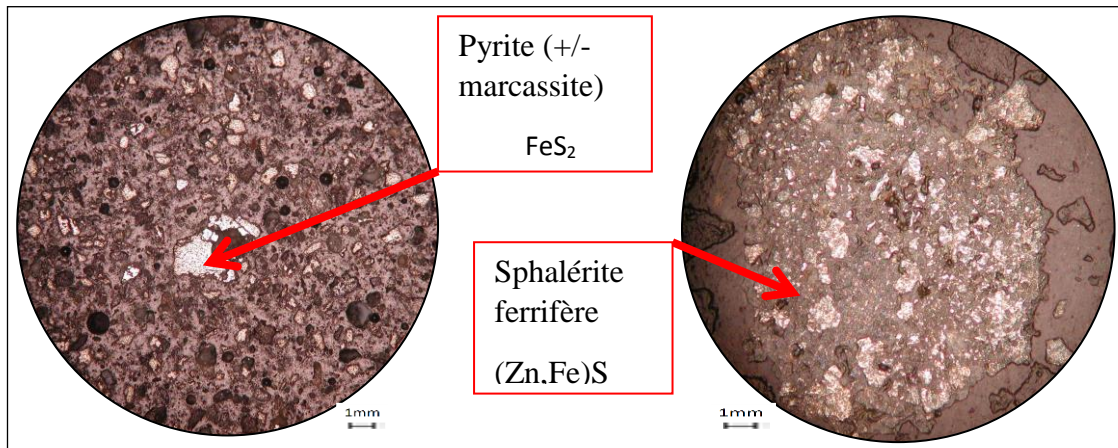


Fig. 24 Minéralogie des déchets miniers observée sous le microscope métallographique

c. Etude par XRF

c.1. Les éléments majeurs

Les résultats sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous.

Oxydes (en %)											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S
KY1	5,8280	0,0550	1,6700	7,8290	0,1500	15,5960	29,4720	0,0680	0,3700	0,0350	3,4413
KY2	11,8870	0,1130	4,4420	7,5690	0,1180	12,7820	21,9940	0,0800	1,0860	0,0640	3,7756
KY3	13,0810	0,1430	4,8630	9,2720	0,0900	12,8160	24,6510	0,0940	1,2950	0,0760	5,8551
KY4	17,3750	0,1770	5,2250	2,0150	0,0280	3,2560	29,0760	0,7010	1,0830	0,0350	0,8084

Tableau 2. Les éléments majeurs des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef

Les résultats sont donnés en pourcentage en oxydes majeurs. Mais en réalité, ces pourcentages sont ceux des éléments majeurs tels que Si, O₂, Al, Ca, Na, Mg, K, Fe, Mn, etc.

c.2. Les éléments en traces

Les éléments en traces des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef sont donnés dans le tableau 3 ci-dessous en ppm.

Eléments en traces (en ppm)									
	Pb	Zn	Cd	Cu	Hg	As	Ba	Ni	Co
KY1	996	3 021	7	44	17	185	4 261	28	0
KY2	1 295	3 339	11	102	0	235	1 607	30	0
KY3	2 786	6 123	22	293	14	489	1 610	38	0
KY4	15 456	94 648	356	290	51	2 664	235	43	9

Tableau 3. Les éléments traces des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef

II. DISCUSSION

Les courbes granulométriques issues de l'analyse granulométrique de nos échantillons présentent toutes une configuration homogène. En effet, elles montrent que les rejets miniers analysés sont tous composés de trois (03) fractions : graviers, gros sables et sables fins. Les sables grossiers et les sables fins sont les fractions principales. Cette granularité s'observe également sous la loupe binoculaire comme la montre les photos ci-dessous, (fig.23 et 24).

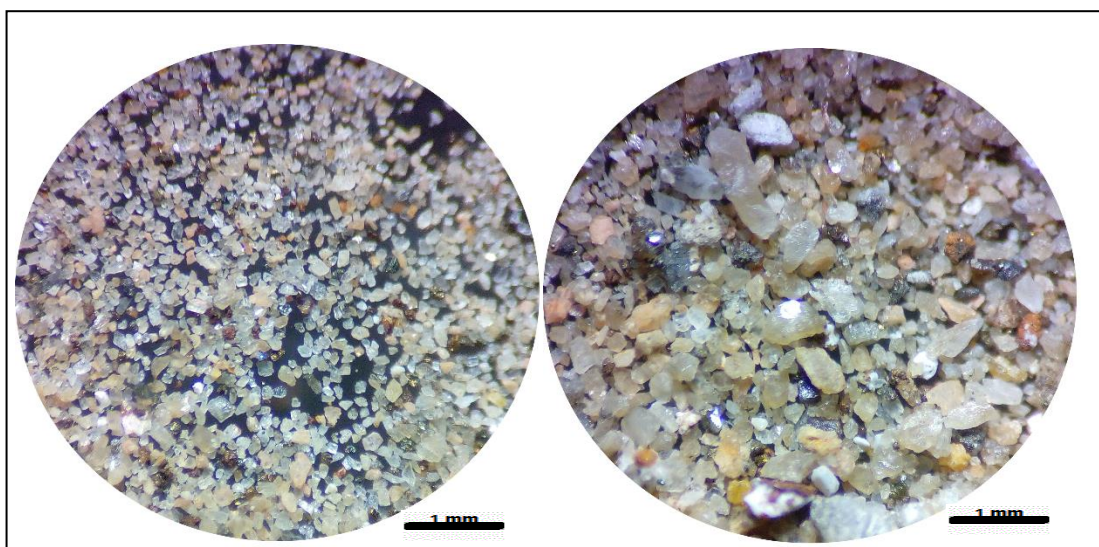


Fig.25 Sables fins

Fig.26 Sables grossiers et graviers

Les courbes des pourcentages volumiques cumulés sont obtenues par le programme "Soltest 2007". Les coefficients d'uniformité (CU) des courbes cumulatives sont supérieurs à 2 ; on a donc une granulométrie variée. Autrement dit, les rejets miniers contiennent plusieurs fractions granulométriques. Les rejets miniers ayant à l'origine une granularité homogène, le fait que les rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef renferment plusieurs fractions granulométriques s'expliquerait par une sédimentation in situ.

La génération du DMA est proportionnelle à l'importance de la fraction fine dans la granulométrie. En effet, plus les grains sont fins, plus les surfaces minérales sur lesquelles se produisent les réactions d'oxydation génératrices de DMA sont importantes. Dans notre cas, les rejets ont une texture globalement sableuse. Ils ont donc une influence relativement moyenne en matière de génération de DMA.

L'interprétation du diffractogramme de l'analyse par DRX des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef a permis de déterminer leur composition minéralogique: calcite, dolomite pour les minéraux de gangue et marcassite, galène, sphalérite, pyrite pour les minéraux métalliques. L'observation des échantillons avec la loupe binoculaire permet, comme le montre la figure 25 ci-dessous, de constater une prédominance des carbonates. On peut y observer des minéraux métalliques acidogènes (probablement de la marcassite) baignant dans une plage de minéraux carbonatés neutralisants (calcite et dolomite). Cette abondance de minéraux neutralisants est un frein à l'avènement du phénomène de DMA.

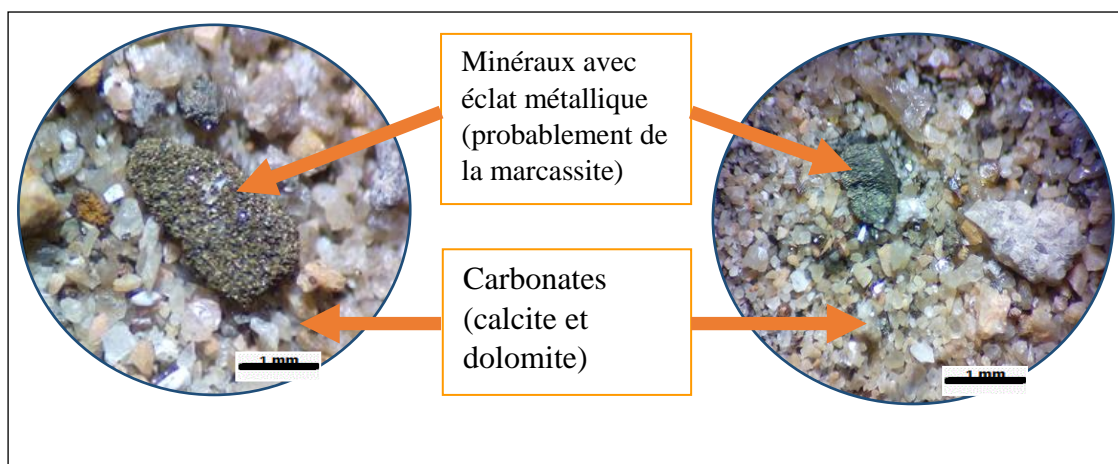


Fig.27 Minéralogie des rejets miniers de la mine de Kherzet Youcef observée sous la loupe binoculaire

Quant à l'étude microscopique, elle avait pour but l'inventaire des minéraux acidogènes (sulfures) présents dans les rejets miniers. La lame mince réalisée a mis en évidence des minéraux correspondant à l'encaissant de la minéralisation. Il s'agit principalement de la dolomie. L'étude des sections polies a confirmé la présence des minéraux déterminés grâce à la DRX à savoir : marcassite, galène, sphalérite et pyrite.

Pour ce qui est de la minéralogie, l'analyse des résultats de la DRX et de l'étude au microscope a montré l'existence de nombreux sulfures, dont la pyrite qui est le plus réactif. Cependant, la présence des sulfures est compensée par l'abondance des minéraux carbonatés dont le pouvoir de neutralisation est si important qu'il inhibe toute possibilité de génération d'acidité, (voir fig.23 de la section précédente).

Les pourcentages des éléments majeurs mis en évidence par l'analyse par XRF montrent une prédominance du magnésium et du calcium parmi les éléments majeurs dans les rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef. Les pourcentages du CaO sont nettement supérieurs à ceux du SiO₂. Cela traduit une prédominance des carbonates sur les silicates. Ces résultats rejoignent donc ceux de la DRX. Autrement dit, ils indiquent et confirment l'abondance des carbonates. Cependant, on note la présence de quantités notables de soufre (S) prouvant une présence de minéraux sulfurés, susceptibles de générer du DMA dans les rejets miniers du secteur de Kherzet Youcef.

En ce qui concerne les éléments en trace, en comparant les teneurs des éléments Plomb et Zinc dans les rejets miniers de la mine de Kherzet Youcef à leurs clarkes respectives dans les calcaires, soit **5.7** ppm pour le Plomb et **20** ppm pour le Zinc, (Gilles C., 2003), il ressort que ces éléments y sont, et c'est normal, en excès. Cela est dû à la présence des sulfures. Par ordre croissant des teneurs, on a : **Zn, Pb, Ba, As, Cu, Ni, Hg, Cd et (Co).**

III. PREDICTION DU COMPORTEMENT DES DECHETS MINIERES

Cette section traite de la prédiction du comportement environnemental des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef.

III.1 pH – Conductivité

Les différentes mesures de pH et de conductivités électriques des échantillons des rejets miniers du secteur de Kherzet Youcef sont données dans le tableau 4 ci-dessous :

Echantillon	KY 2	5	KY 8	KY 9	KY 10	KY 12	KY 13	T15-16
pH	7.50	7.64	7.58	7.61	7.53	7.36	7.49	7.20
Conductivité (mS/cm)	1.08	2.12	0.91	1.15	0.95	2.22	2.03	1.80

Tableau 4. Les pH et les conductivités électriques des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef

Discussion :

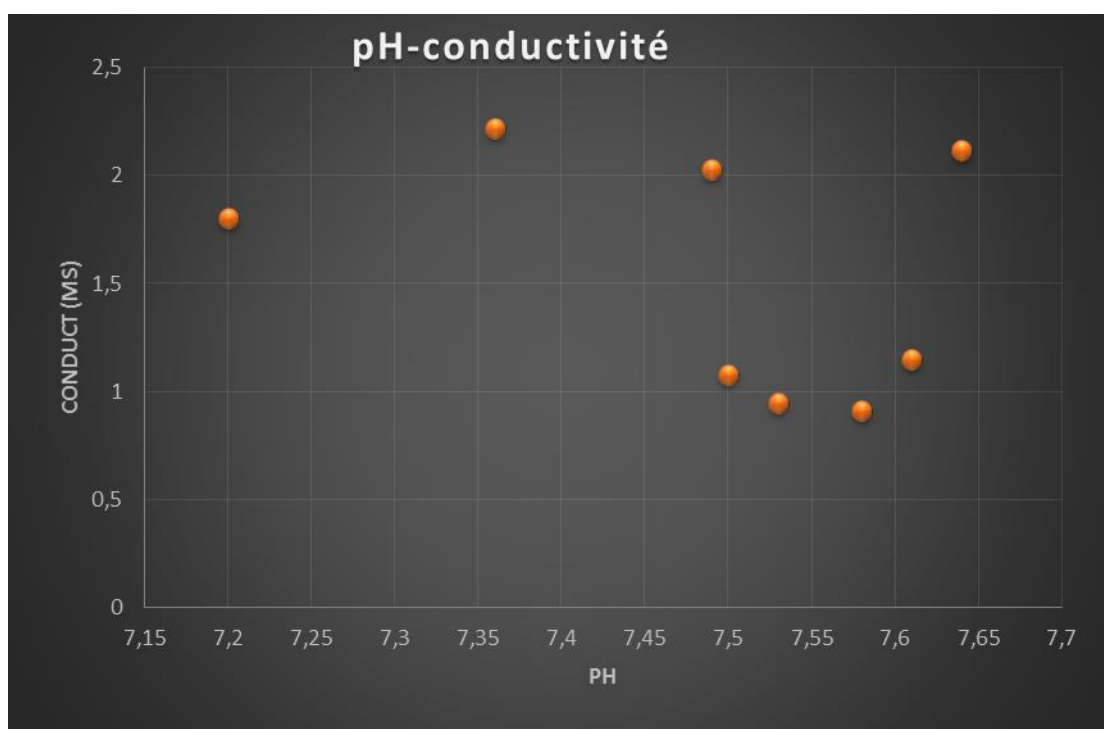


Fig.27 Graphique de la conductivité en fonction du pH

Le graphe précédent (fig.26) constitue une représentation graphique des conductivités électriques en fonction du pH. Le pH est un paramètre chimique qui mesure la concentration en ions H^+ dans une solution. Quant à la conductivité électrique, elle traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique et est directement liée à la quantité de solides (ions) dissouts dans la solution.

Ces résultats montrent que les rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youssef génèrent des solutions sensiblement neutres à légèrement basiques ($7.20 \leq \text{pH} \leq 7.64$) et

faiblement conductrices ($0.91\text{mS/cm} \leq \text{conductivité} \leq 2.22\text{mS/cm}$). La faible conductivité confirme que les réactions d'oxydation des sulfures sont stoppées à un stade très précoce, ce qui limite la libération des ions H^+ dans l'eau.

III.2 pH – redox

Les résultats sont donnés dans le tableau 5 ci-contre.

Echantillon	KY 2	5	KY 8	KY 9	KY 10	KY 12	KY 13	T 15-16
pH	7.66	7.79	7.81	7.63	7.74	7.50	7.84	7.66
Redox (mV)	188.6	205.6	305.5	265.2	304.3	205.9	301.4	208.9
M (éch)	2.06	2.00	2.00	2.03	2.01	2.01	2.00	2.00
M (eau)	74.84	86.13	73.00	74.94	71.12	92.32	87.28	78.32

Tableau 5. Les pH et les redox des déchets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef

Discussion :

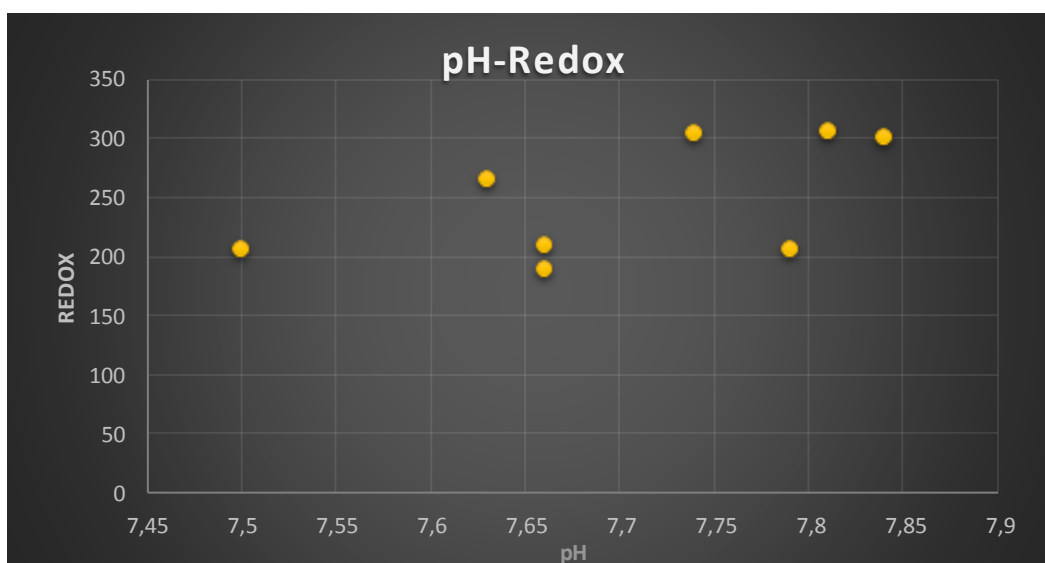


Fig.29 Graphique du redox en fonction du pH

Le potentiel redox est un paramètre chimique qui indique le pouvoir oxydant ou réducteur d'une substance. Une mesure positive du redox indique un milieu oxydant tandis qu'une mesure négative indique un milieu réducteur.

Nos mesures, comprise entre 188.6mV et 305.5mV, sont positives et indiquent donc que les rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef se trouvent dans des conditions oxydantes. En d'autres termes, ils sont capables de générer du DMA puisque

les conditions chimiques dans lesquelles ils se trouvent le permettent, mais les réactions sont inhibées immédiatement par les carbonates.

IV. CONCLUSION

Les redox des rejets miniers du secteur de Kherzet Youcef sont tous positifs ; cela signifie qu'ils sont dans un milieu oxydant. Autrement dit, les rejets miniers sont en contact avec l'eau et le dioxygène et sont donc, grâce à la présence des minéraux sulfurés (pyrite par exemple), susceptibles de générer du DMA. Aussi, leur granulométrie est principalement sableuse ; ce qui les rend encore plus susceptible de générer du DMA car les réactions d'oxydation génératrices de ce phénomène se produisent sur les surfaces minérales et plus les grains sont fins plus il y a de surfaces minérales.

Cependant, les résultats des analyses minéralogiques montrent que ces rejets miniers sont plus riches en minéraux neutralisants (carbonates) qu'en minéraux acidogènes (pyrite principalement). Grâce à leur pouvoir neutralisateur, ces carbonates inhibent les réactions d'oxydation génératrices du DMA en les stoppant à un stade très précoce. C'est pourquoi les tests de prédiction ont donné des pH tous supérieurs à 7.00, traduisant un milieu basique ; et des faibles conductivités électriques (comprises entre 0.91 et 2.22 mS /cm) prouvant que la libération des ions H^+ dans l'eau est limitée. On peut en conclure que les rejets miniers du secteur de Kherzet Youcef ne sont pas générateurs de DMA. Et puisque nous sommes dans des conditions atmosphériques, en présence d'eau et de minéraux sulfureux, il serait improbable d'associer l'absence de DMA à une absence des réactions d'oxydation génératrices de ce phénomène. L'absence de DMA s'explique alors par le seul fait que ces rejets miniers soient plus riches en carbonates neutralisants (calcite et dolomite) qu'en sulfures acidogènes (pyrite).

PARTIE IV :
CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La réalisation de la présente étude nous a permis de juger du pouvoir générateur de DMA des rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef situé à Aïn Azel dans la Wilaya de Sétif. Elle a aussi été l'occasion pour nous de mettre en pratique nos connaissances théoriques acquises durant notre cursus universitaire.

Les gisements de type MVT sont des gisements épigénétiques encaissés principalement dans des dolomies. Ils constituent la principale source mondiale de Plomb et de Zinc. En Algérie, les gisements de ce type se concentrent dans la partie nord du pays, (**Boutaleb, 2001**), et sont donc relativement sous les mêmes conditions climatiques (climat méditerranéen semi-aride); facteur influant considérablement sur le comportement environnemental des déchets miniers.

Leur exploitation génèrent des millions de tonnes de résidus miniers riches sulfures, c'est le cas à Kherzet Youcef où les rejets miniers sont confinés dans un parc à résidus d'environ 07 ha. Exposés aux conditions atmosphériques, ces derniers sont susceptibles de générer du DMA.

Le DMA est le problème environnemental le plus important lié aux activités minières. Lorsque des résidus miniers riches en sulfures sont exposés aux conditions atmosphériques, des réactions d'oxydation ont lieu entre ces sulfures, l'oxygène et l'eau pour produire du DMA. Quand il se produit naturellement, on parle de drainage rocheux acide (DRA). Cependant, naturel ou artificiel, ils sont neutralisés par certains minéraux, principalement les carbonates (calcite et dolomite).

Les travaux antérieurs sur le site de la mine de Kherzet Youcef ont prouvé l'existence d'une contamination des eaux et des sols par les ETMs (Pb, Zn, (Cd)). Une étude récente note cependant une régression de cette pollution. Quant au DMA, sa présence n'a pas été mentionnée.

Il est d'ailleurs généralement admis que les gisements MVT et/ou leurs résidus d'exploitation ne génèrent pas de DMA. Mais les études ayant conduit à cette considération ont été mené sur les gisements nord-américains et européens. Et à cause de la diversité climatique, une simple extrapolation de cette considération sur les gisements algériens du même type n'aurait pas été rassurante.

C'est dans cette perspective que nous avons entrepris ce travail. Il a reposé principalement sur deux catégories d'analyses : des analyses de caractérisation des rejets miniers de la mine de Kherzet Youcef (analyses granulométrique, minéralogique (DRX) et élémentaire (XRF) et des analyses de prédiction de leur comportement environnemental (méthode pH de PATE).

De la première catégorie d'analyses, on en retient les résultats suivants :

- Les rejets miniers de la mine de Kherzet Youcef renferment trois fractions granulométriques : un peu graviers, sables grossiers et sables fins ;
- Leur minéralogie est à dominance carbonatée (calcite, dolomite, galène, sphalérite, marcassite, pyrite). Autrement dit, les rejets miniers du complexe minier de Kherzet Youcef sont plus riches en minéraux neutralisants qu'en minéraux acidogènes.
- Le CaO et le MgO sont les éléments majeurs les plus dominants;
- Les éléments en traces sont représentés principalement par le Zn et le Pb.

La deuxième catégorie d'analyses a fourni les résultats suivants :

- Les pH sont tous supérieurs à 7 et traduisent ainsi un milieu basique ;
- Les conductivités électriques sont faibles et comprises entre 0.91 mS/cm et 2.22 mS/cm ;
- Les redox sont tous positifs et compris entre 188.6 mV et 305.5 mV. Ils indiquent un milieu oxydant.

Comme susmentionné, les minéraux carbonatés sont des minéraux neutralisateurs de DMA. Leur prédominance dans la minéralogie des déchets miniers du secteur de Kherzet Youcef est le principal facteur empêchant la production du DMA.

Enfin, nous estimons que les déchets miniers des gisements algériens de type MVT, parce que ces derniers sont tous relativement sous les mêmes conditions climatiques (climat méditerranéen semi-aride), ne génèreraient pas de DMA non plus. Toutefois, chaque gisement reste unique. Nous recommandons alors des vérifications du potentiel de génération de DMA de chaque gisement pour une réhabilitation durable des sites.

BIBLIOGRAPHIE

- ATTOUCHEIK L (2006)** : Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet Youssef (Sétif) et son impact sur l'environnement, Mémoire de Magister, USTHB, FSTGAT, Bab Ezzouar, Alger, 134p ;
- ATTOUCHEIK L et al., (2008)**. Diagnostique et évaluation de la charge polluante par les éléments traces métalliques cas du complexe minier de Kherzet Youcef, Bulletin Du Service Géologique de L'Algérie, Vol. 19, 17p ;
- AUBERTIN et al. (2002)** : Gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement, Article, Montréal, Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, 11p ;
- BOUTALEB A., (2001)** : Les Minéralisations à Pb-Zn du Domaine Sétifien-Hodna : Gîtologie, Pétrographie de Dolomies, Microthermométrie et Implications Métallogéniques, Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, FSTGAT, Bab Ezzouar, Alger, 404p ;
- BOUSDIRA D., (2009)** : Etudes d'impacts des activités d'exploitation des mines polymétalliques (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Youcef (Wilaya de Sétif), mémoire de Magister, Département de Génie de l'Environnement, ENP, Alger, 136p ;
- CHRIS M. et al. (2017)** : Acide Base Accounting (ABA) Test Procedures, page consultée le 29.05.2017, <http://technology.infomine.com>;
- D. V. SUBBA RAO, (2011)**: Mineral beneficiation, a concise basic course, 201p;
- Gilles C (2003)** : Eléments traces métalliques dans les sols : contribution à la connaissance des déterminants de leur distribution spatiale en région limoneuse belge, Thèse de doctorat, Partie 1, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 139p ;
- GEOFFREY S. PLUMLEE et al. (1995)**: Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models, US Department of the Interior, UGS, 275p;
- GHOMARI F. & BENDI-OUIS A., (2008)** - Science des matériaux de construction, TP, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département de génie civil, Université Aboubekr Belkaid, 16p ;

- KARL W. et ANDY B. :** X-Ray Fluorescence (XRF), Geochemical Instrumentation and Analysis, page consultée le 01.04.2017, <http://serc.carleton.edu>;
- LADJALI H., (2011) :** Identification de l'orientation cristallographique des grains d'une plaquette de silicium multicristallin par attaque chimique, mémoire de Magister, Département d'Electronique, FGEI, UMMTO, 114p ;
- PIERRE G., (2012) :** Introduction à la pratique de la Diffraction des Rayons X par les poudres, ICMCB-CNRS, Université Bordeaux 1, 210p ;
- PHILIPPE B. et al. (2013) :** Journées eau et environnement : Utilisation de la technique de la fluorescence X pour la quantification des éléments trace métalliques dans les sols urbains, Nantes, 18p ;
- PETER B., (2010):** Theory of XRF, Getting acquainted with the principles, PANalytical B.V., 62p;
- REZIGAT N.E et IMCHAL Karim (2008) :** Contribution à l'étude des problèmes environnementaux et de sécurité sur l'exemple de la mine souterraine de Chaabet El-Hamra (Ain Azel, Wilaya de Sétif), Mémoire d'Ingéniorat, Faculté des Sciences, UFA-S, 100p ;
- SYLVIE B. (1993) :** Evaluation du potentiel acidogène de divers rejets miniers par une méthode bio-cinétique, Mémoire présenté à l'institut national de la recherche scientifique pour l'obtention d'une Maitrise en Sciences de l'Eau, Université du Québec-134p ;
- WIKIPEDIA :** Spectrométrie de fluorescence des rayons X, page consultée le 01.04.2017 https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectrométrie_de_fluorescence_des_rayons_X;
- WIKIPEDIA:** Analyse granulométrique, page consultée le 23.03.2017, https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_granulométrique;
- WIKIPEDIA:** Diffraction des Rayons X, page consultée le 23.03.2017, https://fr.wikipedia.org/wiki/Cristallographie_aux_rayons_X.