



Année Universitaire : 2013-2014



Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Lixiviation des déchets miniers : Cas de la mine ferrifère de Nadour

<u>Présenté par:</u>

OUHSINE Omar

Encadré par:

- JABRANE Raouf

Soutenu Le20Juin 2014 devant le jury composé de:

- Mr. JABRANE Raouf Encadrant
- Mme. RAIS Naoual
- Mr. ELGAROUANI Abdelkader



Stage effectué à : FST, Fès

REMERCIEMENT

Louange à dieu ! Les difficultés finissent toujours par s'aplanir et les misères par tomber dans l'oubli. C'est le moment de dire merci et de traduire toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous Ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de Ce modeste travail. mes remerciements s'adressent à :

◆Monsieur **RAOUF JABRAN**, mon enseignant et mon encadrant de mémoire, qui malgré ces occupations ; avez pu guider mon travail avec rigueur, engagement, et générosité. Ce travail est le vôtre. Pour votre simplicité, votre capacité d'écoute, votre compréhension, votre sens de relation humaine, et votre tendresse je vous remercie du fond du cœur.

◆J'aimerai également remercier très particulièrement et solennellement tous **les membres du jury pour** l'honneur qu'ils m'ont accordé en acceptant de juger ce travail.

♦Mes **chers parents** qui m'ont élevés de leur mieux : pour leurs soutiens, leurs conseils, Leur compréhension, leur confiance, et leur amour qui me donne envie de continuer surtout aux moments forts de stress et de fatigue.

◆ A tous **les professeurs** de la filière hydrologie de surface et qualité des eaux pour leur sens de collaboration et de partage d'information, vous avez introduit des connaissances à la hauteur dans ma mémoire, soyez remerciés à travers ce travail.

RESUME

Le drainage minier acide cause des dangers graves pour l'environnement, le déséquilibre de l'écosystème sera atteindre, le changement des caractéristiques hydrodynamique des sols et la qualité des eaux superficielles aura lieu en conséquence.

La qualité des eaux souterraines et aussi affectée par le drainage minier acide, ce dernier s'infiltre vers la nappe ce qui engendre une pollution de la nappe souterraine qui présente un réservoir important des eaux d'où une augmentation du coût de remédiation et du traitement.

A cet égard, mon projet et basé sur l'étude des échantillons de sol prélevés de la région de Nador en se basant sur des analyses granulométrique, physicochimiques, géochimiques et pétrographique afin d'identifier l'impact de drainage miniers acide sur le sol et d'identifer la correlation entre les metaux lourds et le temps de lixiaviation de ses dérniers.

ABSTRACT

The acid mine drainage causes a serious environmental problems, because it negatively affects the balance in the ecosystem specifies the food chain, we add to these effects change the hydrodynamic characteristics of the soil and surface water quality.

The groundwater quality is also affected by acid mine drainage, this latter leak to the aquifer and causes pollution of the ground water which has a reservoir of water, where an increase in the cost of remediation and treatment.

In this regard, my project is based on the study of different soils collected in the area of Nador (JBAL Ouiksane, Sétolazar, Axara), and it based on particle size analysis, physicochemical, geochemical and petrographic to identify the impact of acid mine drainage on these soils.

خلاصة

يشكل الصرف الحمضي المنجمي خطرا بيئيا جسيما، حيث أنه يؤثر سلبا على فونة و فلورة التربة مما يؤدي إلى إخلال التوازن البيئي و كسر السلسلة الغذائية، بالإضافة إلى تأثيره على الخصائص الهيدروديناميكية للتربة وجودة المياه السطحية، هذا و كونه أيضا يتسرب إلى المياه الجوفية مما يؤثر سلبا على جودتها،فيتسبب في خسران احتياطي المياه الصالحة والزيادة في كلفة معالجتها.

وفي هذا الصدد، يقوم مشروعي على دراسة عينات من التربة أخذت بجهة الناظور من أجل التحاليل الفيزيوكميائية، وكذا بعض المميزات الصخرية،ومدى تأثرها بالصرف الحمضي المنجمي.

FIGURES

Figure I.1: Schéma récapitulant les principaux mécanismes de drainage minier contaminé (1997)	B.R.G.M. 4
Figure I.2: Carte de la situation des gisements de la mine de Nador (Nord-est du Maroc)	5
Figure I.3: Coupe géologique illustre les amas de magnétite pyriteux métasomatique au cor grandiorites et des calcaires d'Ouiksane (Lakrim 2007) P11	tact des 6
Figure II.1 : Représentation graphique de poids et poids cumulé des remblais d'Ouiksane	14
Figure II.2: représentation graphique de poids et poids cumulé des terrils o	l'Ouiksane 15
Figure II.3: Représentation graphique de poids et poids cumulé des sols d'Ouiksane	17
Figure II.4: : Représentation graphique de poids et poids cumulé des Terrils de Sétolazar	18
Figure II.5 : Représentation graphique de poids et poids mcumulé des remblais de Sétolazar	20
Figure II.6 : Représentation graphique de poids et poids cumulé des Terrils d'Axara	21
Figure II.7 : : Représentation graphique de poids et poids cumulé des Tailings de la digue	22
Figure II.8: Représentation graphique de poids et poids cumulé des Sols a proximité de la digue	24
Figure II.9 : Représentation graphique de poids et poids cumulé de Sol Woulad Haddou Rahou	25
Figure II.10: Analyses des pH des différents échantillons	27
Figure II.11: Analyse du potentiel électrique Eh des échantillons	29
Figure II.12 : Analyse de la conductivité des différents échantillons	
Figure II.13: Analyse de taux des Sels dissous des différents échantillons	31
Figure II.14: Analyse de la résistivité des échantillons	32
Figure II.15: Analyse Calcimétrique des échantillons	34
Figure II.16 : Courbes de variation de Fe, S, Cu	37
Figure II.17 : Courbes de variation de Fe, S	37
Figure II.18 : Courbes de variation de Zn, S	38
Figure II.19 : Courbes de variation de Pb, S	
Figure II.20 : Courbes de variation de Ni, S	
FigureII.21: Graphes d'analyse factorielle en principales composantes des analysés	éléments 41
Figure II.22 : Carte de la situation des gisements de la mine de Nador (Nord-est du Maroc)	43

Figure II.23 : carte de répartition qualitative des rejets minier (Lakrim 2011)	44
Figure II.24 : Carte de répartition quantitative du soufre (Lakrim 2011)	46
Figure II.25: Carte de répartition quantitative du fer (Lakrim 2011)	47
Figure II.26 : Carte de répartition des pentes (Lakrim 2011).	48
Figure II.27 : Carte de la vulnérabilité environnementale de la zone minière en fonction de l'intensité du i	risque
de drainage minier acide DMA (Lakrim 2011)	50

TABLEAUX

Tableau I.1 : Les données des analyses chimiques des gisements de Nador (Rhoden 1983)	11
Tableau I. 2 : Les teneurs en éléments majeurs dans les minerais rubanés de Bokoya sup et Axara (d'évaluation des réserves 1985)	(Rapport 11
Tableau II.1 : Origine des échantillons étudiés)	12
Table II.2 : Les tamis utilisés dans les analyses granulométriques	12
Tableau II.3 : Résultats de la granulométrie des Remblais d'Ouiksane	13
Tableau II.4 : Résultats de la granulométrie des terrils d'Ouiksane	14
Tableau II.5 : Résultats de la granulométrie des sols d'Ouiksane	16
Tableau II.6: Résultats de la granulométrie des terrils de Sétolazar	18
Tableau II.7 : Résultats de la granulométrie des Remblais de Sétolazar	19
Tableau II.8: Résultats de la granulométrie des terrils d'Axara	20
Tableau II.9: Résultats de la granulométrie des tailing de la digue	22
Tableau II.10 : Résultats de la granulométrie du sol à proximité de la digue	23
Tableau II.11 : Résultats de la granulométrie des sols Woulad Hadou Rahou	24
Tableau II.12 : Résultats d'analyse des pH	26
Tableau II.13: Résultats d'analyse de potentiel électrique Eh	28
Tableau II.14 : Résultats de l'analyse de la conductivité des échantillons	29
Tableau II.15: Résultats d'analyse de taux des sels dissous des échantillons	31
Tableau II.16: Résultats d'analyse de la résistivité des échantillons	32
Tableau II.17.Résultats d'analyse de la Calcimétrie des échantillons	33
Tableau II.18. : Stations de prélèvement des échantillons liquides	35

Tableau II.19 : Résultats des analyses géochimiques des échantillons solides en ppm	36
Tableau II.20 : quantité des lixiviats a recupéré et les analyses caractérisant chaque temps recupération selon l'Osites (S-21)	de 40
Tableau II.21 : matrice de corrélation entre variables	40
Tableau II.22 : Corrélations entre les variables et les facteurs	40
Tableau II.23 : Indices de classement des zones selon l'intensité des contaminations	43

ΡΗΟΤΟ

Photos II.1 : Précipitation et néoformation des oxydes et hydroxydes du site minier de Sétolazar dont, x=	:
718644m, et y= 504854m (Lakrim 2007)	49

Sommaire

INTRODUCTION1
Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHYQUE GENERALE 2
I.1.Le Drainage Minier2
I.2.L'origine du DMA
I.3.Etude de la lixiviation de la mine ferrifère de Nador4
I.3.1. Conditions climatiques de la région4
I.3.2. Situation géographique de la mine5
I.4.Géologie des gisements5
I.4.1. Cadre principal de la structure géologique et leur rapport avec la minéralisation5
I.4.1.1. Unités lithostratigraphiques5
I.4.1.2.Histoire géologique7
I.5.Géochimiques et minéralogie des gisements8
I.5.1. Pétrographie de la minéralisation8
I.5.1.1. Description Macroscopique8
I.5.1.2.Description microscopique9
I.6.Composition géochimique10
Chapitre II. CARACTERISTIQUES PHYSICOCHIMIQUE12
II.1.Les analyses des sols12
II.1.1. Granulométrie
II.1.2. Le coefficient d'uniformité12
II.1.3.Les résultats de granulométrie des remblais d'Ouiksane13
II.1.4. Les résultats de la granulométrie des Terrils d'Ouiksane14
II.1.5. Les résultats de la granulométrie Sols d'Ouiksane16
II.1.6. Les résultats de granulométrie des Terrils de Setolazar18
II.1.7. Les résultats de la granulométrie des Remblais de Sétolazar19
II.1.8. Les résultats de granulométrie des Terrils d'Axara20
II.1.9. Les résultats de granulométrie du Tailing de la digue22

II.1.10. Les résultats de granulométrie Sol à proximité de la digue
II.1.11.Les résultats de granulométrie des Sols Woulad Hadou Rahou
II.1.12. Interprétation de la granulométrie
II.2.Analyses de pH
II.3.Analyse de potentiel électrique Eh28
II.4.Analyse de la conductivité
II.5.Analyse de taux des sels dissous
II.6.Analyse de la Résistivité
II.7.Analyse de la Calcimétrie
II.8.Etude géochimique des échantillons liquides34
II.8.1.Préparation aux analyses géochimiques
II.8.2. Caractérisation des échantillons liquides
II.8.3. Résultats d'analyses des liquides
II.8.4.Discussion
II.8.5. Test de lixiviation
II.8.5.1. Résultats
II.8.5.2. Graphes de l'ACP des échantillons41
II.8.5.3. Analyse et interprétation
II.9.Localisation des zones vulnérables à la contamination par le DMA, moyennant le SIG : Cas de la mine de ferrifère de Nador
II.9.1.La carte des rejets miniers
II.9.2. La carte de la répartition des sulfates44
II.9.3. La carte de distribution du fer46
II.9.4. La carte des pentes
II.9.5. Discussion
Conclusion
Références bibliographiques

INTRODUCTION

Le secteur minier constitue une composante essentielle de l'économie nationale, grâce à l'existence d'un contexte géologique favorable qui a permis de développer l'activité minière dans de nombreuses régions du Royaume. L'importance de ce secteur se traduit par sa contribution au produit intérieur brut, son poids dans les exportations nationales et ses retombées bénéfiques sur le développement régional et rural. Donc on peut dire que les activités minières participent au développement économique et social du pays, ces deux piliers sont essentiels pour le développement d'un pays et de faire satisfaire les besoins de la population pour atteindre une vie de luxe.

Malheureusement l'exploitation minière à des effets catastrophiques sur l'environnement, le troisième pilier de développement durable est menacé, le danger causé par les activités minières aggrave la situation, les centres de stockage des déchets miniers, par la lixiviation des éléments chimiques, le sol, le sous-sol, les eaux de surface, les nappes phréatiques, tous ses compartiments environnementales seront contaminés d'où une extinction de la faune et la flore peut avoir lieux, l'humanité est concernée par ce problème aussi, elle est exposée au danger elle-même, elle peut avoir des intoxications aigues ou chroniques, des maladies cancérogènes .

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHYQUE GENERALE

I.1.Le Drainage Minier

Il est Reconnu comme un problème environnemental, le drainage minier fait l'objet des recherches actuelles. Même si, tous les sites miniers sont différents, les principaux mécanismes chimiques impliqués dans le phénomène sont aujourd'hui bien connus. On distingue deux grands types de drainage minier selon l'acidité des effluents. Quand le pH est inférieur à 5 on parle de Drainage Minier Acide (DMA), c'est le cas le plus fréquent. Lorsque le pH est proche de la neutralité (5<pH<8), on parle de Drainage Minier Neutre (DMN), (Lakrim 2007)

I.2.L'origine du DMA

La composition minéralogique des résidus miniers (stériles et rejets de concentrateurs), ainsi que les transformations opérées au cours des procédés industriels (notamment durant le broyage des roches, et l'apparition de surfaces plus réactives) peuvent induire une réactivité plus ou moins élevée, à l'origine d'impacts négatifs importants sur l'environnement. La réaction des eaux météoriques et de l'air ambiant avec les sulfures contenus dans ces résidus génère, en effet, une diminution importante du pH des eaux de drainage (en l'absence de minéraux neutralisants), accompagnée par une libération des métaux lourds et métalloïdes. Ce phénomène, souvent observé dans le cas de l'exploitation de gisements polymétalliques, est appelé drainage minier acide (DMA). Le DMA représente un problème environnemental majeur sur de nombreux sites miniers à travers la planète (B.R.G.M. 1997, Lakrim 2007).

Le DMA fait intervenir l'oxydation des sulfures avec le dioxygène de l'air. Cette réaction est accompagnée par la libération de cations bivalents associés aux sulfures (comme Fe²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Mn2+), d'oxyanions comme H₂AsO₄⁻ et SO₄²⁻ et de protons H⁺. La pyrite [FeS₂] est en général le sulfure le plus commun dans les rejets miniers ; son oxydation est à l'origine des principaux phénomènes de DMA. La réaction principale d'oxydation de la pyrite débute comme suit:

$$FeS_2 + 7/2 O_2 + H_2 O \rightarrow Fe^{2+} + 2 SO_4^{-2-} + 2 H^+$$
 1

Le Fe(II) est ensuite oxydé en Fe(III) selon la réaction :

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4}O_2 + H^+ \leftrightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2}H_2O \qquad 2$$

La réaction 2 est considérée comme l'étape limitante de l'oxydation de la pyrite, et dépend du pH. En conditions acides (pH en dessous de 5), la réaction est catalysée par des bactéries oxydantes acidophiles, qui peuvent accélérer la cinétique de la réaction jusqu'à un facteur de 10⁵.La dernière réaction fait intervenir l'oxydation de la pyrite par le Fe(III) généré au cours de la réaction 2 :

$$FeS_2$$
+ 14 Fe^{3+} + 8 $H_2O \rightarrow$ 15 Fe^{2+} + 2 SO_4^{-2-} + 16 H^+

La libération des produits d'oxydation - notamment Fe^{3+} et SO_4^{2-} - conduit à la formation de minéraux secondaires variés en fonction des conditions Eh-pH et de la disponibilité de certains éléments. On peut citer la jarosite [KFe₃(SO₄)₂(OH) ₆], formée en conditions très acides (pH<3), ou des oxyhydroxydes de fer comme la goethite [FeO(OH)], créés par déstabilisation des sulfates de fer (B.R.G.M. 1997,Lakrim 2007).

Cependant le DMA n'est pas la seule forme possible de drainage minier contaminé. Il existe une autre forme qui ne génère pas d'acidité : le drainage neutre contaminé (DNC). Le DNC provient de plusieurs processus, mais il y a trois causes générales à l'apparition de ce phénomène. La première est l'oxydation des sulfures des résidus miniers, qui provoque un relargage de métaux et de métalloïdes, accompagné par une production d'acidité. Cependant, la présence d'une quantité suffisante de minéraux neutralisants dans le milieu permet au pH de rester proche de la neutralité. Certains métaux et métalloïdes peuvent rester en solution dans cette gamme de pH.

La seconde cause est la mise en solutions de métaux et métalloïdes sans génération d'acidité. Par exemple, l'oxydation de la sphalérite [ZnS] à des pH proches de la neutralité relargue du zinc en solution, sans produire d'acidité (Lakrim 2007).

La troisième cause de génération de DNC est liée à la gestion environnementale des résidus miniers pour prévenir l'apparition de DMA (ennoiement des résidus ou recouvrement de type « couverture à effet de barrière capillaire » pour limiter la diffusion de l'oxygène par exemple). Certains métaux comme le zinc ou le nickel sont solubles à un pH proche de la neutralité. Ils pourront se retrouver dans les eaux de drainage, même si la réactivité des sulfures a été contrôlée.

Cependant, les réactions contrôlant le DMA et le DNC sont fondamentalement les mêmes. Un schéma récapitulant les principaux processus mis en œuvre durant le drainage minier contaminé (DMA et DNC) est présenté dans la Figure I.1.



Figure 1.1: Schéma récapitulant les principaux mécanismes de drainage minier contaminé (B.R.G.M. 1997).

I.3.Etude de la lixiviation de la mine ferrifère de Nador.

I.3.1. Conditions climatiques de la région.

La région de Nador bénéficie d'un climat méditerranéen. Les étés sont secs et très chauds, avec des températures pouvant grimper au-dessus des 40°C, et les précipitations sont quasiment absentes entre juin et septembre. Les automnes, quant à eux, peuvent devenir très pluvieux et les périodes de sécheresses s'ensuivent de périodes de fortes pluies orageuses. C'est aussi en automne que la dégringolade des températures est remarquable à Nador. Hivers et printemps sont eux aussi pluvieux, et les températures moyennes vont de 8°C à 18°C au meilleur de la journée. Bien qu'elle soit rare, la neige peut tomber à Nador de Décembre à Février et rester pour une période de quelques heures plutôt que toute une journée ou plus (Lakrim 2007).

I.3.2. Situation géographique de la mine.



Figure I.2 : Carte de la situation des gisements de la mine de Nador (Nord-est du Maroc, Lakrim 2007).

Les gisements de fer du Rif oriental sont situés sur la côte méditerranéenne, dans le massif de Bni Bou Ifrour à l'WSW de Nador. Ils se trouvent à 25 km environ du port de Béni Ansar. Les exploitations c'étant sur une superficie de 36Km² d'un terrain assez irrégulier, composé d'un ensemble de collines tranchant topographiquement sur les plaines avoisinantes, où l'altitude s'élève jusqu'au 696m, le point culminant du massif des Béni Bou Ifrour. Le secteur minier comprend quatre carrières principaux d'exploitation à savoir ; Ouiksane, Axara, Imnassen et Setolazar (Figure I.4).

Les coordonnées GPS des gîtes principaux sont les suivantes :

- Ouiksane N35°07'29", W3°01'27";
- Axara-Imnassen N35°07'09", W3°01'11";
- Bokoya-SétolazarN35°06'53"; W3°00'44".

I.4.Géologie des gisements.

I.4.1. Cadre principal de la structure géologique et leur rapport avec la minéralisation.

I.4.1.1. Unités lithostratigraphiques.

En se basant sur les travaux effectués par (Rhoden 1962, Ereno 1962 in Jabrane 1993, et Kerchaoui 1985 et 1994 in Lakrim 2007), les rapports de synthèses géologiques et ceux d'évaluation des réserves faites lors et après l'exploitation des gisements des mines SEFERIF. On peut distinguer les structures lithostratigraphiques suivantes :

A. **Secteur Ouest-Ouiksane**: Une puissante formation schiste-carbonaté (plus de 1500m) que les mineurs la nommé série de Rhoden. Elle commence par plus de 800m de schistes satinés (Sud) avec minces lits de quartzites et lentilles de calcaire. Vers le toit, une série de schiste satinés plus de 400m inclue la lentille de calcaire (filon de sidi Ibrahim) et des passés quartzitiques. Au mont d'Ouiksane, affleure les formations de calcaire Ouiksane puissante d'âge jurassique supérieur, d'environ 250m qui reposent sur les argiles rouges, soit en discordance angulaire très nette à l'Ouest, soit en discordance apparente vers l'Est. Le contact anormale est souligné par une brèche tectonique qui semble être tardive (Kerchaoui 1994 in Lakrim 2007).

Le gisement d'Ouiksane est entièrement encaissé dans les calcaires d'Ouiksane au contact des intrusions granodioritiques avec de larges extension au contacte supérieur entre les schistes et le calcaire. De 30 à 40m plus haut, le niveau des carbonates puissant de 10 à 15m encaisse la minéralisation lenticulaire (Figure I.3).



Figure I.3: Coupe géologique illustre les amas de magnétite pyriteux métasomatique au contact des grandiorites et des calcaires d'Ouiksane (Rhoden et Ereno in Lakrim 2007)

Tous les auteurs rapportent la série de Sétolazar au Crétacé inférieur, l'âge Néocomien (Choubert, Foure et Muret, Duflot et Al 1984. et Kerchaoui 1985 in Lakrim 2007). L'étude de (Duflot et al 1984) considère une partie des schistes comme tufs acides et tufs basiques. Cette fraction volcano-sédimentaire est nommée tuffites, affleurent à Axara sous forme de grandes lentilles (20 à 30m). L'aspect finement rubané, faciès corné et induré est contrôlé par l'effet thermique des intrusions magmatiques, métamorphisme régionale à l'hydrothermalisme et à la minéralisation. Elles ont une structure finement laminée et sont souvent verdâtres, parce qu'elles contiennent des chlorites et épidotes. Des faciès similaires affleurent au nord du jbel Ouiksane. Dans la partie nord du domaine, ces tuffites dessinent de large antiforme, à l'image de l'arc défini par les calcaires conglomératiques plus au sud. Ces deux observations confirment l'existence d'une large antiforme tardive constituant la structure majeure de ce domaine. Ces tuffites et pyroclastiques sont intercalées dans les turbidités d'âge berriasien inférieur à moyen. Elles représentent d'anciennes cendres volcaniques et indiquent l'existence d'un volcanisme explosif actif au moment de leur dépôt, c'est-à-dire au Berriasien (135 Ma).

B. Secteur d'Axara, Imnassen et Sétolazar: Ces lentilles de tuffites sont associées à une minéralisation, présentent localement d'Afra à l'est, jusqu'au jebel Ouiksane à l'ouest. Le minerai de fer est concentré dans les calcaires à proximité de ces tuffites.

I.4.1.2. Histoire géologique

La présente recherche bibliographique est basée sur les études faites depuis la découverte des gisements en 1914, jusqu'à présent. On rencontre :

• Epoque du jurassique sup-crétacé inférieur : Dépôt d'une puissante formation de faciès flysch à dominante marneuse avec niveau de grès et calcaire (à l'heure actuelle métamorphisé). Une séquence volcano-sédimentaire d'âge néocomienne constituée de tufs acides et basiques chloriteux porteuse d'une minéralisation primaire ferrugineuse (Duflot et Al 1984 in Jabrane 1993).

• Epoque de plissement antérieur à la tectonique tangentielle : L'instabilité tectonique se manifesté probablement dès le crétacé sup. (Rhoden et Ereno 1962 in Jabrane 1993) a considéré le plissement d'âge éocène oligocène tandis que Duflot et al 1984 distinguent deux phases:

Une à 14Ma avec une schistosité S1//S0 et mise en place de microgranodiorite,
D'hydrothermalisme déposant de la pyrrhotite et de la pyrite ;

✓ Deuxième à 12 Ma avec schistosité S2 oblique à la précédente. Intrusion de microgranodiorite II et dépôt de la pyrite et de la chalcopyrite.

La phase de la mise en place des nappes des glissements rifaine : Cette période s'associe à la genèse des structures listriques en failles plats, le sens de déplacement des blocs était vers le NW (Rhoden et Ereno 1962 in Jabrane 1993). Cette période est datée relativement après les intrusions granodioritiques de 6,5Ma (Hernandez 1983 in Jabrane 1993).

• Epoque de détente messénienne : Cette époque est caractérisée par la formation de bassins-grabens à complément détritique à la base et marin vers le sommet avec intercalations de tufs volcaniques. Aussi par une intense activité volcanique polyphasée qui s'étale de 7-8Ma à 2,5Ma, accompagnée des intrusions granodioritiques.

• Epoque pliocène à l'actuelle : Dépôt de formation détritiques (dépôt molassique) et la mise en place des dernières phases volcanique de 2,5Ma (Hernandez 1983), forte oxydation des minerais de magnétite pyriteuse et érosion avec formation des dépôts de minerais à hématite sur les pentes du mont d'Ouiksane.

On constate donc qu'entre les divers auteurs ayant étudié les gisements de la région, Il existe des divergences dans l'interprétation de l'évolution géologique.

I.5.Géochimiques et minéralogie des gisements.

I.5.1. Pétrographie de la minéralisation.

I.5.1.1. Description Macroscopique.

Le minerai est massif, Lorsque la substitution s'effectue dans les calcaires; il devient diffus et sous forme de stockwerk dans les granodiorites, stratifié dans les gréso-pélites. Le minerai massif est dense et noir, il est composé essentiellement de Magnétite (jusqu'à 85% en poids) et de pyrite (jusqu'à 10% en poids environ). Cependant, la proportion de sulfures sous forme de pyrite et Pyrrhotite peut parfois atteindre 20% en profondeur, ce qui minimise la valorisation du minéral d'une part et aggrave la situation sur le plan environnemental de l'autre part. Fréquemment, des veines de pyrite et de chalcopyrite parcourent le minerai massif ; Ces mêmes minéraux s'accumulent parfois dans le minerai sous forme de géodes. Les cristaux de chalcopyrite, peuvent atteindre 5 cm de long et ceux de pyrite sont de petites tailles en agrégats et rarement sous forme d'amas sphériques (Jabrane 1993). L'oxydation modifie la structure et la couleur du minerai que ce soit massif ou stratifié. Au cas où l'oxydation est intense, le minerai devient poreux et rougeâtre avec une présence importante de goethite et lépidocrocite. Au stade ultime de l'oxydation, le minerai devient friable (limoneux) et de couleur brune. En périphérie du massif, le minerai s'enrichit en barytine à Afra et Alicantina (Jabrane 1993).

I.5.1.2.Description microscopique.

En se basant sur les études effectuées par Jabrane 1993 on peut aboutir à conclure que ; la minéralisation est composée essentiellement d'oxydes et de sulfures de fer. Ces oxydes de fer sont la magnétite, l'hématite, la goethite (variété d'oxyhydroxyde de ferferrique , polymorphe α du composé FeO(OH)) et la lépidocrocite (au polymorphe de FeO(OH)). Les sulfures de fer sont la pyrite, la pyrrhotite et la marcassite. Parfois des sulfures de fer et de cuivre sont rencontrés représenter par la chalcopyrite, la digénite et la bornite. Enfin, la covellite est le seul sulfure de cuivre qui est observé dans les assemblages de la minéralisation. Les oxydes de fer sont de loin les plus importants et représentent 80% de la minéralisation (Jabrane 1993).

La magnétite : Se présente dans tout le minerai en substitution aux carbonates et silicates, notamment aux grenats.

L'hématite est secondaire, elle se forme aux dépens de la Magnétite primaire (martitisation), se présente sous forme massive et lamellaire avec une couleur légèrement verdâtre. La forme massive est la plus rencontrée.

La pyrite se présente sous forme automorphe ou xénomorphe, intergranulaire ou, englobant des plages de Magnétite. Dans certains endroits où la carbonatation (généralement en Calcite) est importante, la Pyrite est quasi absente et transformée souvent en Cal et Ankérite. Enfin, dans des zones intensément oxydées, notamment à l'Est du gisement (Afra et Alcantina), la Pyrite est complètement transformée en goethite, lepidocrocite et limonite (Jabrane 1993).

La pyrrhotine Se rencontré souvent en forme xénomorphe, intergranulaire ou sous forme de veines associées à la Magnétite. Différemment à la Pyrite, la proportion de Pyrrhotite dans le minerai peut atteindre 10 à 15%, surtout dans la zone située entre l'Est de la carrière d'Ouiksane et au Nord et à l'Est de la carrière d'Axara (Jabrane 1993).

Dans la carrière Est d'Ouiksane, la Pyrrhotite est systématiquement transformée en Marcassite.

Cette transformation est accompagnée d'une réduction de volume de 29%. Le vide ainsi créé est généralement occupé par des minéraux tardifs, notamment l'Ankérite.

La marcassite n'est pas seulement le produit de la transformation de la Pyrrhotite; elle peut observer éventuellement massive, si la Pyrite pseudomorphosée était massive et parfois sous forme de veines associées à la Calcite et formées aux dépens de la Pyrite.

La chalcopyrite est souvent associée à la Pyrite, la Magnétite et la Marcassite. Elle est toujours xénomorphe et intergranulaire. Lorsque la Chalcopyrite se forme aux dépens des carbonates, elle est contemporaine de la Pyrite massive. Par contre, sa formation est postérieure à cette dernière, quand elle se forme aux dépens de la Marcassite. Parfois, la Chalcopyrite qui se forme aux dépens de la Pyrite, se transforme à son tour en Bornite ou plus fréquemment en un mélange composé de Covellite et de Digénite.

La goethite se présente sous forme d'amas ou sous forme collophorme.

La limonite est également abondante et sous forme cryptocristalline, elle occupe parfois toute la roche. Elle est fréquemment associée à la Goéthite et à l'Ankérite.

Signalons que vers l'extrême Est du massif, on peut rencontrer de la galène associée à la lepidocrocite. La gangue est essentiellement composée de carbonates (Calcite, Dolomite et Ankérite) et de Quartz. Les silicates sont représentés par la Chlorite.

I.6.Composition géochimique

L'ancienne exploitation, avant 1960, avait presque complètement dépilé la puissante zone d'oxydation d'Ouiksane. Elle était constituée essentiellement d'hématite pure et de limonite sans sulfures. A l'heure actuelle, il ne reste plus de minerai de fer oxydé de bonne qualité. Dans tous les gisements il reste que de minerai primaire constitué de magnétite pyriteuse c-à-d de magnétite associe aux sulfures, tel que la pyrite et la pyrrhotite en quantités relativement importantes allant jusqu'à 10 % en volume de la masse de minerai (Manssouri 1985 in Lakrim 2007), ce qui importe plus profondément sur la cinétique et l'ampleur du phénomène(DMA). En plus de la présence du soufre non seulement menace l'environnement mais il réduit la valorisation économique du minerai et croît la charge de production. Toutefois, la nature chimique des minerais est un facteur d'activation et de génération de la DMA. Par ailleurs, les gisements de la SEFERIF peuvent être divisés en 3 classes :

Les minerais oxydés à hématite dont les teneurs en fer varient entre 60 et 68%:

 La magnétite pyriteux des amas massifs ; Nous citons les analyses des échantillons prélevés d'Axara et d'Imnassen en 1983, qui correspondent aux déterminations minéralogiques du tableau (Tableau I.1) ainsi que les données de Rhoden et Ereno 1962, pour Ouiksane et Setolazar.

Gisements	Fe	S	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	AL ₂ O ₃	Mn	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	As
Axara Nord	55.19	3.53	13.7	0.09	3.11	3.02	1.12	0.14	0.16	0.28	0.26	0.01
Axara Centre	51.53	4.05	13.85	0.14	3.25	2.82	1.58	0.24	0.37	0.29	0.27	0.01
Imnassen	54.07	4.37	10	0.05	2.69	2.11	2.05	0.20	0.26	0.31	0.3	
Ouiksane	64.0	4.0	3.0	0.038	0.22	0.18	0.7	0.22	() 			
Setolazar	55.0	4.2	8.0	0.04	2.8	2.7	2.2	0.09			0.13	

Tableau I.1 : Les données des analyses chimiques des gisements de Nador (Rhoden et Ereno 1962 in Jabrane 1993)

La teneur en fer varie d'un gisement à l'autre dans des limites relativement restreintes si on considère la moyenne des amas. A l'intérieur d'un amas, les variations sont très grandes (Tableau I.2). Par exemple, au niveau du gisement d'Ouiksane, dans l'amas principal le fer est en teneur de 60,41% mais, dans l'amas Sud il est de 62,48%. Les teneurs en soufre aussi présentent des variations importantes, il est largement diffusé dans les gisements. Il n'y a pas de concentration de fer sans sa présence. L'amas principal d'Ouiksane contient moins de 1,90% en moyenne, par contre le centre présente 3,03% de S (Tableau I.2). On n'observe aucune zonalité ni pour la distribution des soufres, ni pour celle de fer. Généralement, les minerais se caractérisent par des teneurs très possibles en phosphore, arsenic et titane. Aussi, par des teneurs assez élevées en SiO₂, CaO, MgO.

- Minerai rubané (feuilleté) ou schistes minéralisés. La présente liste des analyses de minéralisations (Bokoya supérieur et Axara sud) sont élaborées à titre de comparaison, elles n'ont pas de valeur économique jusqu'à l'heure actuelle (Rapport d'évaluation des réserves 1985);

Tableau I. 2 : Les teneurs en éléments majeurs dans les minerais rubanés de Bokoya sup et Axara(Rapport d'évaluation des réserves 1985).

Fe	AL ₂ O ₃	SiO ₂	Mn	S	Na ₂ 0	CaO	K ₂ O	MgO	Ρ
35 à 45%	0.9 à 2%	10 à 40%	0à1%	2 à 5%	0.2 à 0.8%	0.5 à 4%	0.2 à 0.8%	0.5 à 4%	0.04 à 0.08%

Ce type de minerai est très siliceux et caractérise le minerai de type taconite très répondu dans le monde. En plus ce type n'a pas été suffisamment bien étudié pour en tenir compte sur la conjoncture économique actuelle.

Chapitre II. CARACTERISTIQUES PHYSICOCHIMIQUE

II.1.Les analyses des sols

Les échantillons ont été prélevés de façon à couvrir toute la région d'étude (Tabeau II.1.). Un grand nombre d'analyses ont été réalisées au sein du laboratoire Géoressources et Environnement de la FSTF.

E1(B)	Remblais d'Ouiksane
E2(C)	Terrils de Sétolazar
E3(F)	Remblais Sétolazar
E4(G)	Sol Ouiksane
E5(H)	Terrils Ouiksane
E6(I)	Sol WouladHaddouRahhou
E7(J)	Sol proximité a de la digue
E8(D)	Terrils Axara
E9(K)	Tailing de la digue

Tableau II.1 : Origine des échantillons étudiés (Lakrim 2007)

II.1.1. Granulométrie

Dans ces analyses on a utilisé une série des tamis des diamètres suivants :

Table II.2 : Les tamis utilisés dans les analyses granulométriques

Tamis	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Diamètre en mm	2	1	<mark>0</mark> ,5	0,25	0,2	0,125	0,1	<mark>0,</mark> 08	0,063

II.1.2. Le coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité, U (sans dimension), attribue une valeur numérique à la granulométrie.

Il est calculé par le rapport suivant



Avec :

D 60 : diamétre correspend au 60% du poid cumulé ;

D10 : diamétre correspend au 10% du poid cumulé.

Si U est compris entre 1 et 2, la granulométrie est dite uniforme

II.1.3.Les résultats de granulométrie des remblais d'Ouiksane

Les résultats de granulométrie des remblais d'Ouiksane sont indiqués dans le Tableau II.3 et la figure II.1:

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids cumulé en mg
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	27,9	27,9
1>D>0.5	0,75	27,96	55,86
0.5>D>0.25	0,375	24,05	79,91
0.25>D>0.2	0,225	6,39	86,3
0.2>D>0.125	0,1625	8,11	94,41
0.125>D>0.1	0,1125	2,25	96,66
0.1>D>0.08	0,09	1,4	98,06
0.08>D>0.063	0,0715	1,05	99,11
0.63>D	0	0,8	99,91

Tableau II.3 : Résultats de la granulométrie des Remblais d'Ouiksane



Figure II.1 : Représentation graphique de poids et poids cumulé des remblais d'Ouiksane

La figure II.1 montre que les diamètres des grains qui dominent sont 1,5, 0,75, 0,315, sont ceux-qui correspondent aux classe suivants :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10=1,7 D60=0,5

Avec :

La granulométrie des remblais d'Ouiksane montre une dominance de la fraction sableuse D>0,2mm ce qui augmente la porosité de ces derniers, d'où une oxydation des sulfures métalliques qui vas être voir la lumière ce qui conduit au phénomène de lixiviation des déchets miniers. (Figure II.1).

II.1.4. Les résultats de la granulométrie des Terrils d'Ouiksane.

Les résultats de granulométrie des terrils d'Ouiksane sont indiqués dans le tableau II.4 :

Tableau II.4 : Résultats de la granulométrie des terrils d'Ouiksane.

classes de tamis centre d	de classe Poids en m	g Poids Cumulé en mg	
---------------------------	----------------------	----------------------	--

D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	23,96	23,96
1>D>0.5	0,75	20,81	44,77
0.5>D>0.25	0,375	19,06	63,83
0.25>D>0.2	0,225	5,86	69,69
0.2>D>0.125	0,1625	10,31	80
0.125>D>0.1	0,1125	4,53	84,53
0.1>D>0.08	0,09	4,43	88,96
0.08>D>0.063	0,0715	7,1	96,06
0.63>D	0	2,24	98,3



Figure II.2: Représentation: représentation graphique de poids et poids cumulé des terrils d'Ouiksane

Les diamètres des grains qui dominent sont 1,5, 0,75, 0,315, sont ceux qui correspondent aux classes suivantes :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10= 1,7 D60= 0,4

$$U = \frac{D60}{D10} = \frac{0,4}{1,7} < 1$$

Les terrils d'Ouiksane ont un indice d'uniformité inferieurs à 1

La partie sableuse représente plus que 60% du total ce qui favorise l'oxydation des sulfures métalliques et l'apparition du drainage minier acide (figure II.2)

II.1.5. Les résultats de la granulométrie Sols d'Ouiksane

Les résultats de granulométrie des sols d'Ouiksane sont indiqués sur dans le tableau II.5.et figure II.3 :

classes de tamis	Centre de classe	Poids en mg	Poids Cumulé en mg
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	36,3	36,3
1>D>0.5	0,75	27,87	64,17
0.5>D>0.25	0,375	17,39	81,56
0.25>D>0.2	0,225	3,99	85,55
0.2>D>0.125	0,1625	5,96	91,51
0.125>D>0.1	0,1125	2,4	93,91
0.1>D>0.08	0,09	2,21	96,12
0.08>D>0.063	0,0715	2,58	98,7
0.63>D	0	1,22	99,92

Tableau II.5 : Résultats de la granulométrie des sols d'Ouiksane



Figure II.3: Représentation graphique de poids et poids cumulé des sols d'Ouiksane.

Les diamètres des grains qui dominent sont 1,5, 0,75, 0,315, sont ceux qui correspondent aux classes suivants :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10= 1,80 D60= 1,00

$$U = \frac{D60}{D10} = \frac{1}{1,8} < 1$$

Concernant les sols d'Ouiksane toujours la fraction sableuse qui domaine, et toujours les sulfures métalliques vont s'oxyder, et le drainage miniers acide va s'engendrer. (Figure II.3).

Les remblais d'Ouiksane ont un pourcentage (vers 80%) en fraction sableuse alors que les terrils d'Ouiksane et les sols d'Ouiksane ont un pourcentage plus petit que celui des remblais, ce qui fait augmenter le pouvoir de provocation du drainage minier acide et le relargage des métaux lourds dans les remblais d'Ouiksane (figures II.1, II.12et II.3).

II.1.6. Les résultats de granulométrie des Terrils de Setolazar

Les résultats de granulométrie des terrils de Sétolazar sont indiqués dans le tableau II.6 et la figure II.4:

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids Cumulé en mg
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	16,3	16,3
1>D>0.5	0,75	21,44	37,74
0.5>D>0.25	0,375	19,11	56,85
0.25>D>0.2	0,225	5,59	62,44
0.2>D>0.125	0,1625	9,94	72,38
0.125>D>0.1	0,1125	4,86	77,24
0.1>D>0.08	0,09	4,75	81,99
0.08>D>0.063	0,0715	7,25	89,24
0.63>D	0	9,79	99,03

Tableau II.6: Résultats de la granulométrie des terrils de Sétolazar



Figure II.4: : Représentation graphique de poids et poids cumulé des Terrils de Sétolazar.

Les diamètres des grains qui dominent sont 0,75, 0,315, 1,5, sont ceux qui correspondent aux classes suivants :

1>D>0.5		

2>D>1	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10= 1,7 D60=0,3

 $U = \frac{D60}{D10} = \frac{0.3}{1.7} < 1$

Pour les terrils de Setolazar il y a une certaine homogénéité de point de vue granulométrie, la partie sableuse est constitué un pourcentage de 40% alors que la fraction limoneuse prend un pourcentage plus de 50% ce qui va minimise le phénomène de drainage minier acide (figure II.4).

II.1.7. Les résultats de la granulométrie des Remblais de Sétolazar

Les résultats de granulométrie des Remblais de Sétolazar sont indiqués dans le tableau II.7 et la figure II.5.

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids cumulé en mg
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	36,3	36,3
1>D>0.5	0,75	19,6	55,9
0.5>D>0.25	0,375	14	69,9
0.25>D>0.2	0,225	15,01	84,91
0.2>D>0.125	0,1625	3	87,91
0.125>D>0.1	0,1125	2	89,91
0.1>D>0.08	0,09	2,28	92,19
0.08>D>0.063	0,0715	5,5	97,69
0.63>D	0	2,06	99,75

Tableau II.7 : Résultats de la granulométrie des Remblais de Sétolazar





Le diamètre des grains qui domine est 1,5, sont ceux qui correspondent aux classe suivants : 2>D>1

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10= 1,7 D60= 0,5

$$U = \frac{D60}{D10} = \frac{0.3}{1.7} < 1$$

Pour la granulométrie des remblais de Sétolazar, Elle est hétérogène mais avec la dominance de la fraction sableuse d'où une favorisation du drainage miniers acide (figure II.5).

II.1.8. Les résultats de granulométrie des Terrils d'Axara

Les résultats de granulométrie Terrils d'Axara sontindiqués dans le tableau II.8 et la figure II.6 :

classes de	centre de classe	Poids en mg	Poids Cumulé en mg
tamis			
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	23,07	23,07
1>D>0.5	0,75	20,25	43,32
0.5>D>0.25	0,375	17,04	60,36
0.25>D>0.2	0,225	5,3	65,66

Tableau II.8: Résultats de la granulométrie des terrils d'Axara

0.2>D>0.125	0,1625	11,51	77,17
0.125>D>0.1	0,1125	10,06	87,23
0.1>D>0.08	0,09	6,57	93,8
0.08>D>0.063	0,0715	4,34	98,14
0.63>D	0	1,23	99,37



Figure II.6 : Représentation graphique de poids et poids cumulé des Terrils d'Axara .

Les diamètres des grains qui dominent sont 1,5, 0,75, 0,315, sont ceux qui correspondent aux classes suivants :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10=1,7, D60=0,3

$$U = \frac{D60}{D10} = \frac{0.3}{1.7} < 1$$

Pour les terrils d'Axara il y a une certaine homogénéité de point de vue granulométrie, la partie sableuse est constitué un pourcentage de 40% alors que la fraction limoneuse prend un pourcentage plus de 50% ce qui va minimise le phénomène de drainage minier acide (figure II.6).

II.1.9. Les résultats de granulométrie du Tailing de la digue.

Les résultats de granulométrie Tailing de la digue sont indiqués dans le tableau II.9 et la figure II.7.

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids cumulé en mg
D>2	3	0	0
2>D>1	2	9,5	9,5
1>D>0.5	0,75	21	30,5
0.5>D>0.25	0,375	35,9	66,4
0.25>D>0.2	0,225	10,5	76,9
0.2>D>0.125	0,1625	13,8	90,7
0.125>D>0.1	0,1125	3,2	93,9
0.1>D>0.08	0,09	2	95,9
0.08>D>0.063	0,0715	3,1	99
0.63>D	0	1	100

Tableau II.9: Résultats de la granulométrie des tailing de la digue.





Le diamètre des grains qui domine est 0,375, sont ceux qui correspondent aux classes suivants : 0.5>D>0.25

$$U = \frac{D60}{D10} = \frac{0,4}{1,3} < 1$$

Pour les tailings de la digue, les grains forment une hétérogénéité mais toujours la fraction sableuse qui domine, mais cette fois les grains ayant un diamètre 0,3 sont les plus fréquents, ce qui est logique a cause des précipitas formés dans l'étape de traitement (figure II.7).

II.1.10. Les résultats de granulométrie Sol à proximité de la digue

Les résultats de granulométrie du sol à proximité de la digue sont indiqués dans le tableau II.10 et la figure II.8.

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids Cumulé en mg
D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	19,94	19,94
1>D>0.5	0,75	20,67	40,61
0.5>D>0.25	0,375	19,32	59,93
0.25>D>0.2	0,225	6,11	66,04
0.2>D>0.125	0,1625	10,96	77
0.125>D>0.1	0,1125	5,42	82,42
0.1>D>0.08	0,09	6,6	89,02
0.08>D>0.063	0,0715	7,57	96,59
0.63>D	0	1,01	97,6

Tableau II.10 : Résultats de la	ı granulométrie du sol à	proximité de la digue.
----------------------------------	--------------------------	------------------------



Figure II.8: Représentation graphique de poids et poids cumulé des Sols a proximité de la digue.

Les diamètres des grains qui dominent sont 1,5. 0,75. 0,315, sont ceux qui correspondent aux classes suivants :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10=1,8, D60=0,3

$U = \frac{D60}{D10} = \frac{0,3}{1,8} < 1$

Pour les sols de la proximité de la digue, l'indice d'uniformité montre que ces derniers ne présentent aucune uniformité,

La fraction sableuse a un pourcentage peut prêt de 40%, ce qui va diminuer un peu le phénomène drainage miniers acide.

II.1.11.Les résultats de granulométrie des Sols Woulad Hadou Rahou

Les résultats de granulométrie sols Woulad Hadou Rahou sont indiqués dans le tableau II.11 et la figure II.9 :

Tableau II.11 : Résultats de la granulométrie des sols Woulad Hadou Rahou.

classes de tamis	centre de classe	Poids en mg	Poids cumulé en mg

D>2	2	0	0
2>D>1	1,5	32,21	32,21
1>D>0.5	0,75	28,28	60,49
0.5>D>0.25	0,375	18,32	78,81
0.25>D>0.2	0,225	4,11	82,92
0.2>D>0.125	0,1625	6,34	89,26
0.125>D>0.1	0,1125	2,53	91,79
0.1>D>0.08	0,09	2,24	94,03
0.08>D>0.063	0,0715	4,23	98,26
0.63>D	0	0,98	99,24



Figure II.9 : Représentation graphique de poids et poids cumulé de Sol Woulad Haddou Rahou.

Les diamètres des grains qui dominent sont 1,5, 0,75, 0,315, sont ceux-ci

correspondent aux classe suivants :

2>D>1	
1>D>0.5	
0.5>D>0.25	

Pour le coefficient d'uniformité on a : D10=1,7, D60=0,9

 $U = \frac{D60}{D10} = \frac{0,9}{1.7} < 1$

Les sols de oulad haddou rahhou presentent une hétérogenité au niveau de son granulometrie, la fraction sableuse et dominante (a peu prêt de 60% du total de l'échantllion analysé).

La dominance de la fraction sableuse fait que ce sol subit une aération du milieu, en présence de l'oxygène, les minéraux sulfureux vont subir une réaction d'oxydation.

Le résultat final sera un drainage minier acide sur le milieu.

II.1.12. Interprétation de la granulométrie

Dans tous les échantillons on observe que le coefficient d'uniformité est inférieur à 1, ce qui montre que les échantillons ont une certaine hétérogénéité au niveau de leurs granulométries,

en même temps les fractions supérieures à 0,25 et inférieurs à 2 ont un grand pourcentage entre eux que les diamètres inferieurs à 0,25.

Cette hétérogénéité permet à l'eau de prendre un temps de résidence important dans le sol, ce qui fait une acidification du milieu et le relargage des métaux lourds par le drainage minier acide.

II.2.Analyses de pH.

Les résultats de pH sont donnés par Le tableau II.12 et figurer dans la figure II.10 a fin de faire une interprétation des variations de cette acidité.

Station	рН (Н2О)	pH (CaCl2)	pH (KCl)
RB Ouiksane	4,3	3,66	3,66
TRL Sétolazar	7,1	6,22	5,54
RB Sétolazar	9	7,07	8,4
Sol Ouiksane	8,6	8,15	8,2
TRL Ouiksane	4,7	3,99	4,36
Sol wlad haddourahhou	8	7,5	7,8

Tableau II.12 : Résultats d'analyse des pH.

Sol proximité a de la digue	8,8	7,8	8,47
TRL Axara	2,9	3,3	3,87
Tailing de la digue	2,1	2,36	2,25



Figure II. 10: Analyses des pH des différents échantillons.

Le tableau II.12 et la figure II.10, montrent que les pH des échantillons que ce soit le pH (KCl), le pH (CaCl₂) ou le pH (H₂O) subissent la même variation dans toutes les stations. La différence entre ces pH est entre 1 et 2 unités.

Prenons les 2<pH<5 qui sont des pH acides, on trouve les échantillons prélevé de:

- Remblais d'Ouiksane ;
- Terrils d'Ouiksane;
- Terrils de Sétolazar;
- Terrils d'Axara;
- Tailing de la digue.

Cette acidification du milieu est due à l'oxydation de la pyrite existante dans les rejets miniers et la formation du drainage miniers acide, les valeurs basiques du pH malgré les rejets miniers peuvent s'interpréter par la présence de la formation carbonatée (CaCO₃).

La présence des carbonates (CaCO₃) dans les échantillons joue un rôle important dans la neutralisation des échantillons et même de rond basiques ces derniers.

II.3.Analyse de potentiel électrique Eh

Pour le potentiel électrique Eh, on observe qu'il est inversement proportionnel au pH, donc les échantillons qui ont des pH faible ont un des potentiels Eh élevés Eh>0 (voir tableau II.13 et figure II.110, figure II.11).

Donc les échantillons qui ont un potentiel électrique Eh>0 sont :

- Remblais d'Ouiksane ;
- Terrils d'Ouiksane;
- Terrils de Sétolazar;
- > Terrils d'Axara;
- Tailing de la digue.

Station	Eh en mv
RB Ouiksane	143
TRL Sétolazar	-10
RB Sétolazar	-107
sol Ouiksane	-5
TRL Ouiksane	115
Sol wlad haddou rahhou	-50
Sol proximité a de la digue	-99
TRL Axara	208
Tailing de la digue	241

Tableau II.13: Résultats d'analyse de potentiel électrique Eh.



Figure II.11: Analyse du potentiel électrique Eh des échantillons.

Dans les étapes de l'altération des métaux sulfureux, les réactions d'oxydoréduction vont arriver d'où une libération des électrons dans le milieu.

Un courant électrique est donc se crée, ce qui amène a une variabilité des potentiel Eh.

Les échantillons les plus pollués libèrent plus de protons que les autre ce qui est expliquer par les valeurs négative de potentiel électrique.

II.4.Analyse de la conductivité

Après l'analyse de la conductivité électrique dans les échantillons prélevés, on a obtenu les résultats suivants (Tableau II.14, Figure II.12) :

Station	Conductivité en μs/cm (H2O)
RB Ouiksane	1136
TRL Sétolazar	747
RB Sétolazar	66,7
sol Ouiksane	105,1
TRL Ouiksane	753
sol wlad haddourahhou	59

Tableau II.14 : Résultats de l'analyse de la conductivité des échantillons.

Sol proximité a de la digue	78,5
TRL axara	1040
Tailing de la digue	2820





La conductivité est très élevée pour la solution des échantillons qui contient KCl par rapport à ceux qui contiennent H₂O et CaCl₂ (voir tableau II.14 et figure II.12).

Les échantillons qui connaissent une augmentation de conductivité par rapport à la courbe de tendance linéaire de la courbe de conductivité des échantillons sont :

- Remblais d'Ouiksane ;
- Terrils d'Ouiksane ;
- Terrils de Sétolazar;
- Terrils d'Axara ;
- Tailing de la digue.

La conductivité électrique est un indicateur de la conduction du courant électrique dans les solutions des échantillons, elle est liée au potentiel électrique, les échantillons les plus pollués libèrent plus de protons que les autre.

La conductivité est considérée aussi comme indicateur des sels dissous dans les solutions des échantillons, d'où les échantillons qui ont des conductivités élevés seront riches en sels minéraux (tailing de la digue sont très riches en sels minéraux).

II.5.Analyse de taux des sels dissous

L'analyse de taux des sels dissous dans les échantillons prélevés amène aux résultats suivants (Tableau II.15, Figure II.13) :

Station	TDS mg/l H2O
RB Ouiksane	608
TRL Sétolazar	398
RB Sétolazar	35,5
Sol Ouiksane	56,2
TRL Ouiksane	404
sol wlad haddourahhou	31,3
sol proximité a de la digue	41,7
TRL Axara	550
Tailing de la digue	16,49



Figure II.13: Analyse de taux des Sels dissous des différents échantillons.

Dans l'observation du taux des sels dissous, on constate que ce dernier est lié à la conductivité d'une façon interactive (voir tableau II.15 et figure II.13).

Les échantillons qui ont des valeurs élevées sont donc trop charge en taux de sels dissous. Ce qui s'explique par le relargage de ces derniers dans les échantillons après une dissolution en utilisant de l'eau distillée.

II.6.Analyse de la Résistivité

Les résultats de la résistivité sont présentés dan le Tableau II.16 et Figure II.14 :

Tableau II.16: Résultats d'analyse de la résistivité des échantillons.

Station	Résistivité en Ω.cm H2O	Résistivité en Ω.cm2 CaCl2	Résistivité en Ω.cm3 KCl	
Romblais Ouiksane	880	635	170	
Terrils Sétolazar	1337	761	166	
Romblais Sétolazar	14950	1143	167	
Sol Ouiksane	9480	1134	168	
Terrils d'Ouiksane	1325	639	163	
Sol wlad haddourahhou	16990	1173	165	
Sol proximité a de la 12700 digue		1185	168	
Terrils axara	970	633	158	
Tailing de la digue	354	434	138	



Figure II.14: Analyse de la résistivité des échantillons.

Pour la solution de H₂O qui contient les échantillons on observe une variation de la résistivité d'une manière interactive dans le même sens que le pH, et proportionnelle au potentiel électrique (voir tableau II.16 et figure II.14).

Donc les échantillons qui en une faible résistivité au-dessous de la courbe de tendance linéaire sont ceux-ci qui ont des pH acides :

- Remblais d'Ouiksane ;
- Terrils d'Ouiksane;
- Terrils de Sétolazar;
- > Terrils d'Axara;
- Tailing de la digue.

II.7.Analyse de la Calcimétrie.

Les analyses de la calcimétrie sont presenter de le tableau II.17 et figurer dans le graph II.15 comme suit :

Station	% en Ca CO3
RB Ouiksane	2,7
TRL Sétolazar	0
RB Sétolazar	12
sol Ouiksane	22
TRL Ouiksane	2,8
sol wlad haddourahhou	7,6
Sol proximité a de la digue	52,6
TRL Axara	2,7
Tailing de la digue	10,2

Tableau II.17. Résultats d'analyse de la Calcimétrie des échantillons.



Figure II.15: Analyse Calcimétrique des échantillons.

Pour la calcimétrie, les échantillons qui ont de pH basique on observe qu'ils ont un taux de CaCO₃ très élevé,

Les carbonates de calcium $CaCO_3$ sont des bases fortes qui jouent un rôle important dans la diminution de l'acidité.

On peut expliquer Cette basicité forte sans aucun par la présence d'une formation carbonatée dans la région (Voir tableau II.17 et figure II.15).

II.8. Etude géochimique des échantillons liquides

II.8.1.Préparation aux analyses géochimiques

Les échantillons prélevés de différents emplacements, autour des anciens points d'exploitations minières, sont contrôlés et vérifiés. Après les mesures de pH et la conductivité électrique, ces liquides ont été transportés au laboratoire de Géoressources et Environnement de la F.S.T Fès, pour qu'ils subissent une préparation préliminaire. Ensuite, ces préparations ont été envoyées au CNRST pour effectue des analyses par l'appareil ICP.

II.8.2. Caractérisation des échantillons liquides

Ce sont des échantillons d'eau, contenant de la matière en suspension. Ils ont été prélevés à partir des différents sites (Lacs d'eau, puis, cours d'eau et galerie). Nous avons pris soin d'échantillonner sur une grande surface de la zone d'étude, Il y a dix échantillons liquides en total (tableau II.18). Les échantillons liquides E.L1 et E.L2 proviennent de la mine d'Axara. Ils présentent une couleur rougeâtre caractérisant l'effet du fer. Le PH est très acide pH<3 (PH(E.L1) = 2.51 et pH(E.L2) = 2.27). Les échantillons E.L1, est prélevé de la côte Sud et EL2 de la côte Nord du lac. La conductivité est de l'ordre de 19900µs/cm pour E.L1 et indéterminé (plus de 20000µs/cm) pour E.L2.

Les échantillons $E.L_3$ et $E.L_4$; $E.L_3$ est prélevé d'un cours d'eau qui sourde à partir des remblais riche en carbonates, sur la ligne principale de l'oued Ouiksane. EL_4 a été réalisé à partir du même cours d'eau vers l'aval au niveau d'une digue anti érosive à seuils en gabion.

Le pH est proche de la neutralité, cas des échantillons ; $pH(EL_3) = 6.90 \ et$ $pH(EL_4) = 7.92$. Par contre la conductivité électrique est également contrasté tel que ; 6.7ms pour EL₃ et $16080\mu s/cm$ pour E.L₄.

*L'échantillon E.L*₅; Ce liquide a été échantillonné à partir d'un étendu d'eau près de la piste qui relie la mine d'Axara à celle d'Ouiksane. Le $pH(E.L_5) = 8.44$ est relativement basique, la conductivité électrique est de $1763\mu s/cm$.

*Echantillon E.L*₆ ; Issus des eaux souterrains qui s'écoule dans les galeries d'Ouiksane, dans le cœur du gisement (Lakrim 2007). Les galeries se trouvés ennoyé, le pH est très acide, de l'ordre de 2.17, la conductivité électrique est de 8530 μ s/cm.

*Echantillon E.L*₇; Prélevé d'un cours ruisselé, sourde d'un piémont des haldes à stériles de Sétolazar. Ce ruissèle de couleurs rougeâtre de nature visqueuse, très chargée de matière en suspension. La conductivité électrique est importante (>20000 μ s/cm). De même le *pH* très acide de l'ordre de *1.84*.

*Echantillons E.L*₁₀, *E.L*₉, *E.L*₈; Ce sont des eaux des puits avoisinant la zone minière. EL8 et EL9 proviennent de deux puis abandonnés, situés à Sétolazar (Douar Haddou Rahhou). Le pH est respectivement égal à 7.2 et 7.55. La conductivité est de $4900\mu s/cm$ pour E.L₈ et de $4380\mu s/cm$ pour E.L₉.

Le prélèvement EL_{10} a été échantillonné à partir d'un puits situé à Douar Ichamlallen, qui approvisionne la population du Douar en eau potable et aussi les autres Douars avoisinant. Son p*H égal à 7.48* et une faible conductivité électrique qui ne dépasse pas 1089µs/cm.

Tableau II.18. : Stations de prélèvement des échantillons liquides.

Numéro de l'échantillon	Station de prélèvement
E.L 1	la mine d'Axara

E.L 2	la mine d'Axara
E.L 3	cours d'eau qui sourde à partir des remblais riche en carbonates, sur la ligne principale de l'oued Ouiksane
E.L 4	même cours d'eau de (E.L3) vers l'aval au niveau d'une digue anti érosive à seuils en gabion
E.L 5	étendu d'eau près de la piste qui relie la mine d'Axara à celle d'Ouiksane
E.L 6	eaux souterrains qui s'écoulent dans les galeries d'Ouiksane
E.L 7	cours ruisselé sourde d'un piémont des haldes à stériles de Sétolazar
E.L 8	puis abandonnés, situés à Sétolazar (Douar HaddouRahhou) Sétolazar
E.L 9	puis abandonnés, situés à Sétolazar (Douar HaddouRahhou) Sétolazar
E.L 10	puits situé à Douar Ichamlallen Sétolazar

II.8.3. Résultats d'analyses des liquides

L'ensemble des échantillons liquides ont fait l'objet des mesures d'acidité, de la conductivité électrique et des analyses des métaux lourds, notamment, As, Cd, Cr, etc. (tableau II.19).

Numéro de l'échantillon	рН	Conductivi té en μs//cm	<i>As</i> en ppm.	Cd en ppm.	<i>Cr</i> en ppm.	<i>Cu</i> en ppm.	<i>Fe</i> en ppm.	<i>Ni</i> en ppm.	<i>Pb</i> en ppm.	<i>Zn</i> en ppm.	S en ppm.
E.L 1	2,51	19900	0,00542	0,1	0,46	23,48	781,89	7,05	0,07	20,74	36498,52
E.L 2	2,27	Indéter	0,02	0,19	2,11	17,43	1052,53	21,53	0,03	83,84	38943,52
E.L 3	6,90	6700	0,00542	0,01	0,0005	0,233	1,26	0,02	0,04	0,0879	4858,93
E.L 4	7,92	16080	0,00542	0,01	0,01	0,263	3,08	0,03	0,09	0,1279	9737,63
E.L 5	8,44	1763	0,00542	0,01	0,0005	0,243	1,03	0,01	0,06	0,0679	930,5
E.L 6	2,17	8530	0,05	0,32	0,64	256,76	3724,43	6,14	0,16	44,55	19970,1
E.L 7	1,84	Indéter	1,21	0,98	17,05	986,39	28837,3	82,56	1,17	204,52	77825,43
E.L 8	7,2	4900	0,00542	0,02	0,0005	0,38	206,46	0,07	0,08	0,57	4667,79

Tableau II.19 : Résultats des analyses géochimiques des échantillons solides en ppm.

E.L 9	7,55	4380	0,00542	0,01	0,0005	0,293	2,57	0,08	0,07	0,1679	1881,42
E.L 10	7,48	1089	0,00542	0,01	0,01	0,243	1,89	0,04	0,05	0,3179	403,61





Concernant les échantillons E.L7 et E.L8, on observe la présence de Cu, Fe et de S. On peut déduire que ces échantillons proviennent des sols riches en chalcopyrite (figure II.16).



Figure II.17 : Courbes de variation de Fe, S.

Concernant les échantillons dans tous les prélèvements, on observe la présence de Fe et de S. On peut déduire que ces échantillons proviennent des sols riches en pyrite, particulièrement dans l'échantillon E.L1, E.L2, E.L7 (figure II.17).



Figure II.18 : Courbes de variation de Zn, S.

Concernant les échantillons E.L1, E.L2, E.L6 et E.L7, on observe la présence de Zn et de S. On peut donc déduire que ces échantillons proviennent des sols riches en sphalérite (figure II.18).



Figure II.19 : Courbes de variation de Pb, S.

Concernant les échantillons dans toutes les prélèvements, on observe la présence des de Pb et S, donc on peut déduire que ces échantillons proviennent des sols riches en galène, avec une forte quantité dans l'échantillon E.L7 (figure II.19).



Figure II.20 : Courbes de variation de Ni, S.

Concernant les échantillons dans toutes les prélèvements, on observe la présence des de Ni et S, donc on peut déduire que ces échantillons provient des sols contient la millérite, avec une forte quantité dans l'échantillon E.L1, E.L2, E.L6, E.L7 (figure II.20).

II.8.4.Discussion

L'observation de ces courbes montre la présence de la pyrite, de la chalcopyrite, de la sphalérite, de la galène et de la millérite dans l'échantillon E.L7 (prélevé du cours ruisselé sourde d'un piémont des haldes à stériles de Sétolazar), ce qui influence la qualité de cette eau (pH=1,84).

Pour les eaux qui ont un pH>6,5 (EL3, EL4, EL5, EL9, EL10) : la matrice à une faible quantité de pyrite, et de chalcopyrite, même une absence de sphalérite et de millérite ce qui engendre un drainage minier de faible acidité d'où des valeurs de pH relativement élevées, (pH(EL3)=6,9, pH(EL4)=7,92, pH(EL5)=8,44,pH(EL9)=7,55, pH(EL10)=7,48) .La présence d'une formation carbonatée explique l'absence des sulfures métalliques et la diminution de l'acidité de ces eaux.

II.8.5. Test de lixiviation

On a adapté en collaboration avec Lakrim sous l'encadrement de notre enseignent Jabrane, le système de lixiviation selon l'OSites (S-21) au matériel du laboratoire, et on a prélevé des échantillons liquide afin de faire l'analyse des métaux lourds à CNRT (tableau II.20). Tableau II.20 : quantité des lixiviats a recupéré et les analyses caractérisant chaque temps de recupération selon l'Osites (S-21) .

Lixiviat	E/S	Substances organiques très solubles (solubilité > 0,1 g/l)	Substances organiques peu solubles (solubilité < 0,1 g/l)	Métaux lourds
L1	0,25	Х	-	Х
L2	3	-	X	X
L3	6	-	Х	Х

II.8.5.1. Résultats

Les analyses de ces résultats par la méthode ACP (analyse en principales composantes) aboutit aux tableaux II.21 et II.22 :

Variables	Cu	Ni	Pb	Zn
Cu	1	0,992	0,969	0,462
Ni	0,992	1	0,956	0,525
Pb	0,969	0,956	1	0,597
Zn	0,462	0,525	0,597	1

Tableau II.21 : matrice de corrélation entre variables.

Tableau II.22 : Corrélations entre l	les variables et les facteurs.
--------------------------------------	--------------------------------

	F1	F2	F3	F4
Cu	0,967	-0,252	-0,023	0,012
Ni	0,976	-0,178	-0,122	-0,008
Pb	0,984	-0,080	0,158	-0,004
Zn	0,671	0,741	-0,020	0,002

II.8.5.2. Graphes de l'ACP des échantillons



Figure II.21: Graphes d'analyse factorielle en principales composantes des éléments analysés.

II.8.5.3. Analyse et interprétation

La représentation graphique des métaux sur les graphes montre une corrélation entre le plomb le nickel et le zinc, leurs projection sur l'axe F1 est positive, mais leurs projections sur F2 est négatives (figure II.21).

Le zinc présente une anomalie par rapport aux autres éléments, sa projection est positive sur les deux axes F1 et F2 (figure II.21),

On peut dire que la roche contenant le zinc (la sphalérite ZnS) est la plus soluble que les autres donc il sera en grande quantité dans les premières lixiviats récupérés, ce qui est vérifié après une observation des analyses (figurre II.21).

Cette corrélation est aussi s'explique par la pollution des deux sites choisis terrils d'Axara et taillig de la digue (figure II.21).

Concernant la projection des lixiviats prélevés on observe une corrélation entre les lixiviats de deuxième et troisième prélèvement, avec une aberration des premiers lixiviats prélevés (projection positive sur les deux axes pour C EL1, et une projection positive sur l'axe F1 et négative sur F2 pour K EL2) donc les lixiviats C EL2, C EL3, KEL2, KEL3 peuvent être libéré presque la même quantité en métaux (figure II.21).

L'assemblage des deux graphes montre que le lixiviat C EL1 libère en premier le Zinc (C EL1 ets proche de Zn, par contre tous les autres lixiviats sont proches du plomb nickel et cuivre (figure II.21).

Finalement en peut conclure que la sphalérite et moins résistante que la galène, la millerite et la chalcopyrite, donc c'est qui est la plus soluble (figurre II.21).

II.9.Localisation des zones vulnérables à la contamination par le DMA, moyennant le SIG : Cas de la mine de ferrifère de Nador.

Cette étude est faite en collaboration avec le doctorant Lakrim, Elle est axée sur la cartographie du risque du Drainage Minier Acide (DMA). On vise la définition des zones prioritaires pour l'aménagement et la maîtrise de ce risque. La détermination spatiale de la pollution serait utile pour définir et repérer l'incident potentiel. La méthodologie proposée est basée sur une analyse qualitative des facteurs à l'origine de la génération ou de l'activation du risque de type (DMA).

Dans le présent travail, on a défini les zones prioritaires pour l'aménagement suivant un classement des zones moyennant le SIG.

La cartede la figure 25, montre les différentes zones d'études, notamment les mine de Setolazar, de Ouiksane, d'Axara, et d'Imnassen. Elles sont entourées par le poliligne noir,





Dans ce travail on a considéré les facteurs suivants dans la classification SIG de la zone :

- La répartition des rejets miniers ;
- La répartition des sulfates ;
- La distribution de fer ;
- La pente.

Le tableau II.23 indique les Indice de classement des zones selon le degré de contamination :

Tableau II.23 : Indices de classement des zones selon l'intensité des contaminations (Lakrim 2011).

Qualité dans la génération du risque (DMA)	Très mauvais Zone intacte	Mauvais Risque très faible	Moyen légère contamination	Bon Risque moyen	Très bon Risque très élevé
Indice de vulnérabilité	0	1	2	3	4

II.9.1.La carte des rejets miniers.

Les rejets sont classés selon la nature et le degré d'oxydation des constituants sulfureux, y compris la couleur des déchets miniers solides et liquides ainsi que le pH des prélèvements liquides. On distingue dès lors cinq classes qui sont codées de 0 à 4 (tableau II.23 et figure II.23).



Figure II.23 : carte de répartition qualitative des rejets minier (Lakrim 2011).

II.9.2. La carte de la répartition des sulfates.

La présence d'une quantité appréciable des minéraux sulfurés dans les déchets de la mine de fer de Nador (pyrite, pyrrhotite, sphalérite, et galène), en présence des agents météoritiques, induit l'oxydation des sulfures et provoque ainsi l'abaissement des pH des milieux environnants, selon la réaction suivante :

Minéral sulfureux + O_2 + $H_2O \rightarrow$ sulfate + acidité + métaux (eq.1)

Sur la base de la quantité du soufre présent dans les rejets, nous avons distingués six zones à caractères distinctifs. Elles sont codifiées de 0 à 5 selon les limites suivantes :

- Zone intacte (0), dont la concentration du soufre est inférieure à 250 ppm. Cette teneur est équivalente à la norme européenne admissible pour la potabilité de l'eau.

- Zone normale (1), dont la teneur varie entre 250 ppm et 350 ppm; C'est l'intervalle entre la norme européenne admissible pour l'eau potable et la teneur relevé de l'eau de robinet de la ville d'Azghanghan.

- Zone sensible (2), dont la teneur varie entre 350 ppm et 450 ppm. Cet intervalle défini la teneur en soufre de l'eau de robinet de la ville d'Azghanghan et la teneur en soufre d'un puit sis au Douar OuladHaddou Rahou, qui approvisionne la population locale sous la direction de l'office national de l'eau potable (ONEP).

- Zone critique à risque faible (3), dont la teneur est entre 450 ppm et 500 ppm. Cet intervalle défini la teneur dans le puis à Douar Oulad Haddou Rahou contrôlé par l'ONEP et la norme admissible par l'organisation mondiale de la santé (OMS), des eaux de surface.

- Zone à risque moyen (4), dont la teneur est entre 500 ppm et 4700 ppm. Cet intervalle défini la norme admissible par l'OMS des eaux de surface et le puits abandonné sis à Sétolazar.

- Zone à risque fort (5), dont la teneur est supérieure à 4700 ppm, et indiquant les zones qui sont riches en sulfures (figure II.24).



Figure II.24 : Carte de répartition quantitative du soufre (Lakrim 2011).

II.9.3. La carte de distribution du fer.

La carte de la distribution du fer a également été subdivisée en cinq classes selon le niveau de contamination. On spécifie les catégories suivantes :

- Zone intacte (0), dont la teneur en fer est inférieure à 5 ppm. Cette teneur est le seuil minimal admissible par l'organisation mondiale de la santé (OMS) en 2006 pour les eaux de surface.

- Zone normale (1), dont la teneur varie entre 5 ppm et 50 ppm. C'est l'intervalle admissible par l'OMS des eaux de surface.

- Zone contaminée (2), dont la teneur varie entre 50ppm et 210ppm. Cet intervalle représente la norme admissible de l'OMS pour les eaux de surface et la norme marocaine.

- Zone à risque (3); dont la teneur varie entre 210 ppm et 2100 ppm.Cet intervalle représente la teneur en fer entre la norme marocaine et la teneur analysée dans un puits abandonné sis à Sétolazar.

- Zone à risque fort (4), dont la teneur est supérieure à 2100 ppm, qui représente les endroits à pH très faible où l'oxydation est intense (figure II.25).



Figure II.25: Carte de répartition quantitative du fer (Lakrim 2011).

II.9.4. La carte des pentes.

Les pentes sont classées en quatre catégories et codifiées de 1 à 4 selon la possibilité de faciliter la contamination (figure II.26).

- Zone de très faible risque (1), dont la pente dépasse 25%, où les conditions sont défavorables pour la stagnation des eaux et l'oxydation des minéraux sulfureux.

- Zone à risque moyen (2), dont la pente varie entre 15% et 25%. Ces pentes favorisent légèrement le processus de DMA en présence de la matière sulfureuse, de l'air et de l'eau.

- Zone à risque fort (3), dont la pente varie entre 5% et 15%. Ces pentes favorisent le ralentissement de la circulation des eaux pluviales en engendrant le processus de DMA.

- Zone de très fort risque (4), dont la pente est inférieure à 5%, Cette faible pente favorise la stagnation des eaux pluviales. En effet, la combinaison de ces eaux avec des matériaux sulfureux (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite,...) en présence d'oxygène peut conduire à des réactions d'oxydation des sulfures (éq. 2).



 $FeS_2(s) + 7/2 O_2(g) + H_2O(I) \rightarrow Fe^{+2}(aq) + 2 SO_4^{2-}(aq) + 2H^+(aq) + énergie (éq.2)$

Figure II.26 : Carte de répartition des pentes (Lakrim 2011).

II.9.5. Discussion

La superposition des cartes thématiques de la région minière du Rif oriental montre la présence effective des zones relativement intactes et d'autres contaminées par le drainage minier acide.

Les contaminations les plus importantes sont localisées dans les sites d'exploitation directes ; notamment les carrières d'Axara et de Ouiksane, les dépôts des tailing stockés à proximité de l'usine de traitement et au niveau de la digue à stériles de Sétolazar. Dans ces sites, l'oxydation est intense ; le pH des eaux est inférieur à 3. Ainsi, à Sétolazar, dans un échantillon liquide prélevé dans un cours d'eau sourd d'un halde à stérile, le pH est de 1,84. Dans ce site, on a relevé 7,78% comme teneur du soufre total et 2,88 % de fer (Lakrim 2011). Ces sites sont excessivement chargés en métaux, avec des dépôts des oxydes, des hydroxydes de fer et des minéraux sulfatés (photos II.1).



Photos II.1 : Précipitation et néoformation des oxydes et hydroxydes du site minier de Sétolazar dont, x= 718644m, et y= 504854m (Lakrim 2007)

Les zones à risque fort d'indice (4), qui ont été localisées dans le district minier de Nador (figure 30), sont le résultat de la combinaison des facteurs anthropiques et naturels d'un environnement où le climat est semi-aride (la température et la pluviométrie moyenne sont de 32°C, et de 400 mm/an, respectivement avec changement positif vers les dernières années). Les terrains les plus influencés, sont généralement à faible pente (inférieure à 5%) et ou en forme de cuvettes (carrières et excavations profondes où se rassemblent les eaux pluviales et de la nappe) où les rejets sont des tailings et stériles de faible granulométrie, riches en sulfures et très altérés. Ces facteurs réunis, favorisent et intensifient donc la génération du phénomène (DMA). Autrement dit, le phénomène est pérenne en absence des initiatives d'aménagement. Dans ces endroits, durant la période sèche, les minéraux sulfatés qui se forment, sont favorisés sous l'effet des évaporations d'eau. Ces minéraux de néoformation précipités, font donc stocker les métaux. Par la suite, et étant solubles, ces minéraux perdent leurs contenus en métaux lourds, pendant la saison humide. Ce cycle engendre des variations de concentrations en métaux dans le sol et dans la nappe phréatique (Lakrim 2011).

Les zones intactes ou bien zones à risque faible restent écartées des points d'exploitations directes et des emplacements des dépôts miniers. Elles sont protégées relativement par les altitudes et parfois neutralisés par les carbonates du substratum (Lakrim 2011).



Figure II.27 : Carte de la vulnérabilité environnementale de la zone minière en fonction de l'intensité du risque de drainage minier acide (Lakrim 2011).

Conclusion

L'ancienne exploitation miniers dans les régions de Nador cause beaucoup de dégâts sur l'environnement suit à l'infiltration du drainage minier acide dans le sol, et qui affecte la nappe,

Ce qui été aggrave la situation, c'est l'existence d'un usine de traitement dans le site, d'où une forte contamination de la région,

Mon étude montre que nôtres échantillons libèrent plus des métaux lourds et surtouts la sphalérite qui se dissocie en grande quantité dans les premiers temps pour libérer le zinc et le soufre, cette dissolution de la sphalérite s'accompagne de la dissolution des autres métaux appartenant a aux autres roches, la pyrite, la chalcopyrite, la galène.

Ces résultats sont conclus à partir des analyses des lixiviats des échantillons solides et confirmé par les analyses des échantillons liquides de la région.

Les résultats qu'on a trouvé ne peut pas arrêter ces dégâts, mais il deviendra utile dans les études d'impacts des exploitations miniers, et aussi à la modélisation du phénomène pour éviter tous les risques possibles afin d'aboutir à un développement soutenable de notre pays.

Références bibliographiques

Jabrane.R, 1993 .Etudes génétiques de la minéralisation en fer de Nador (Maroc nord oriental), Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences, 566 p.

Lakrim.M, El aroussi.O, Mesrar.L et Jabrane.R., 2012. Localisation des zones vulnérables à la contamination par le DMA, moyennant le SIG : Cas de la mine de fer de Nador (Maroc nord Oriental).

Lakrim.M, El aroussi.O, Mesrar.L et Jabrane.R, 2012, Etude d'impact des déchets miniers de la mine ferrifère de Nador sur l'environnement (Nord-Est du Maroc). Revue notes et mémoire du service géologique N°575, pages 151 à 155.

Lakrim, M, 2007. La pollution de l'environnement par le drainage minier acide, généré par les terrils de la mine de fer de Nador. Mémoire de 3émeCycle (DESA). Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs Fès, Département, 85p.

Lakrim M, Mesrar. L, El Arousi. O, Lahrach. A, El Garouani. A, Ben Abidate. L, Tabyaoui. H, Chaouni. A & Jabrane. R , 2011. Etude d'impact des déchets miniers de la mine de Nador sur l'environnement (Nord-Est du Maroc), Revue LIJE de l'ENSH, 18, p.76. www.ensh.dz

Margaa K, 1994. Essai de cartographie des risques naturels application à l'aménagement de la région d'Al Hociema (Rif, Nord Maroc). Thèse de doctorat, Université de France-ComtéBesanàon, 196p.

B.R.G.M.1997, Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Rap. R 39503, 83p, 14 fig., 10 tabl., 1ann.