

Département des Sciences de la Terre

Licence Sciences et Techniques  
Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

# Impact des déchets miniers sur les eaux souterraines de KETTARA- Jbilet centrale

Soutenu le : 29 Juin 2021

SOUDANI AMALE  
TADDRART HOURIA

Devant la commission d'examen composée de :

Pr. **BERRADA-HMIMA SAMIA**

Encadrante à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

Pr. **OUAZZANI NAAILA**

Encadrante à la Faculté des Sciences SEMLALIA

Pr. **BENKADDOUR ABDELFATTAH**

Examinateur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech

## Remerciements

- ☞ *Nos remerciements les plus sincères à Mme **BERRADA HMIMA SAMIA**, professeur à la faculté des sciences et techniques de Marrakech, d'avoir accepté le rôle d'encadrante de ce mémoire, ses conseils constructifs, ainsi que sa générosité en matière de formation et d'encadrement.*
- ☞ *Nos sincères remerciements s'adressent à Mme **OUAZZANI NAAILA**, professeur et responsable du laboratoire Eau, Biodiversité et changements climatiques au sein de la faculté des sciences SEMLALIA de Marrakech pour son suivi, ses encouragements pendant la durée du projet, et de nous avoir permis de développer de nouvelles compétences.*
- ☞ *Nous tenons à rendre notre profonde reconnaissance à la doctorante chercheuse **COULIBALY TENINDJA LOUISE** pour ses conseils, sa précieuse attention et son aide durant toute la période du travail.*
- ☞ *Nous désirons adresser nos remerciements à **nos parents** et à notre petite famille, qui ont su croire en nous et nous soutenir durant ces longues années d'études.*

☞ *Merci infiniment...*

## Dédicace

*Nous dédions ce travail :*

*À nos parents* qui nous ont donné beaucoup de soutien et  
d'encouragement tout au long de nos études.

*À nos frères et sœurs.*

*À nos familles,* pour tous les bons moments passés à leurs  
cotés.

*À tous ceux qui nous aiment et à tous ceux qui ont*

*contribué de près ou de loin à la réalisation de ce  
travail.*

## Résumé

L'industrie minière rejette plusieurs milliers de tonnes de déchets miniers. Les résidus miniers issus des déchets de la mine peuvent être une réelle source de pollution pour l'écosystème local en particulier à cause du Drainage Minier Acide (DMA) s'écoulant vers les eaux de surface et de la nappe phréatique. Ce phénomène se déclenche quand des minéraux sulfureux sont exposés à l'eau et à l'air. L'oxydation libère alors l'acidité dans le milieu, favorisant ainsi la mise en solution des éléments traces métalliques (ETM).

Notre étude, qui avait pour objectif d'étudier l'incidence du centre minier abandonné de Kettara sur la qualité des eaux souterraines, a porté sur l'évaluation du niveau de contamination par les éléments indésirables et toxiques des eaux de puits qui se situent auprès de la mine à différentes distances.

Les résultats montrent que les eaux de puits deviennent plus en plus polluées en se rapprochant de la mine. Les eaux de ruissellement issues de déchets miniers sont enrichies par les sulfates, les nitrites, les nitrates ..., qui pourraient par migration constituer un risque élevé de pollution des nappes d'eau souterraines.

---

**Table des matières**

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux .....	9
Liste des abréviations .....	10
Introduction .....	12
Partie I : Étude bibliographique.....	13
I. Déchets miniers.....	14
I-1 Définition .....	14
I-2 Les types des déchets miniers .....	14
I-3 Effets de l'activité minière.....	17
I-3.1 Réduction des marges agricoles .....	18
I-3.2 Pollution par les produits chimiques .....	18
I-3.3 Érosion et sédimentation .....	18
I-3.4 Impact des déchets miniers sur l'Homme .....	18
II. Eléments traces métalliques (ETM) et drainage minier acide (DMA) :.....	19
II-1 Notion des ETM : .....	19
II-2 La mobilité des ETM.....	21
II-2.1 La sorption (ou adsorption).....	21
II-2.2 La précipitation/dissolution .....	21
II-2.3 La complexation aqueuse.....	21
II-3 Mécanisme de formation de drainage minier acide.....	22
II-3.1 Définition du DMA.....	22
II-3.2 Formation de DMA.....	22
II-4 Impacts néfastes des ETM et DMA.....	24
III. Les eaux souterraines.....	25
III-1 Définition .....	25
III-2 Caractérisation des aquifères et des nappes .....	26
III-2.1 Les aquifères en domaine sédimentaire.....	26
III-2.2 Les aquifères alluviaux.....	26
III-2.3 Les aquifères en domaine de socle .....	26
III-2.4 Les aquifères karstiques .....	27
Partie II : Matériel et Méthodes.....	28
I. Présentation de la zone d'étude : La mine kettara .....	29
I-1 Cadre géographique .....	29
I-1.1 Localisation .....	29
I-1.2 Climat.....	29
I-2 Historique.....	30
I-3 Cadre géologique .....	30
I-4 Cadre Hydrogéologique .....	31
II. Travail de terrain.....	33
II-1 Échantillonnage .....	33
II-2 Dispositif de prélèvement.....	33
II-3 Description des puits .....	35
II-3.1 La localisation des puits étudiés (figure 20) .....	35
II-3.2 Les caractéristiques des puits étudiés (Table VI) .....	35
II-4 Carte d'échantillonnage.....	36

## Table des matières

II-4.1 Carte géologique .....	36
III. Travail de laboratoire.....	37
III-1 Analyses physicochimiques .....	37
III-1.1 Le potentiel hydrogène (pH) .....	37
III-1.2 La conductivité électrique (CE).....	38
III-1.3 Sulfates .....	38
III-1.4 DCO.....	39
III-2 Analyse des substances indésirables .....	39
III-2.1 Nitrates .....	39
III-2.2 Nitrites .....	39
III-2.3 Azote de Kjeldahl .....	40
III-2.4 Ammonium.....	40
III-2.5 Ortho phosphate.....	41
III-2.6 Dureté Totale .....	41
III-2.7 Les éléments traces métalliques .....	41
Partie III : Résultats et Discussion.....	43
I. Résultats qualitatifs des échantillons d'eaux .....	44
II. Analyses des résultats et discussion .....	46
II-1 Analyses physicochimiques.....	46
II-1.1 pH.....	46
II-1.2 Conductivité électrique .....	46
II-1.3 Sulfates.....	47
II-1.4 DCO .....	48
II-2 Analyse des substances indésirables.....	49
II-2.1 Nitrates .....	49
II-2.2 Nitrites .....	50
II-2.3 Ammonium .....	51
II-2.4 Orthophosphate .....	52
II-2.5 Azote de Kjeldahl .....	52
II-2.6 Dureté totale.....	53
Conclusion et Perspectives .....	54
Références bibliographiques .....	57
ANNEXES .....	60
ANNEXE 1 : Tableau de classification de Ph (Pompe et Traitement d'eau LCR, 2018). .....	60
ANNEXE2 : Tableau de classification de la conductivité électrique (Ouhamdouch et al, 2018).....	60
ANNEXE 3 : Tableau de classification de la minéralisation (Abdellatif HAKMI, 2006).....	60
ANNEXE 4 : Tableau de classification de la dureté totale (SUEZ, 2021).....	60
ANNEXE 5 : La minéralisation totale en fonction de la dureté totale de l'eau (ACHOUR et al, 2006) .....	60

## Liste des figures

Figure 1 - L'offre confrontée à la demande en cuivre sur la période 2011–2019 (Managem. 2020)	14
Figure 2 - Retrait du mort-terrain dans une mine de charbon de l'excavateur (Alamy. 2011)	15
Figure 3 - : (1) Vue de roches stériles de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire), (TAPE et al, 2019). (2) Photo des Haldes à stériles de la mine kettara.	15
Figure 4 - Parc à résidus miniers (Alamy, 2011)	16
Figure 5 - Vue de stockage des boues au niveau du parc à boue de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire), (TAPE et al, 2019)	16
Figure 6 - Évolution de la quantité de boue rejetée dans le parc à boue de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire) de 2014 à 2018, (TAPE et al, 2019)	17
Figure 7 - Nombre de sujets présentant des syndromes extrapyramidaux par rapport au nombre d'années de travail : mine Kettara et mine Imni (Mebrouk, et al, 2009)	18
Figure 8 - Diagramme de prédominance pe/pH du chrome (INERIS, 2006).	22
Figure 9 - Photo du Drainage minier acide, Mine Kettara.	22
Figure 10 - Cycle simplifié des éléments traces métalliques depuis les émissions jusqu'à l'exposition humaine (DUFRESENE, 2015).	24
Figure 11 - Répartition des eaux souterraines et des eaux de surfaces dans le maroc (BENABDELFADEL Abdelhamid, 2013).	25
Figure 12 - Localisation de la mine Kettara au niveau du massif des Jebilet centrales (Huvelin, 1977).	29
Figure 13 - Photo du chapeau de fer au niveau de la mine Kettara.	30
Figure 14 - Cadre géologique simplifiée de la zone Kettara (ESSAIFI et al, 1977).	31
Figure 15 - Coupe hydrogéologique schématique du niveau piézométrique de la nappe Kettara (Lghoul et al, 2012).	31
Figure 16 - Carte piézométrique de la région Kettara (Lghoul et al, 2012).	32
Figure 17 - Photo des échantillons d'eaux prélevées.	33
Figure 18 - Photo du prélèvement des eaux de puits.	34
Figure 19 - Photo du prélèvement des eaux des lixiviats de déchet minier.	34

## Liste des figures

---

Figure 20 - Carte de localisation des puits étudiés.....	35
Figure 21 - Carte géologique montre la position des points d'eaux échantillonnés dans la mine de Kettara.....	36
Figure 22 - Photo du pH-mètre .....	37
Figure 23 - Photo du conductimètre.....	38
Figure 24 - Photo de l'appareil de minéralisation (1) et du distillateur utilisés (2). .....	40
Figure 25 - Photo d'une plaque chauffante. ....	42
Figure 26 - Filtration des échantillons minéralisés. ....	42
Figure 27 - La gamme étalon .....	42
Figure 28 - Courbe de variation du pH des échantillons étudiés. ....	46
Figure 29 - La courbe de variation de la CE des échantillons étudiés .....	47
Figure 30 - La différence entre la concentration en sulfates des eaux de puits et de lixiviat de déchet minier. ....	48
Figure 31 - Variation de DCO des lixiviats de déchet minier.....	48
Figure 32 - Variation de DCO des eaux de puits. ....	48
Figure 33 - Variation de la concentration en Nitrates dans le lixiviat de déchet minier.....	49
Figure 34 - Variation de la concentration en Nitrites dans les échantillons d'eaux.....	50
Figure 35 - Variation de la concentration en ammonium dans les eaux de puits par rapport à la distance de la mine.....	51
Figure 36 - Variation des concentrations en orthophosphates dans les échantillons étudiés.....	52
Figure 37 - Variation de l'azote de Kjeldahl des échantillons.....	52
Figure 38 - Variation de la dureté totale des eaux de puits.....	53

## Liste des tableaux

Table I-	L'abondance naturelle des éléments majeurs dans la croûte terrestre (BAIZE et Denis, 1997).....	19
Table II-	l'abondance naturelle des éléments traces dans la croûte terrestre (BAIZE et Denis, 1997).....	20
Table III-	Normes de Qualité des Eaux d'alimentation humain d'OMS, d'UE et du Maroc.....	20
Table IV-	Exemples de génération de drainage minier acide (BGRM, 2001). ....	24
Table V-	Effets des ETM sur la santé humaine : .....	25
Table VI-	Les caractéristiques des puits étudiés.....	35
Table VII-	Les cordonnés des stations d'échantillonnage .....	36
Table VIII-	Résultats des analyses physicochimiques des eaux souterraines. ....	44
Table IX-	Résultats des analyses physicochimiques de lixiviat de déchets miniers à Kettara. ....	45

## Liste des abréviations

°C	Degré Celsius
°F	Degré français, unité de la dureté
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ion sulfate
ADN :	L'acide désoxyribonucléique
Ag :	Argent
As :	Arsenic
Ca :	Calcium
Cd :	Cadmium
CE:	Conductivité électrique
Cl :	Chlore
Co :	Cobalt
Cr :	Chrome
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Oxyde de chrome (III).
CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> :	Chromate
Cu :	Cuivre
DCO :	La demande chimique en oxygène
DMA :	Drainage Minier Acide.
D :	Dilution
e <sup>-</sup> :	électron
E.D.T.A :	acide éthylène diamine tétra-acétique
ETM :	Eléments traces métallique
F :	Fluor
Fe :	Fer
Fe <sup>2+</sup> :	Oxyde de fer (II).
FeS <sub>2</sub> :	Disulfure de fer
H :	Hydrogène
H <sup>+</sup> :	Proton
H <sub>2</sub> O :	l'eau
Hcl :	L'acide chlorhydrique
Hg :	Mercure
HNO <sub>3</sub> :	Acide nitrique.
I :	Iode
ICP-AES :	Inductive Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy
K :	Potassium
Km :	kilomètre
Ks :	Le produit de solubilité d'un milieu
l :	litre
m :	mètre
m <sup>2</sup> /s :	unité de vitesse
Mg :	Magnésium

## Liste des abréviations

---

mg/kg :	milligramme par kilogramme
mg/l :	milligramme par litre
min :	minute
ml :	millilitre
Mn :	Manganèse
Na :	Sodium
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :	Ammonium
Ni :	Nickel
nm :	nanomètre
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> :	Nitrite
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :	Nitrate
NTK :	Azote total de kheldaj
O <sub>2</sub> :	Oxygène
OMS :	Organisation mondiale de la Santé
Pb :	Plomb
pH :	Potentiel hydrogène
P-P04 :	Ortho phosphate
Se :	Sélénium
Si :	Silicium
SO <sub>4</sub> :	Sulfate
Ti :	Titane
T :	Témoin
US :	United States
Vm :	Valeur moyenne
Zn :	Zinc
µs/cm :	microsiemens par centimètre

## Introduction

Au Maroc, il existe de nombreux sites miniers qui ont été abandonnés au fil des ans et qui devront être restaurés. En effet, ces sites génèrent des quantités importantes de contaminants et pourraient avoir des impacts négatifs sur l'environnement : pollution des sols, de l'eau, destruction ou perturbation d'habitats naturels, impact visuel sur le paysage, effets sur le niveau des nappes phréatiques, etc. La mine de Kettara en est un exemple.

### **Problématique :**

Quarante ans après la cessation des activités minières, les rejets miniers sont toujours à l'air libre et constituent le principal problème environnemental dans la région de Kettara. En effet, le drainage minier acide (DMA) qui pourrait être généré par l'oxydation des sulfures contenus dans les résidus miniers constitue une éventuelle source importante de contamination par les éléments-traces métalliques (ETM) et d'acidification des eaux de surface et souterraines.

### **Objectif du travail :**

Le présent travail a deux objectifs :

- Étudier l'incidence des déchets miniers et leur lixiviat sur les eaux souterraines et d'évaluer les nuisances causées par l'abandon, sans réhabilitation, de ces sites.
- Suggérer des solutions permanentes et définitives de traitement de ce risque.

### **Méthodologie de travail :**

- Pour atteindre ces objectifs nous avons adopté la démarche suivante :
- La collection des données : nous avons fait une recherche bibliographique sur les études déjà effectuées sur le sujet et rassembler des informations concernant la mine de Kettara.
- La réalisation de campagnes d'échantillonnages d'eaux de puits environnant de la mine et des eaux issues de lessivage des déchets miniers et leurs analyses du point de vue physico-chimiques.

## **Partie I : Étude bibliographique**

## I. Déchets miniers

### I-1 Définition

Les déchets miniers sont les rejets générés par les exploitations minières réalisées pour extraire le minerai final présentant une valeur commerciale.

L'essor considérable de la demande mondiale de certains minerais depuis la fin du XX<sup>es</sup> a conduit à la multiplication des grands projets miniers. Donc, les déchets miniers se sont multipliés (DESHAIES et al, 2011). Le graphique ci-dessous (figure1) montre l'évolution de la demande, par exemple, en cuivre sur la période 2011–2019 au Maroc ce qui va générer plus de déchets.

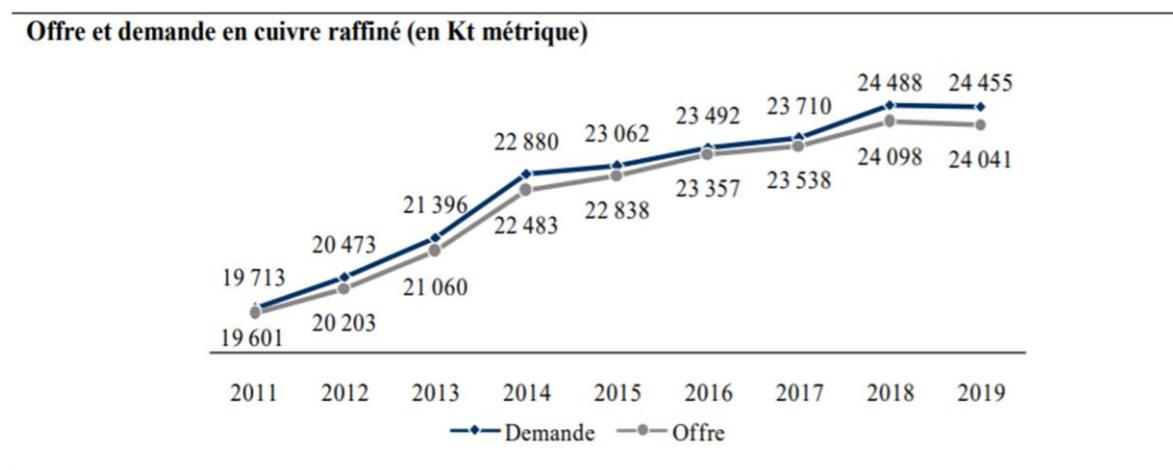


Figure 1 - L'offre confrontée à la demande en cuivre sur la période 2011–2019 (Managem. 2020)

### I-2 Les types des déchets miniers

L'extraction des ressources minérales et leur traitement produisent une grande quantité de déchets miniers tels que : les morts-terrains meubles, les roches stériles, les rejets du concentrateur, les boues de traitements, les eaux de la mine et les émissions toxiques.

Les morts-terrains meubles : Ils représentent les matériaux non agglomérés recouvrant le dépôt de minerai ou de bitume, notamment le sol, les dépôts glaciaires, le sable et les sédiments. Les morts-terrains ne sont soumis à aucun processus chimique mais doivent être enlevés pour accéder au minerai en dessous (figure 2).



Figure 2 - Retrait du mort-terrain dans une mine de charbon de l'excavateur (Alamy. 2011)

Les roches stériles : Elles sont des rejets d'origines géologiques (débris de roches) issues des opérations d'extraction pour pouvoir accéder aux minerais. Ils sont excavés et déposés en un lieu appelé Haldes à stérile (Figure 3).

Les Haldes à stériles contiennent des minéraux réactifs (tels les sulfures de fer) pouvant constituer un milieu très favorable à la solubilisation des éléments mobiles, principalement lorsqu'il y a production de drainage minier acide (DMA) (AUBERTIN et al 2005).

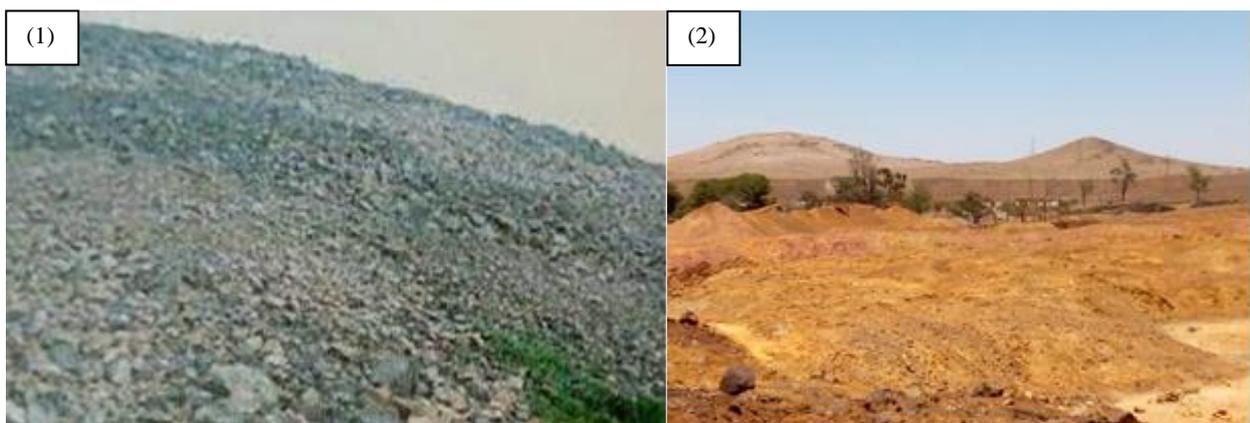


Figure 3 - : (1) Vue de roches stériles de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire), (TAPE et al, 2019). (2) Photo des Haldes à stériles de la mine kettara.

Les rejets du concentrateur : Ils sont produits lors du traitement minéralurgique qui consistent essentiellement à séparer une ou plusieurs fractions riches en éléments utiles, appelées concentrés, du rejet sans valeur commerciale immédiate. Ces rejets forment une pulpe (mélange de solides et de liquides) souvent entreposée en surface dans des bassins, appelés parc à résidus miniers (figure 4) qui sont ceinturés de digues et dont le fond peut être imperméabilisé. Suite à la déposition dans le parc, la pulpe s'écoule vers le point bas du bassin et les particules solides sédimentent (BOUSSICAULT et al, 2007).



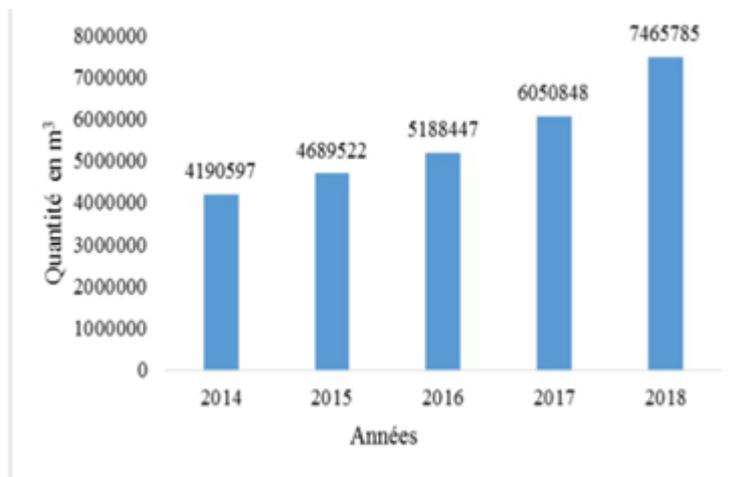
**Figure 4 - Parc à résidus miniers (Alamy, 2011)**

Les boues de traitement : Lorsque l'on utilise le traitement chimique pour décontaminer l'eau acide chargée en métaux, on obtient de l'eau traitée et une boue de traitement contenant les contaminants (contiennent des ajouts de solides et de produits chimiques de traitement des eaux). Elle est issue des phases de traitement du minerai. Dans les cas extrêmes où les boues sont riches en matières nocives ou radioactives, elles peuvent être classées comme déchets dangereux et nécessiter des méthodes de traitement et d'élimination spéciales (figure 5), (AUBERTIN et al, 2002).



**Figure 5 - Vue de stockage des boues au niveau du parc à boue de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire), (TAPE et al, 2019)**

La figure 6 indique l'évolution de la quantité de boue rejetée lors du traitement du minerai : Cas de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire). Cette quantité de boue rejetée a connu une relative croissance. De 4 190 597 m<sup>3</sup> en 2014, elle est passée à 4 689 522 m<sup>3</sup> en 2015 et a atteint 5 188 447 m<sup>3</sup> en 2016 puis 7 465 785 m<sup>3</sup> en 2018 (TAPE et al, 2019).



**Figure 6 - Évolution de la quantité de boue rejetée dans le parc à boue de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire) de 2014 à 2018, (TAPE et al, 2019)**

Les déchets produits par les techniques mises en œuvre pour l'exploitation : sont constitués principalement de restes d'installation diverse, et les huiles.

Les eaux de la mine : Elles sont des rejets contaminés surtout par des ions solubles provenant du drainage à travers les rejets miniers (AUBERTIN et al 2002). En effet, l'analyse des rejets liquides des digues a montré que les eaux présentent des teneurs moyennes relativement élevées en éléments traces métalliques : Zn (0,94 %) et Pb (0,16 %) résultant essentiellement de la dissolution des minéraux sulfurés détectés dans les rejets (SEBEI et al 2005).

Les émissions toxiques : Les activités minières peuvent générer des quantités significatives de polluants atmosphériques allant des poussières émises lors des tirs de mine et des opérations de terrassement et d'excavation aux émanations des fonderies et des raffineries et les gaz d'échappement des moteurs à essence du gros matériel minier (CHUHAN-POLE, 2019.).

### **I-3 Effets de l'activité minière**

L'exploitation des sites miniers est devenue dans le temps une activité économique très importante au fur et à mesure que l'industrialisation des sociétés a eu lieu. Avec une augmentation continue de la demande en métaux, l'activité minière a commencé à affecter plus sérieusement l'environnement et la santé humaine (ARANGUREN, 2008).

### I-3.1 Réduction des marges agricoles

L'extraction minière et le traitement des minerais peuvent générer plusieurs types d'externalités négatives qui affectent le bien-être des populations locales. Si par exemple les émissions toxiques sont relativement importantes, elles peuvent se déposer au sol sous la forme de pluies acides. Lesquelles contribuent à la dégradation des sols et qui peuvent avoir des effets négatifs cumulatifs (Chuhan, 2019): l'augmentation de leur acidité conduit en effet à une lixiviation des nutriments, une réduction de la capacité des plantes à absorber les nutriments qui restent et à la libération de métaux lourds et une diminution de la viabilité de l'activité agricole (Aragón et Rud, 2015).

### I-3.2 Pollution par les produits chimiques

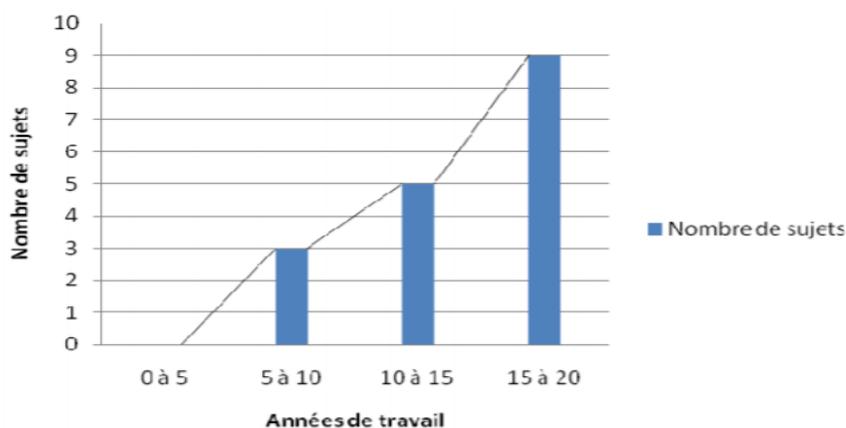
L'érosion des surfaces d'activités minières contribue à une production importante de sédiments qui viennent alimenter la charge solide des rivières situées en aval. Sans prévention adéquate et stratégie de contrôle, l'érosion de la terre peut entraîner un déversement dans les cours d'eau, les rivières et les lacs, (GARCIN, 2018) .

### I-3.3 Érosion et sédimentation

L'érosion des surfaces d'activités minières contribue à une production importante de sédiments qui viennent alimenter la charge solide des rivières situées en aval. Sans prévention adéquate et stratégie de contrôle, l'érosion de la terre peut entraîner un déversement dans les cours d'eau, les rivières et les lacs, (GARCIN, 2018).

### I-3.4 Impact des déchets miniers sur l'Homme

Des éléments de preuve montrent que la pollution peut avoir une incidence négative sur les résultats cognitifs et le niveau d'éducation (EBENSTEIN et al, 2012).



**Figure 7 - Nombre de sujets présentant des syndromes extrapyramidaux par rapport au nombre d'années de travail : mine Kettara et mine Imni (Mebrouk, et al, 2009).**

La figure 7 montre la prévalence des syndromes extrapyramidaux augmente avec le nombre d'années de travail dans la mine de Kettara et d'Imni (Mebrouk, et *al*, 2009).

## **II. Eléments traces métalliques (ETM) et drainage minier acide (DMA) :**

### **II-1 Notion des ETM :**

On désigne par le terme générique « d'éléments traces métalliques » des métaux et métalloïdes caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5 grammes par cm<sup>3</sup> avec des concentrations qui sont en général très faibles (ARAGON, 2015).

Conventionnellement, les éléments traces sont les 68 éléments minéraux, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0.1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total (table II), alors que les 12 éléments majeurs interviennent pour 99.0 % (table I) (BAIZE et Denis, 1997).

**Table I- L'abondance naturelle des éléments majeurs dans la croûte terrestre (BAIZE et Denis, 1997).**

<b>Éléments</b>	<b>L'abondance naturelle</b>	<b>Éléments</b>	<b>L'abondance naturelle</b>
<b>Oxygène</b>	46,4 %	<b>Potassium</b>	2.50%
<b>Silicium</b>	27.7%	<b>Magnésium</b>	2.00%
<b>Aluminium</b>	8.1 %	<b>Titane</b>	0,44 %
<b>Fer</b>	5.0 %	<b>Hydrogène</b>	0,14 %
<b>Calcium</b>	3,63 %	<b>Phosphore</b>	0.11 %
<b>Sodium</b>	2.80 %	<b>Manganèse</b>	0,10 %

**Table II- l'abondance naturelle des éléments traces dans la croûte terrestre (BAIZE et Denis, 1997).**

10 éléments représentant ensemble 0,318 % et parmi lesquels :	14 éléments représentant ensemble 0.048 %, par exemple :	22 éléments représentant ensemble 0.0065 % dont :	22 éléments représentant ensemble 0.0004 16%. Comme :
Fluor 0,07 % soit 700 mg/kg Chlore 0.02 % soit 200 mg/kg Chrome 0.02 % soit 200 mg/kg Vanadium 0.01 % soit 110 mg/kg	Nickel 0.0080 % soit 80 mg/kg Zinc 0.0065 % soit 65 mg/kg Azote 0.0046 % soit 46 mg/kg Cuivre 0.0045 % soit 45 mg/kg Cobalt 0.0023 % soit 23 mg/kg Plomb 0.0015 % soit 15 mg/kg	Bore 0.0003 % soit 3 mg/kg Molybdène 0,0001 % soit 1 mg/kg	Iode 0.00033 % soit 0.3 mg/kg Cadmium 0,00882 % soit 02 mg/kg Sélénium 0,000009 % soit 0.09 mg/kg

Les ETM sont présents naturellement en quantités très faibles dans le sol (inférieure à 1g/kg), l'eau et l'air. Mais certaines de ces substances montrent, à certains endroits, une présence anormalement élevée qui dépassent les normes (table III) qui est généralement due aux rejets provoqués par l'activité humaine (exemple : des rejets miniers).

**Table III- Normes de Qualité des Eaux d'alimentation humain d'OMS, d'UE et du Maroc.**

Éléments traces métalliques : ETM	L'unité	Normes OMS (lenntech, 2006)	Ministère de santé Marocaine (eaudumaroc. 2017)	Normes UE (europa. 2020)
Plomb (Pb)	mg/l	0.01	0,05	0.01
Mercure (Hg)	mg/l	0.006	0,001	0.001
Cadmium (Cd)	mg/l	0.0025	0,005	0.005
Chrome (Cr)	mg/l	0.05	0,05	0.025
Cuivre (Cu)	mg/l	2	1	2.0
Nickel (Ni)	mg/l	0.07	0,05	0.02
Zinc (Zn)	mg/l	3	0,005	Non mentionnée
Arsenic (As)	mg/l	0.01	0,05	0.01
Sélénium (Se)	mg/l	0.01	0,01	0.02
Fer (Fe)	mg/l	Pas de lignes directrices	0,2	0.2
Argent (Ag)	mg/l	Pas de lignes directrices	0,01	Non mentionnée

Un grand nombre des ETM sont utiles dans les processus biologiques, le fer, par exemple, est un composant essentiel de l'hémoglobine et pour le transport de l'oxygène ; le cuivre et le zinc sont des

oligo-éléments indispensables, le nickel participe à la croissance cellulaire. On parle alors d'éléments traces essentiels. Mais inversement tout excès en ces métaux peut avoir des effets très néfastes pour la santé. En revanche, il existe d'autres éléments traces, dits non-essentiels, qui n'ont pas de rôle positif connu dans l'activité biologique mais qui peuvent, au contraire, provoquer des intoxications et des maladies graves. Il s'agit en particulier du mercure, du plomb et du cadmium, qui, rejetés dans l'environnement.

## **II-2 La mobilité des ETM**

La mobilité d'un élément est classiquement définie comme étant son aptitude à se déplacer d'un compartiment à l'autre du sol jusqu'à arriver aux eaux souterraines (Alloway, 2013) sous l'action de leurs formes chimiques (Degryse et *al.* 2009).

Les principaux processus chimiques affectant la migration d'un élément trace métallique dans les sols et les eaux souterraines sont les suivants (INERIS, 2006) :

### **II-2.1 La sorption (ou adsorption)**

Décrit le processus de fixation de matière sur des surfaces minérales. Ce phénomène qui retarde la migration du contaminant est un processus réversible, ce qui signifie que le contaminant peut être adsorbé et par la suite remobilisé.

### **II-2.2 La précipitation/dissolution**

La précipitation intervient lorsque la concentration en solution d'une espèce chimique excède le produit de solubilité ( $K_s$ ) du milieu. Cependant, comme les produits de solubilité des ETM sont relativement élevés, cette réaction ne se produit que pour des cas particuliers tels qu'une pollution importante (les mines) ou un milieu alcalin (Deblon et Judith, 2018).

Cette interaction peut débiter par un simple procédé d'adsorption et évoluer vers une plus forte interaction, avec des réorganisations de la structure de la phase solide, qui peuvent donner naissance à des phases solides mixtes.

### **II-2.3 La complexation aqueuse**

Il s'agit de la variation des conditions redox qui peut causer la mobilisation ou l'immobilisation d'un élément donné. Un bon exemple en est le chrome, qui précipite en tant que  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  sous des conditions réductrices mais est remobilisé sous des conditions oxydantes pour former  $\text{CrO}_4^{2-}$  (INERIS, 2006).

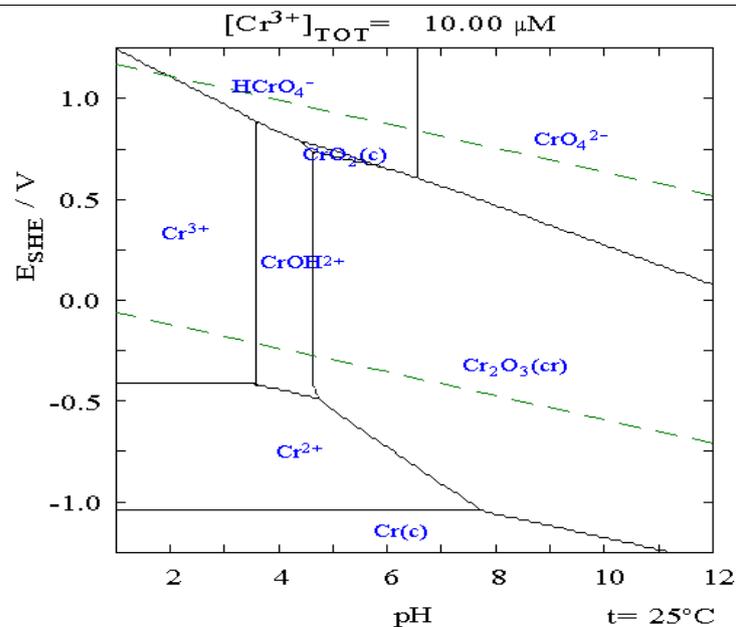


Figure 8 - Le diagramme de prédominance pe/pH du chrome (INERIS, 2006).

### II-3 Mécanisme de formation de drainage minier acide

#### II-3.1 Définition du DMA

Le drainage minier acide (DMA) est défini comme étant le résultat de la circulation des eaux à travers les rejets d'un site minier contenant des quantités non négligeables de minéraux sulfurés qui produisent l'acidité des métaux dissouts (Figure 9) (Amar, 2020).



Figure 9 - Photo de l'eau issue de drainage minier acide, Mine Kettara.

Le DMA est caractérisé par un faible pH qui peut abaisser jusqu'à 2 ou 3 (Lindsay et al, 2015).

#### II-3.2 Formation de DMA

Le DMA peut être produit à partir de plusieurs sources combinées ou individuelles. Les sources primaires comprennent notamment les dépôts de roches miniers, les zones de retenues des résidus et

les roches de construction utilisée dans les routes. D'autres sources telles que le traitement des boues produisent du DMA, mais de manière plus négligeable (Amar H, 2020).

Le DMA se formera lorsque les critères suivants seront présents dans l'environnement (Kalin et al, 2006) :

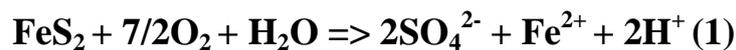
L'oxydation des sulfures: les deux minéraux sulfurés les plus fréquemment rencontrés dans les rejets miniers sont la pyrite et la pyrrhotite

L'hydrolyse du fer ferrique

L'oxydation amplifiée des ions ferriques.

L'acide résultant de DMA sera immédiatement balayé par l'eau ruisselant sur la roche. Cependant, si l'eau est statique, le DMA peut s'accumuler dans la roche ; où il s'écoulera à la longue et pourra rencontrer un minéral avide d'acide. La neutralisation résultante enlèvera une partie de l'acidité et du fer de la solution en plus de neutraliser le pH (Akcil et Koldas 2006).

- **Oxydation des sulfures**



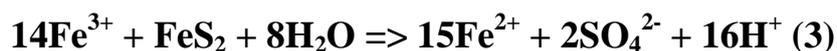
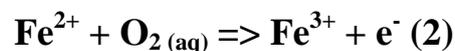
Cette réaction est fonction de :

La concentration en oxygène

La température (l'oxydation des sulfures est une réaction exothermique),

Le degré de saturation en eau (les alternances humidification/séchage des sulfures accélèrent les processus d'oxydation).

Puis la réaction se propage par oxydation de fer ferreux en fer ferrique (2), lui-même oxydant pour la pyrite (3) :



La réaction (3) est importante pour les milieux les plus acides, car à  $\text{pH} > 4$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  précipite sous forme de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et est moins disponible comme oxydant (BRGM, 2001).

Les résidus miniers contenant des sulfures sont donc potentiellement générateurs d'effluent acide chargé en métaux comme en témoigne les quelques exemples ci-dessous pris en Colombie britannique (Table IV) :

**Table IV- Exemples de génération de drainage minier acide (BGRM, 2001).**

	Nom de la mine	pH observé dans les résidus
Mines en activité	Mine de Gibrateur	3,1
	Equity mine	2,4
	Noranda Mine	3,0
Mines abandonnées	Mount Washington	3,4

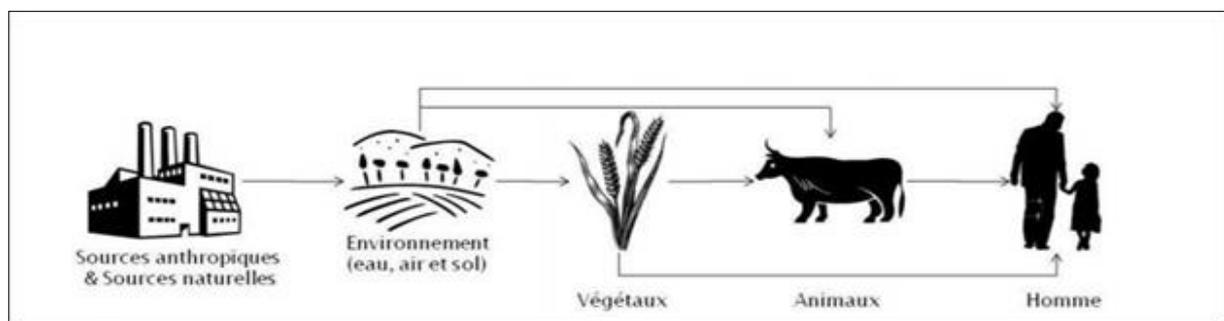
Les mécanismes de génération du drainage minier acide (DMA) dans les rejets miniers sont ralentis par les basses températures (Boulangé, 2019).

#### **II-4 Impacts néfastes des ETM et DMA**

Le DMA est caractérisé par un pH acide et des concentrations élevées en ETM et en sulfates (DUFRESNE, 2015). La libération de ces ETM, dans l'environnement peut se retrouver :

- Dans l'air ;
- Dans les eaux ;
- Dans les sols et les sédiments ;
- Dans les organismes végétaux et animaux

De plus, chacune de ces compartiments de l'environnement peut à son tour entraîner la contamination d'une autre. La figure 10 illustre ainsi de façon très simplifiée le cycle des éléments traces métalliques depuis leurs émissions jusqu'à l'exposition humaine.



**Figure 10 - Cycle simplifié des éléments traces métalliques depuis les émissions jusqu'à l'exposition humaine (DUFRESENE, 2015).**

Le rapport 42 de l'Académie des Sciences (1998) a proposé une liste de neuf éléments comme liste des éléments traces à risques pour la santé humaine l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le sélénium (Se) et le zinc (Zn) (Table V) (GOUZY et al, 2008).

**Table V- Effets des ETM sur la santé humaine :**

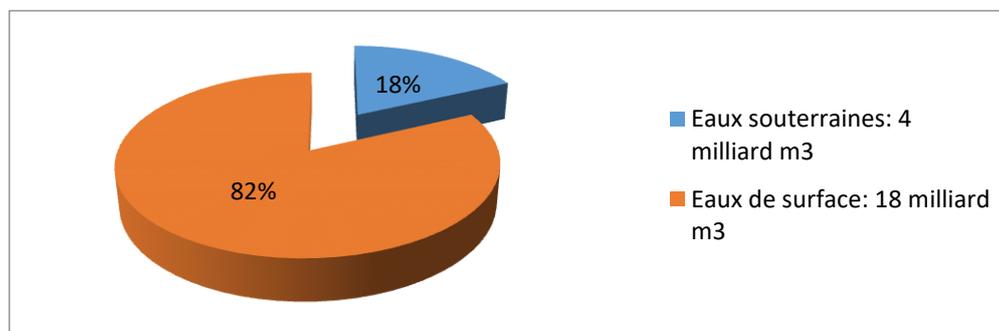
Élément	Effets
Arsenic (As)	Induisent la production des radicaux libres causant la détérioration oxydative des lipides, des protéines et de l'ADN
Cadmium (Cd)	Hypertension, dommage sur le foie
Chrome (Cr)	Brûlures de l'appareil digestif, ulcérations, l'apparition de rhinites, sinusites, pharyngites et bronchites chroniques.
Cuivre (Cu)	Limite la croissance des racines en brûlant leur extrémité
Mercure (Hg)	Toxique chronique et aiguë
Nickel (Ni)	Allergies de peau, maladies respiratoires
Plomb (Pb)	Troubles graves désignés par le terme générale « saturnisme », Les manifestations cliniques de saturnisme : Digestives : coliques de plomb ; Sanguines : anémie plus ou moins grave ; Nerveuses; Rénales.
Sélénium (Se)	Augmente le risque de diabète.
Zinc (Zn)	Troubles digestifs, nausées voire vomissements (à forte dose), influence négative sur l'activité des microorganismes et les vers de terre

### III. Les eaux souterraines

#### III-1 Définition

C'est une eau invisible à l'homme qui coule dans le sous-sol et fait partie d'un cycle qui lui est propre, avec une zone de recharge, de circulation en lien avec les propriétés lithologiques rencontrées et un exutoire naturel ou anthropique (forage par exemple) (Thierry, 2020).

Les eaux souterraines constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable des populations en général et des communautés rurales en particulier (LOUKMAN et al, 2017).



**Figure 11 - Répartition des eaux souterraines et des eaux de surfaces dans le Maroc (BENABDELFADEL Abdelhamid, 2013).**

### **III-2 Caractérisation des aquifères et des nappes**

L'eau souterraine est contenue dans les aquifères, qui sont des formations géologiques qui composent le sol, elles sont assez perméables et poreuses avec une capacité de permettre les écoulements verticaux et transversaux de l'eau et de l'emmagasiner. (SIGES, 2021).

On distingue plusieurs types d'aquifères :

#### **III-2.1 Les aquifères en domaine sédimentaire**

Ces systèmes sont caractéristiques des bassins sédimentaires, il s'agit de roches sédimentaires poreuses ou fracturées (sables, grès, calcaires, craie).

Ces aquifères peuvent être libres ou captifs selon qu'ils sont ou non recouverts par une couche imperméable (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, 2012).

-Dans un aquifère libre, la surface supérieure de l'eau fluctue sans contrainte et la pluie efficace peut les alimenter par toute la surface.

-Dans un aquifère captif, une couche géologique imperméable confine l'eau (SIGES, 2021).

#### **III-2.2 Les aquifères alluviaux**

Ils sont constitués de matériaux déposés par les cours d'eau dans leurs vallées (Sables et graviers, intercalés dans des limons fins). Les différentes terrasses alluviales contiennent des aquifères libres ou des aquifères alluviaux proprement dit susceptibles d'être hydrauliquement interconnectées entre elles et au final avec le cours d'eau (SIGES, 2021).

Comme la nappe souterraine communique avec le lit du fleuve, des transferts d'eau sont possibles entre eux qui peuvent être des eaux issues de DMA.

Dans des conditions d'étiage, la nappe alimente le fleuve, et durant les crues, au contraire, une partie des eaux du fleuve s'infiltre vers la nappe. Ce phénomène permet de remplir rapidement la réserve souterraine. L'eau très douce du fleuve contribue aussi à diminuer la minéralisation de l'eau de la nappe (Amt, 1984).

#### **III-2.3 Les aquifères en domaine de socle**

Ils correspondent aux roches cristallines ou cristallophylliennes (granites, gneiss et autres roches métamorphiques...) bien représentées dans le massif central et certaines zones des Alpes.

Il s'agit généralement de petits systèmes discontinus (failles, diaclases, décrochements) qui donnent à ces massifs une perméabilité fissurale faible et très hétérogène (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, 2012).

### **III-2.4 Les aquifères karstiques**

Les aquifères karstiques se rencontrent dans les formations calcaires. Les eaux en dissolvant le calcaire à la faveur des fissures préexistantes constituent des vides dans lesquels peuvent s'écouler les eaux (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, 2012).

Les dimensions de ces vides présentent une très grande variabilité, depuis les fissures micrométriques à millimétriques jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. Il en résulte des vitesses d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère très variables, allant de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure.

Ces circulations souterraines très rapides sont l'une des principales caractéristiques hydrogéologiques des aquifères karstiques (BGRM, 2007).

De là, la lithologie du sous-sol et le type d'aquifère contrôlent la vitesse d'infiltration des eaux de DMA. Comme la faible perméabilité des aquifères en domaine de socle va ralentir l'infiltration des eaux vers le profond, les circulations souterraines très rapide des aquifères karstiques au contraire peuvent engendrer le transport des grandes quantités de DMA vers les nappes souterraines dans une période de temps plus ou moins courte.

## **Partie II : Matériel et Méthodes**

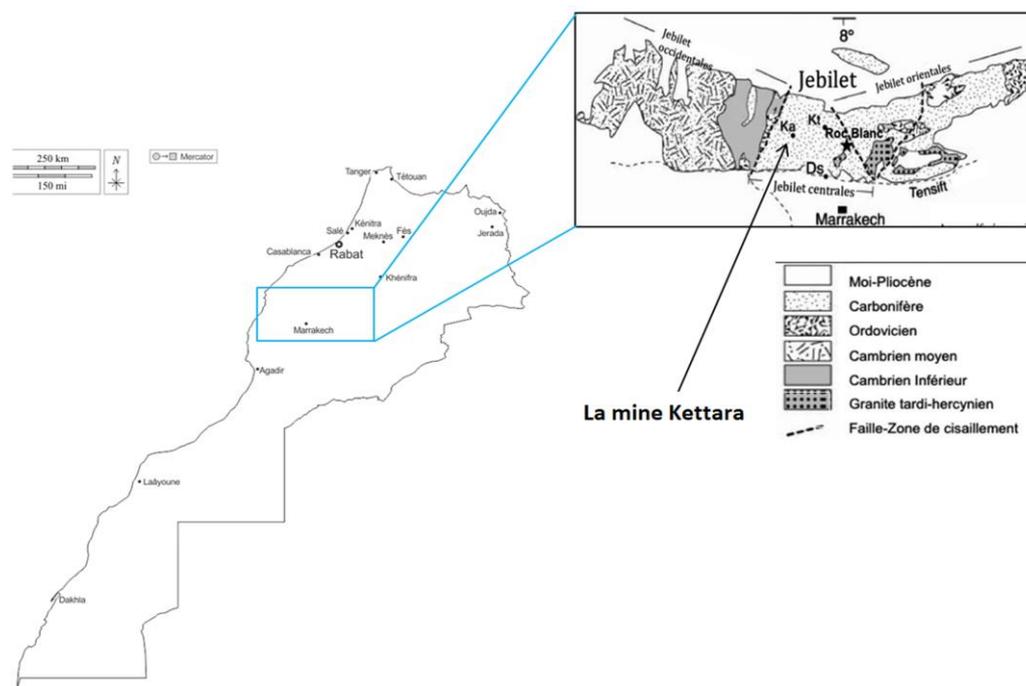
## I. Présentation de la zone d'étude : La mine kettara

Dans l'environnement de Kettara, trois millions de tonnes de déchets sulfurés ont été abandonnés surplace. Leur exposition aux agents météoriques, sur 37 hectares, leur réactivité et leur potentiel générateur de drainage minier acide (DMA) est susceptible de générer de graves effets sur l'environnement et la santé humaine (TOUGHZAOUÏ *et al*, 2015).

### I-1 Cadre géographique

#### I-1.1 Localisation

L'ancienne mine fermée de Kettara se situe à 32 km au nord de la ville de Marrakech, au bord de la route de Safi. Elle se localise au niveau du massif des Jebilet centrales (figure 12), (LGHOUL *et al*, 2012).



#### I-1.2 Climat

Le site minier abandonné Kettara se situe en climat semi-aride à aride (Taghzaoui *et al*, 2014). Les précipitations sont faibles et irrégulière, d'environ 250 mm/an. Les données pluviométriques, enregistrées à la station météorologique de Marrakech de 1960 à 2013, montrent une irrégularité pluviométrique interannuelle, avec des pics en 2009 et 2010 et une moyenne d'environ 520 mm (ZOUHRAÏ *et al*, 2019).

## I-2 Historique

Avec son chapeau de fer bien développé (figure 13) et sa situation sur la route Marrakech-Safi, le gisement de Kettara fut le premier amas sulfuré découvert dans le massif des Jebilet (ESSAIFI et al, 1977).



**Figure 13 - Photo du chapeau de fer au niveau de la mine Kettara.**

L'exploitation a concerné d'abord le chapeau de fer (oxydes de fer) depuis 1938 jusqu'à 1963, puis la zone de cémentation (minerais de cuivre) de 1955 à 1966 et enfin le protore (minerai de pyrrhotite) de 1964 à 1982. Le corps minéralisé de Kettara est à prédominance de pyrrhotite, mais pauvre en métaux de base. Le tonnage global, toute minéralisation confondue, a été estimé à 21 Mt à 55% Fe, 20% S et 0,5% Cu en moyenne (Nfissi et al, 2006).

La mine est fermée depuis 1982 à cause des difficultés liées au stockage de la pyrrhotite (oxydation très rapide), de la pauvreté en soufre du minerai (25%) et de la quantité des résidus cendreuse. Trois millions de tonnes de déchets sulfurés ont été abandonnés surplace. Leur exposition aux agents météoriques, sur 37 hectares, leur réactivité et leur potentiel générateur de drainage minier acide (DMA) est susceptible de générer de graves effets sur l'environnement et la santé humaine (TOUGHZAOUÏ et al, 2015).

## I-3 Cadre géologique

Le gisement de Kettara fait partie d'un ensemble d'amas sulfurés à chapeaux de fer (figure 4) qui affleurent dans la partie centrale du massif hercynien des Jebilet. Tous ces gisements et indices sont encaissés dans les métapélites ou « schistes » du Sarhlef, de passées lenticulaires de calcaires bioclastiques et de grès qui constituent l'unité des Jebilet centrales (ESSAIFI et CORRE, 1977). Ces métapélites sont affectées par une schistosité subverticale (figure 14).

Les Schistes du Sarhlef correspondent à une série argileuse où s'intercalent des bancs lenticulaires de grès et de calcaires, et sont datées du Viséen moyen-supérieur (Essaifi et al, 2001)

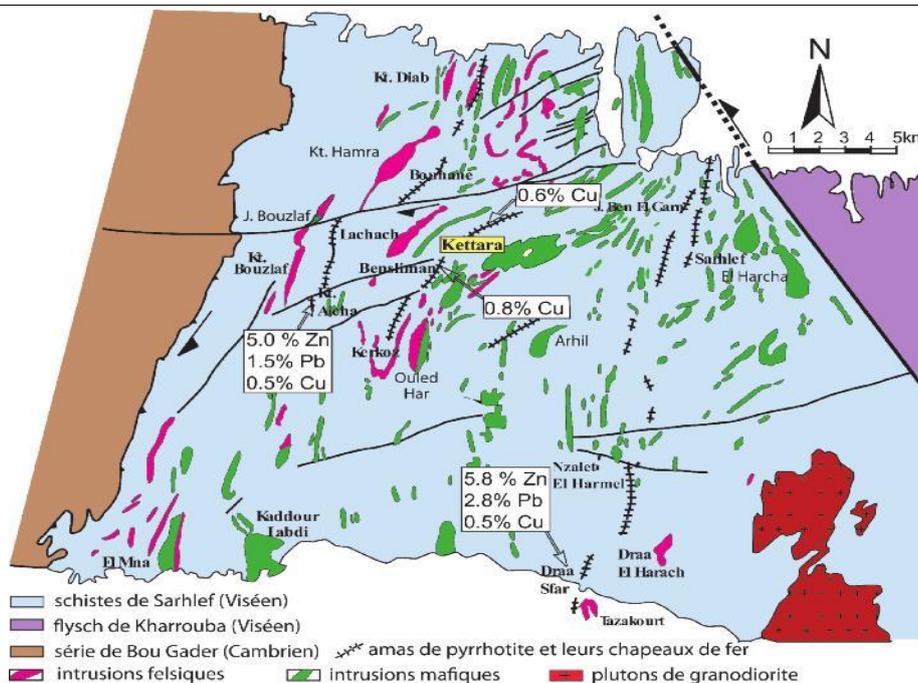


Figure 14 - Cadre géologique simplifiée de la zone Kettara (ESSAIFI et al, 1977).

#### I-4 Cadre Hydrogéologique

D'un point de vue hydrogéologique, le système aquifère dans la région de Kettara est une bicouche. Le niveau piézométrique de la nappe supérieure est situé entre 10 et 20 m par rapport à la surface du sol. Cette nappe est caractérisée par une faible perméabilité, une transmissivité de  $9.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et un coefficient d'emmagasinement de  $5.10^{-2}$  (figure 15) (Lghoul et al., 2012).

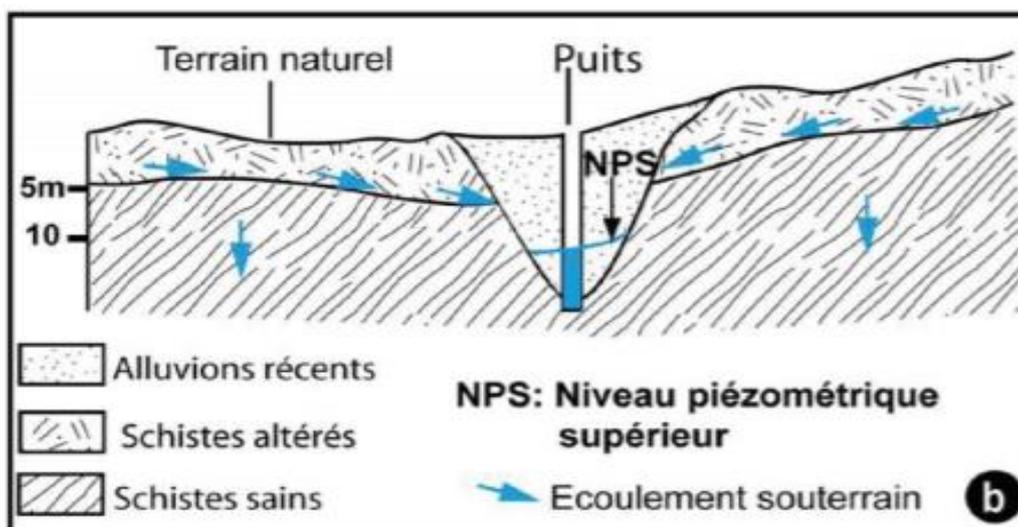


Figure 15 - Coupe hydrogéologique schématique du niveau piézométrique de la nappe Kettara (Lghoul et al, 2012).

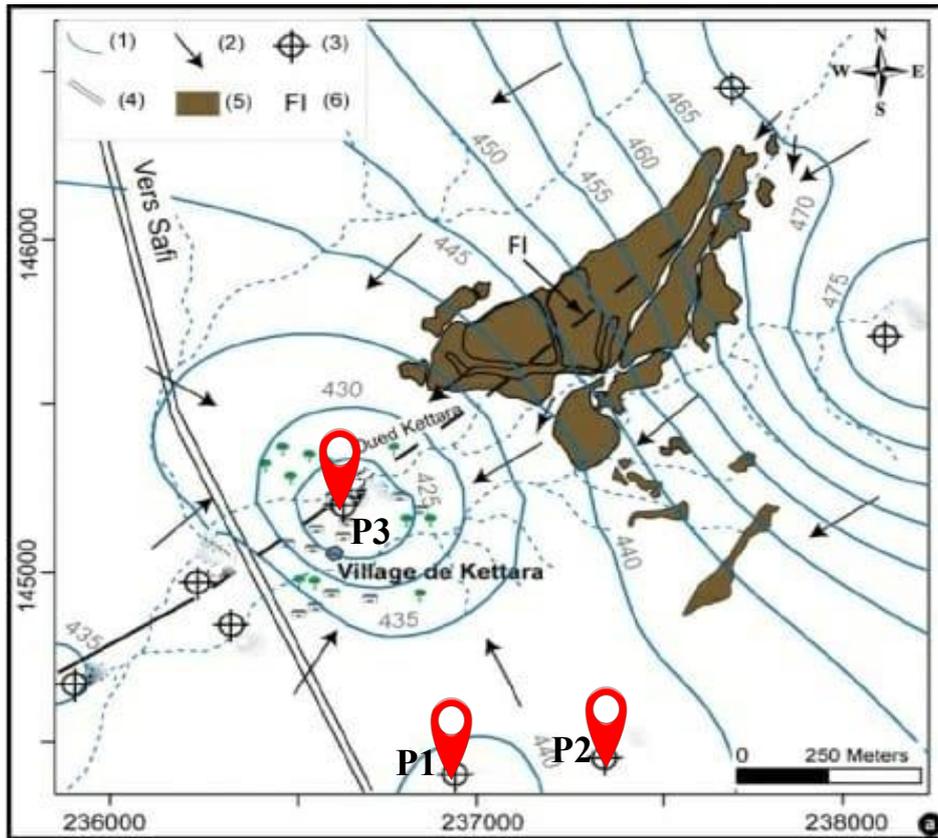


Figure 16 - Carte piézométrique de la région Kettara (Lghoul et al, 2012).

Les cartes piézométriques élaborées à l'échelle du bassin de Kettara, montrent que les écoulements des eaux souterraines se font du NE au SW.

Les observations sur le terrain, ainsi que les mesures des températures de l'eau ont montré l'existence de discontinuité d'écoulement par endroit. Ceci serait le résultat de la fracturation affectant le socle schisteux (Toughzaoui S, et al. 2010)

## **II. Travail de terrain**

### **II-1 Échantillonnage**

Dans le but déterminer l'impact des déchets miniers sur les eaux souterraines dans la zone d'étude, une campagne d'échantillonnage a été réalisée le 9/04/2021. Les points de prélèvement étaient répartis dans le périmètre choisi. Au total, 7 échantillons des eaux ont été prélevés, 3 échantillons des eaux de puits actifs autour de la mine et 4 échantillons des lixiviats de déchet minier et qui sont espacés les uns aux autres dans la mine. Ces eaux prélevées étaient échantillonnées dans des bouteilles en plastique bien fermées, nommées par des codes et conservées dans une glacière pour obtenir des analyses de bonne qualité (Figure 17).



**Figure 17 - Photo des échantillons d'eaux prélevés.**

### **II-2 Dispositif de prélèvement**

Les eaux de puits : Nous avons rempli les bouteilles à partir du robinet et des canaux d'irrigations en faisant couler l'eau pompée pendant 3 à 5 minutes pour purger les canalisations (Figure 18).



Figure 18 - Photo du prélèvement des eaux de puits.

Les lixiviats de déchet minier : Les prélèvements manuels (Figure 19) sont effectués à l'aide d'un seau avec corde. Pour éviter tout contact avec ces eaux acides nous avons porté des gants.

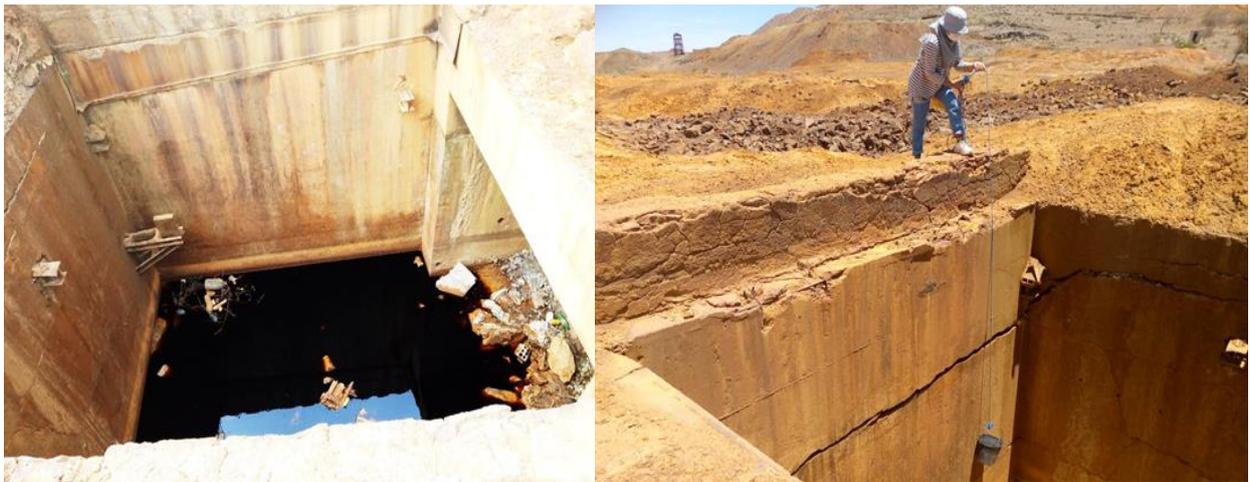


Figure 19 - Photo du prélèvement des eaux des lixiviats de déchet minier.

### II-3 Description des puits

#### II-3.1 La localisation des puits étudiés (figure 20)



Figure 20 - Carte de localisation des puits étudiés

#### II-3.2 Les caractéristiques des puits étudiés (Table VI)

Table VI- Les caractéristiques des puits étudiés.

N° du puits	Distance par rapport à la mine (m)	Profondeur de puits	L'usage de l'eau de puis
P1	666,667	14 m	Eau potable
P2	533,33	12 m	Eau d'irrigation
P3	400	Pas d'information	Eau de Hammam

## II-4 Carte d'échantillonnage

### II-4.1 Carte géologique

Le logiciel Surfer nous a permis de situer les coordonnées des points de prélèvement, mesurées in situ, (latitude, longitude et altitude par GPS) (table VII) sur la carte géologique de la zone d'étude (Figure 21) :

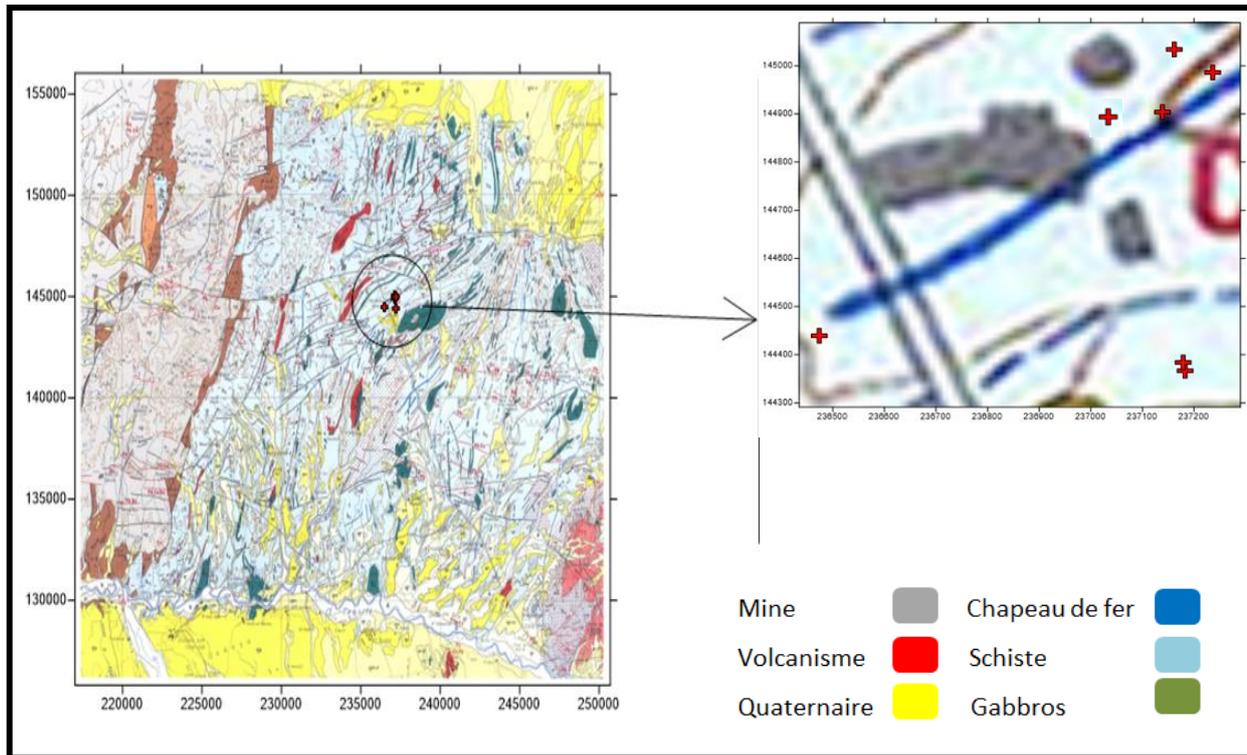


Figure 21 - Carte géologique montre la position des points d'eaux échantillonnés dans la mine de Kettara.

Table VII- Les cordonnés des stations d'échantillonnage

Point	Longitude	Latitude	Hauteur (m)
Puits 1 : P1	3525454 (en Lambert)	29 R 0577791	460
Puits 2 : P2	3525503 (en Lambert)	29 R 0577080	469
Puits 3 : P3	3525470 (en Lambert)	29 R 0577786	455
Lixiviat 1 : L1	3526119 (en Lambert)	29 R 0577747	463
Lixiviat 2 : L2	31,869428 (en degrés décimaux)	-8,178298 (en degrés décimaux)	455
Lixiviat 3 : L3	31,868768 (en degrés décimaux)	-8,179308 (en degrés décimaux)	465
Lixiviat 4 : L4	31,870187 (en degrés décimaux)	-8,177275 (en degrés décimaux)	448

### **III. Travail de laboratoire**

Les analyses réalisées au laboratoire de la faculté de science SEMLALIA sont des analyses physico-chimiques effectuées sur l'eau souterraine et les lixiviats de déchet minier.

#### **III-1 Analyses physicochimiques**

##### **III-1.1 Le potentiel hydrogène (pH)**

Il mesure l'activité chimique des ions hydrogènes ( $H^+$ ) en solution pour déterminer l'acidité de l'eau.

Pour mesurer le pH on opère de la manière suivante : On place une quantité suffisante d'eau à analyser dans un bécher de 100 ml, On étalonne le pH-mètre (Figure 22) à l'aide des solutions tampon de pH=4, pH=7 et pH=10. Ensuite on rince abondamment l'électrode avec de l'eau distillée avant de commencer la mesure des échantillons. On place l'électrode dans le bécher et on lit la valeur affichée sur l'appareil.



Figure 22 - Photo du pH-mètre

### III-1.2 La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique définit la capacité d'un matériau ou d'une solution d'électrolytes à laisser passer le courant électrique. La mesure de la conductivité (CE) permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation totale de l'eau.

Le protocole adopté est le suivant :

-On place dans un bécher de 100 ml une quantité suffisante de l'échantillon.

-On place ensuite l'électrode du conductimètre dans le bécher (figure 23), et on lit la valeur donnée par l'appareil.

On ne doit pas oublier de rincer l'électrode après chaque mesure.



**Figure 23 - Photo du conductimètre**

### III-1.3 Sulfates

L'augmentation de la teneur en sulfates dans une eau peut être considérée comme indice de pollution.

Le protocole adopté (Rodier 2009):

- Dans un tube on introduit 19,5 ml de l'échantillon dilué 1/500 pour les lixiviats de déchet minier à l'aide d'une pipette.
- On ajoute 2,5 ml de la solution de chlorure de Barium
- On ajoute 0,5 ml de solution d'HCl.
- On agite les tubes énergétiquement.
- On dose à 650 nm après 15 min par spectrophotométrie.

### **III-1.4 DCO**

La DCO est un indicateur essentiel de la qualité de l'eau qui représente la quantité d'oxygène nécessaire pour dépolluer une eau.

Le protocole adopté :

- Dans un tube à essai on pipette 1 ml de l'échantillon (L1, L2, L3 et L4 sont dilués de 1/100).
- On introduit 1,75 ml de la solution d'acide sulfurique.
- On ajoute 0,75 ml de la solution de digestion.
- On agite les tubes pour bien mélanger les solutions.
- On met les tubes dans le bloc chauffant pendant 2 heures à 150°C.
- On fait la lecture à 620 nm.

Le calcul :  $(V_m \times D \times 398,36) + 1,7598$

### **III-2 Analyse des substances indésirables**

#### **III-2.1 Nitrates**

Le protocole adopté :

- Dans un tube, on pipette 2 ml de l'échantillon (aussi dilué 1/1000 pour lixiviat).
- On ajoute 0,2 ml de salicylate de sodium,
- On agite les tubes et on les laisse à évaporer pendant 24h.
- On ajoute 0,5 ml de l'acide sulfurique avec 2 ml d'eau distillé.
- On attend 10 min puis on ajoute 3 ml de Tartrate.
- On dose les échantillons à 425 nm.

Le calcul :  $(5,652 \times V_m \times (D - 0,215) \times 4,43 \times 1)$

#### **III-2.2 Nitrites**

Le protocole adopté :

- On prélève à l'aide d'une pipette 10 ml de l'échantillon qu'on place dans un tube (l'échantillon est dilué 1000 fois pour les lixiviats).
- On ajoute 0,2ml de réactif diazotation.
- On ferme le tube et on mélange le contenu par l'appareil d'agitation.
- On fait la lecture à 537 nm.

Le calcul :  $V_m \times D \times 3,28$

### III-2.3 Azote de Kjeldahl

Par la méthode Kjeldahl, l'azote ammoniacal et l'azote organique sont dosés simultanément. L'azote de Kjeldahl est déterminé après minéralisation.

Une concentration élevée en azote Kjeldahl permet d'évaluer le niveau de pollution.

Le protocole adopté :

- On place 10 ml de l'échantillon dans un matras.
- Puis 5 ml de l'acide sulfurique et 1 gramme du catalyseur de minéralisation.
- On met les matras dans l'appareil de minéralisation (Figure 24) jusqu'à l'impidité pendant 2 heures.
- On laisse couler puis on ajoute à l'échantillon minéralisé 100 ml de l'eau distillé.
- On met quelques gouttes de phénolphtaléine.
- On ajoute de la soude jusqu'à une coloration rose.
- On met le mélange rose dans l'appareil distillateur (Figure 24) et à la sortie du tuyau on place un bécher où on introduit 10 ml de l'acide borique + quelques gouttes de l'indicateur rouge.

Le calcul :  $(0,02 \times (V_m - T) \times 14 \times 1000)/10$

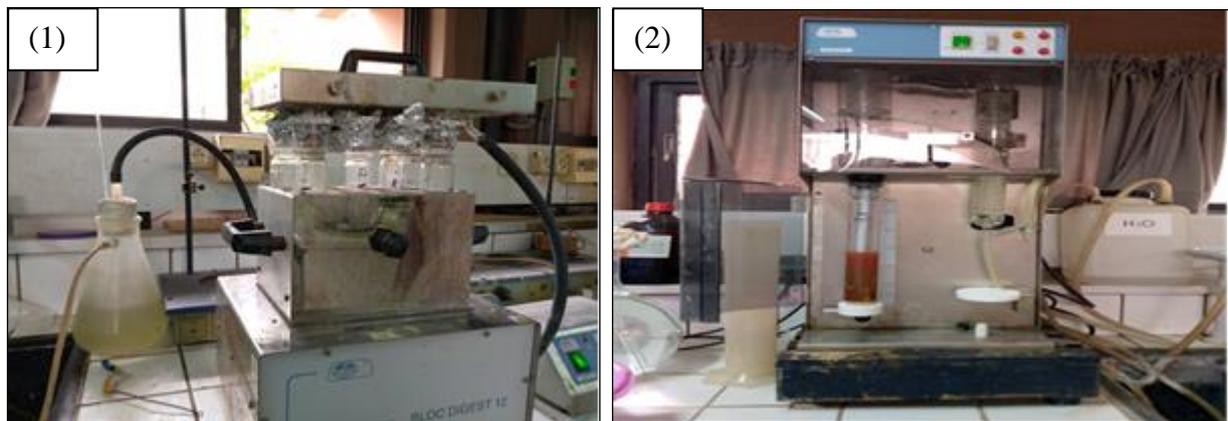


Figure 24 - Photo de l'appareil de minéralisation (1) et du distillateur utilisés (2).

### III-2.4 Ammonium

Le protocole adopté :

Pour l'ammonium on a placé : 10 ml de l'échantillon (dilué 500 fois pour les eaux de lixiviat) dans un tube de grande taille, 0,5 ml de la solution de phénol mode Nitro et 0,5 ml de la solution alcaline avec quelques gouttes d'eau de Javel. On agite tous le contenu jusqu'on atteint le mélange.

Après 6 heures dans l'obscurité on dose à 630 nm.

Le calcul:  $V_m \times D \times 0,9946$

### **III-2.5 Ortho phosphate**

Le protocole adopté :

- Dans un tube on pipette 10 ml de l'échantillon (L1 et L3 sont diluées à 100% : 1/100).
- On ajoute 0,5 ml de l'acide ascorbique
- On ajoute aussi 2 ml de réactif combiné et on agite les tubes
- On dose à 700 nm après 30 min.

Le calcul :  $V_m \times D \times 1,32$

### **III-2.6 Dureté Totale**

Correspond à la mesure du calcium(Ca) et du magnésium(Mg) contenus dans l'eau.

Le protocole adopté :

- On introduit 1 ml de l'échantillon dans un tube (les lixiviats sont dilués 1000, puis 2000 fois).
- On ajoute 1,75 ml de la solution sulfurique.
- On ajoute 0,75 ml de la solution de digestion.
- On agite les tubes pour bien mélanger les solutions.
- On met les tubes dans le bloc chauffant pendant 2 heures à 150°C.
- On fait la lecture à 620 nm.

### **III-2.7 Les éléments traces métalliques**

Les analyses des éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu et Cd) s'effectue par ICP-AES (Inductive Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy).

Le but de cette étude était de mettre en place le dosage de l'ensemble des huit éléments par une seule technique (ICP-MS) pour une application en routine. Préalablement à l'analyse, les échantillons de l'eau subissent une minéralisation. Cette minéralisation peut ensuite être diluée avant analyse.

Cette dilution permet de réduire les interférences dues aux acides mais doit permettre de garder une sensibilité suffisante vis-à-vis des valeurs guides à atteindre.

La minéralisation

- On prélève 50 ml de l'échantillon dans une cuve.
- On met les cuves à l'étuve à 105°C pendant une nuit jusqu'à séchage.
- On ajoute 3 ml de l'acide nitrique et 7 ml de l'acide chlorhydrique.
- On place les cuves sur la plaque chauffante (figure 25) jusqu'à évaporation complète.
- On introduit 10 ml de l'eau distillé.
- On filtre le contenu des cuves dans des petites bouteilles à l'aide d'un papier filtre (figure 26).

- Il faut bien fermer les bouteilles des solutions des gammes (figure 27).



Figure 25 - Photo d'une plaque chauffante.



Figure 26 - Filtration des échantillons minéralisés.



Figure 27 - La gamme étalon

## **Partie III : Résultats et Discussion**

## I. Résultats qualitatifs des échantillons d'eaux

Les résultats trouvés par les analyses physicochimiques ont été classés dans les tableaux suivants (Table VIII, Table IX):

**Table VIII- Résultats des analyses physicochimiques des eaux souterraines.**

Paramètre	Unité	Les échantillons d'eau			Réglementation concernant la qualité de l'eau destinée à la consommation
		P1	P2	P3	Maroc (2017)
<b>pH</b>	-	7,05	7,17	7,05	6,5- 9
<b>Conductivité</b>	µs/cm à 20°	816	801	1635	1500
<b>Dureté totale</b>	°F	12,4	3	41,6	15 °F
<b>Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	mg/l	14,196	16, 692	23,4	250
<b>Nitrates s (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	mg/l	0,026	0,20	0,41	50
<b>Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	mg/l	0,034	0,042	0,060	0,1
<b>Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	mg/l	0,024	0,059	0,085	0,5
<b>Ortho phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)</b>	mg/l	0,089	0,035	0,112	0,7
<b>Azote de Kjeldahl</b>	mg/l	8,4	11,2	8,4	1
<b>DCO</b>	mg/l	13,312	10,523	4,349	25

Table IX- Résultats des analyses physicochimiques de lixiviat de déchets miniers à Kettara.

Paramètres	Unités	Les échantillons d'eau				Les normes marocaines des eaux de surface				
		L1	L2	L3	L4	CLASSE1 Excellente	CLASSE2 Bonne	CLASSE3 Moyenne	CLASSE4 Mauvaise	CLASSE5 Très mauvaise
pH	-	2,15	2,15	2,16	2,18	6,5 – 8,5	6,5 - 8,5	6,5- 9,2	<6,5ou >9,2	<6,5ou >9,2
Conductivité	µs/cm à 20°	135,18. 10 <sup>3</sup>	31,83. 10 <sup>3</sup>	32,25. 10 <sup>3</sup>	31,8. 10 <sup>3</sup>	<750	750-1300	1300-2700	2700-3000	>3000
Dureté totale	°F	-	-	-	-	Doit être inférieure à 15				
Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/l	7046	12766	7930	4524	<100	100-200	200-250	250-400	>400
Nitrates s (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	74,953	19,988	34,978	54,965	≤10	10-25	25-50	>50	-
Nitrites (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/l	0	33,893	45,92	29,52	Doit être inférieure à 18				
Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	mg/l	5,271	1,292	4,873	3,282	≤0,1	0,1-0,5	0,5-2	2-8	>8
Ortho phosphate (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/l	3,234	0,103	2,772	0,066	≤0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-5	>5
Azote de Kjeldahl	mg/l	2,8	2,8	0	5,6	≤1	1-2	2-3	>3	-
DCO	mg/l	519,627	340,365	121,267	1196,84	<30	30-35	35-40	40-80	>80

## **II. Analyses des résultats et discussion**

### **II-1 Analyses physicochimiques**

#### **II-1.1 pH**

D'après les résultats des analyses et le tableau des classifications des eaux selon leur pH (Annexe I), on peut conclure que les eaux de puits du secteur étudié ont un pH neutre autour de 7 avec un moyen de 7,09.

Selon les normes de potabilité marocaines le pH est fixé entre pH=6,59 et pH=9 (Table VIII). Ces valeurs trouvées correspondent à des limites normales pour les eaux potables de bonne qualité.

Concernant les eaux de lixiviat de la mine Kettara, elles sont des eaux fortement acides avec un moyen de 2,17 (figure 28), cela est dû à l'oxydation des minéraux sulfurés qui se trouvent dans les rejets miniers. Nos résultats sont en accord avec celles obtenues par Hakkou et al (2006) concernant le pH des eaux de lixiviat de déchets miniers (pH=2 ,55) à Kettara.

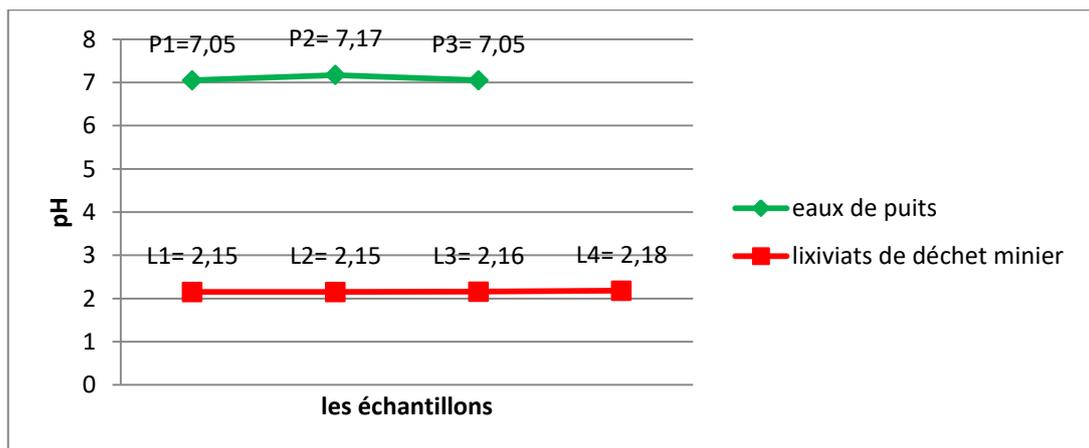
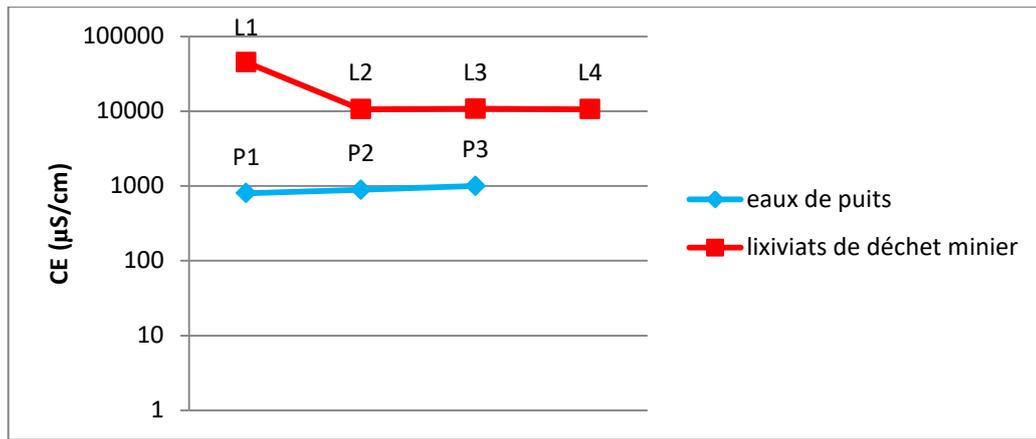


Figure 28 - Courbe de variation du pH des échantillons étudiés.

#### **II-1.2 Conductivité électrique**

Les eaux des puits P1 et P2 respectent les normes de potabilité des eaux destinées à la boisson. Le puits P3, le plus proche à la mine, montre une haute conductivité : 1635  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , qui dépasse la valeur maximale de la conductivité pour l'eau potable 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (table VIII), alors on ne peut pas considérer ces eaux comme des eaux de consommation pour l'homme.

Les autres échantillons (L1, L2, L3, L4) montrent en général une conductivité fortement élevée (Annexe II) avec un moyen de  $57,765.10^3 \mu\text{S}/\text{cm}$  identique à celle trouvée par Hakkou et al (2006), notamment dans l'échantillon L1 (figure 29). Ceci revient à la présence des sels dissous tel que ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ...) dû au contact de l'eau avec les différents types de rejets miniers.



**Figure 29 - La courbe de variation de la CE des échantillons étudiés**

À partir des courbes ci-dessus (figure 29), on constate une augmentation de la CE des eaux de puits en rapprochant à la mine. Nous déduisons donc, qu'il peut être une contamination de la nappe par une forte concentration des sels dissous due aux déchets miniers.

### II-1.3 Sulfates

Les concentrations en sulfates des eaux de lixiviat de déchet minier sont plus élevées que celles des eaux souterraines (figure 30). Les teneurs varient au tour d'une moyenne de 8066 mg/l qui présente une concentration 32 fois plus élevée que les normes de qualité des eaux potables fixées à 250 mg/l (tableau VIII) en concordance également avec les résultats de Hakkou et al en 2006.

En fait, ces échantillons de surface concernent des eaux qui circulent à travers les rejets miniers dont les concentrations en pyrite est très importantes ce qui conduit, par oxydation et en présence d'oxygène et d'humidité, à la formation d'ions sulfates en forte concentration ainsi que des protons ce qui explique leur acidité. Le diagramme ci-dessous montre la différence de concentration en sulfates des eaux souterraines et des lixiviats de déchet minier.

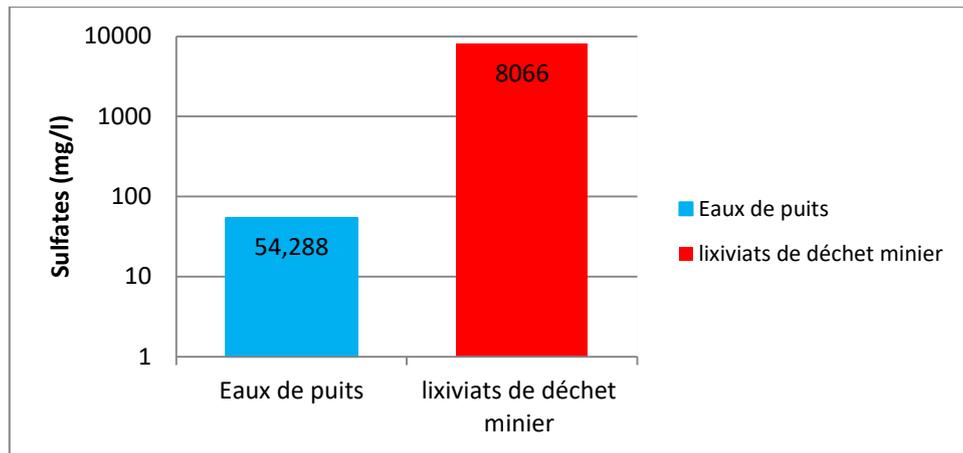


Figure 30 - La différence entre la concentration en sulfates des eaux de puits et de lixiviat de déchet minier.

### II-1.4 DCO

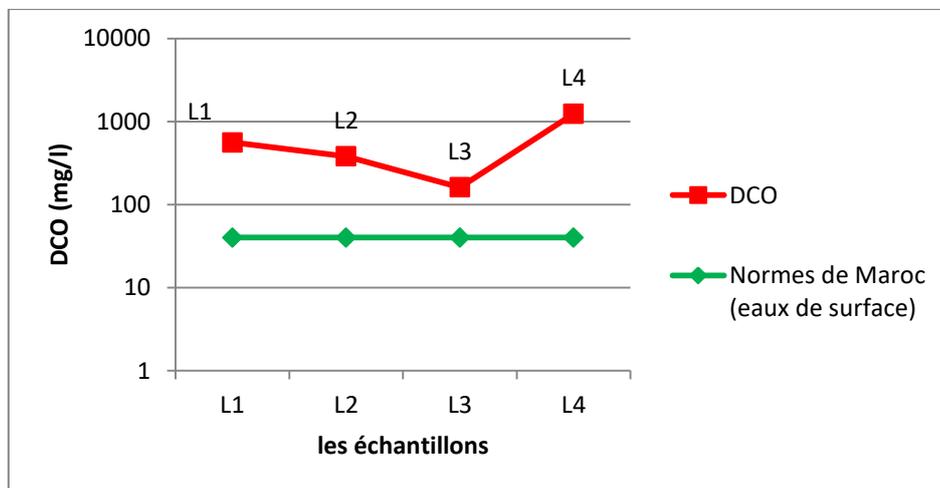


Figure 31 - Variation de DCO des lixiviats de déchet minier

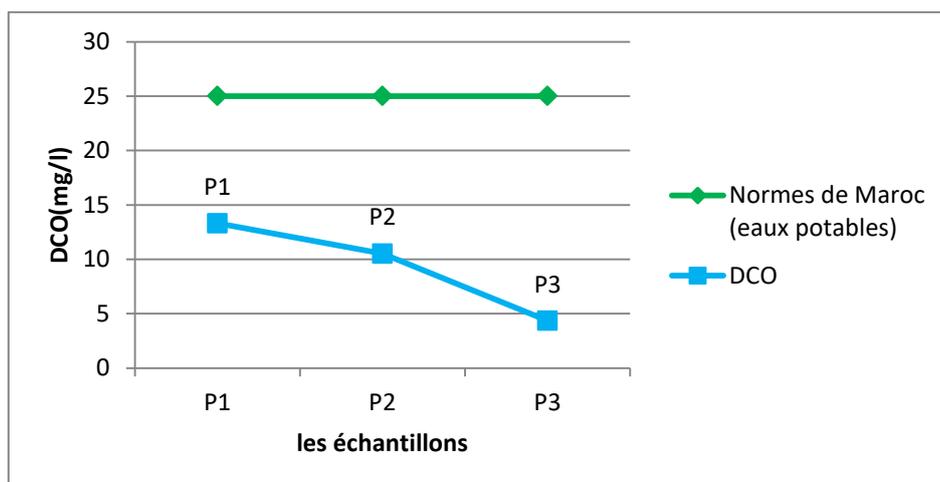


Figure 32 - Variation de DCO des eaux de puits.

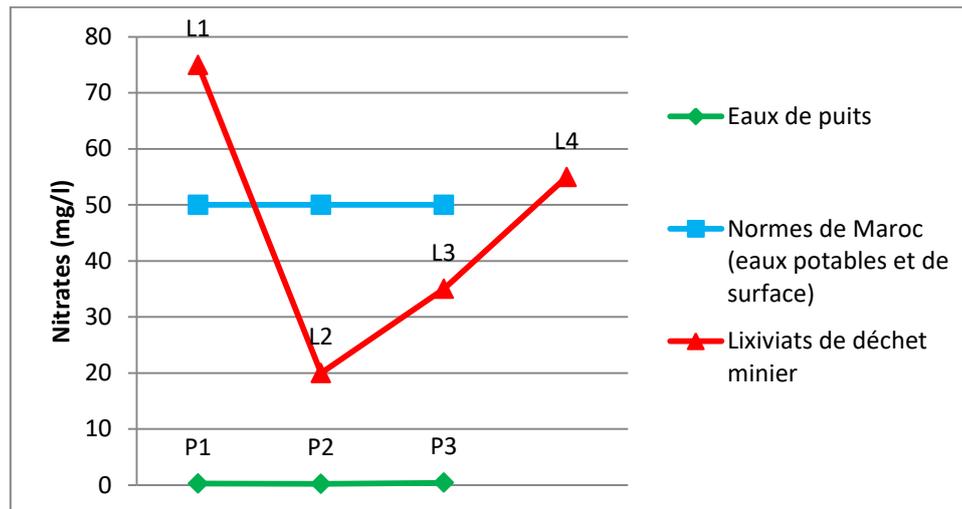
Graphiquement (figure 31 et figure 32) on voit clairement que :

- Les valeurs de DCO pour toutes les eaux de la mine étudiées dépassent la valeur de 80 mg/l (tableau IX), donc ce sont des eaux très mauvaises. On peut expliquer ces valeurs par l'oxydation des minéraux sulfuriques au niveau de la mine qui consomme en haut concentration le dioxygène.

- Les concentrations en DCO dans les eaux souterraines sont satisfaisantes puisqu'elles sont inférieures à la limite optimale de potabilité (25mg/l : Table VIII).

## II-2 Analyse des substances indésirables

### II-2.1 Nitrates

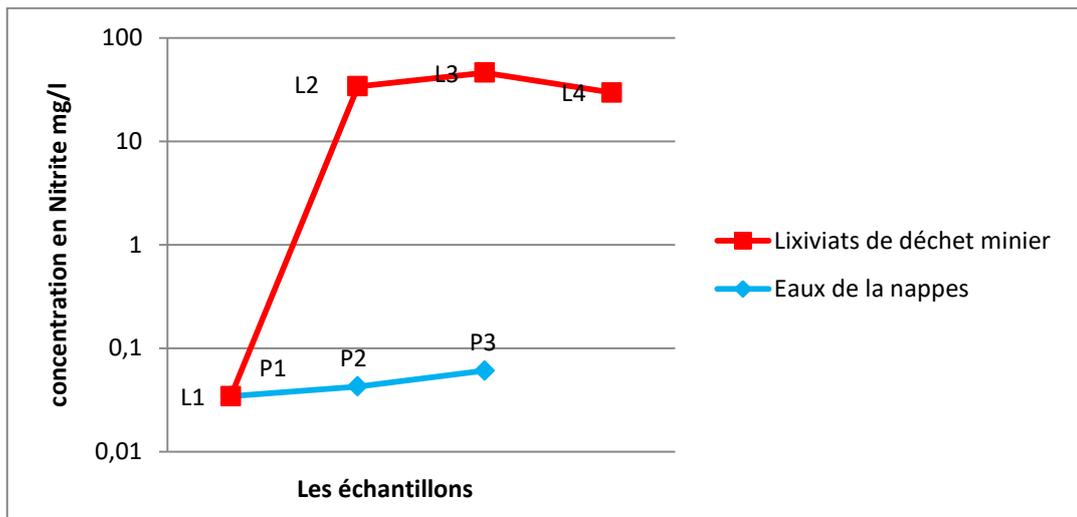


**Figure 33 - Variation de la concentration en Nitrates dans le lixiviat de déchet minier**

Les analyses de laboratoire ont révélé la présence de nitrates dans les eaux de la mine en très faibles concentrations, varient entre une valeur maximale de 74,953 mg/L et une valeur minimale de 19,987 mg /L avec une moyenne de 61,627 mg/L dépassant les normes marocaines pour les eaux de la surface (Tableau IX).

Les teneurs en nitrates dans l'eau de puits sont faibles et presque inexistantes par rapport au seuil (50 mg/L). Des analyses ont été enregistrées Draa Lasfar à Marrakech par Barkouch et *al*, montrent aussi des concentrations en nitrates inférieurs à la limite ( $2,67 \pm 0,75$  mg/l), Barkouch 2016.

## II-2.2 Nitrites

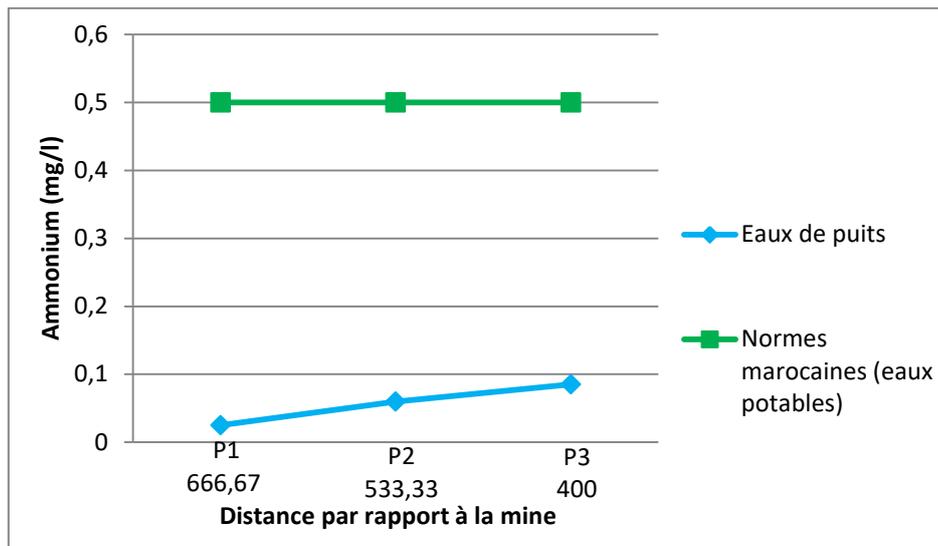


**Figure 34 - Variation de la concentration en Nitrites dans les échantillons d’eaux.**

On voit clairement des fortes concentrations en nitrites pour les eaux de la mine qui dépassent la limite supérieure à respecter (table IX) sauf pour l’échantillon L1 où on remarque l’absence de ces ions (figure 34).

On note actuellement que la situation de la pollution nitrique des eaux souterraines aux niveaux de ces zones d’échantillonnage est satisfaisante, car les teneurs en nitrites sont faibles par rapport au seuil (0,1 mg/l), cela dû à la forme instable du nitrite qui cherche l’équilibre en cédant  $H^+$  ce qui rend le milieu alcalin et transforme  $NO_2^-$  en  $NH_4^+$ . Cependant, les concentrations deviennent de plus en plus grandes en rapprochant à la mine, ce qui peut signifier la contamination de la nappe dans cette région minière.

### II-2.3 Ammonium

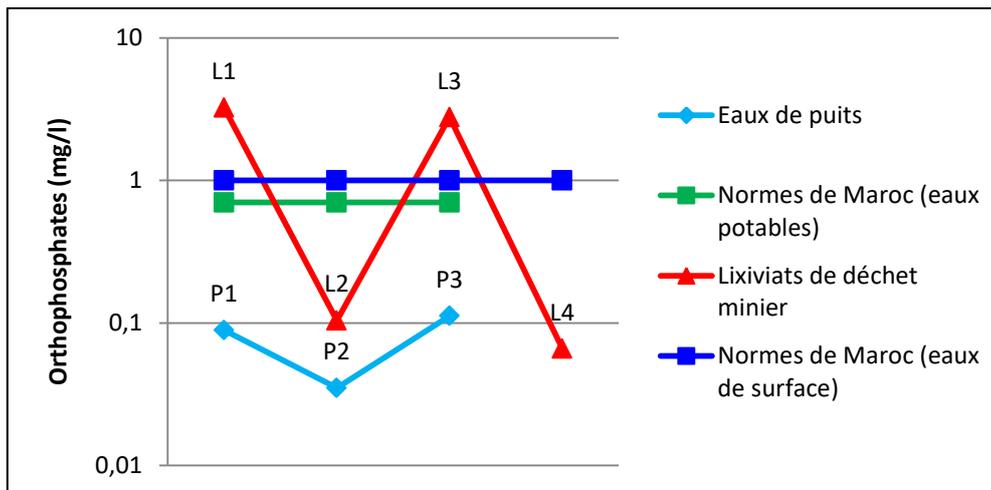


**Figure 35 - Variation de la concentration en ammonium dans les eaux de puits par rapport à la distance de la mine.**

Les concentrations en ammonium enregistrées au niveau des puits étudiés sont comprises entre 0,024 mg/l et 0,085 mg/l. Elles restent toutefois nettement inférieures à la limite admissible de l'ammonium soit 0,5 mg/l par rapport aux lixiviats de déchet minier qui ne respectent pas la limite supérieure à ne pas dépasser (tableau IX) avec un moyen de 3,68002 mg/l,

À partir de la figure 36, le degré de contamination en ammonium diffère d'un site à l'autre selon la distance d'éloignement par rapport à la mine. Cette augmentation peut s'expliquer par l'infiltration des eaux d'origine minière.

### II-2.4 Orthophosphate

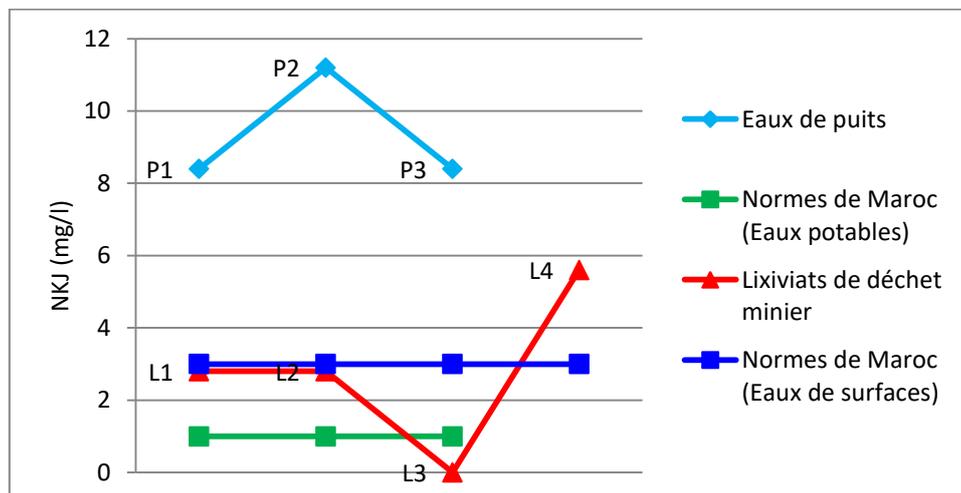


**Figure 36 - Variation des concentrations en orthophosphates dans les échantillons étudiés.**

Les teneurs en orthophosphates sont généralement à de faibles niveaux de concentration (entre 0,035 mg/l et 0,112 mg/l), Par conséquent, ce paramètre ne constitue pas un risque de pollution majeur pour les eaux de la nappe étudiée. La teneur la plus élevée est enregistrée au niveau du puits P3 le plus proche à la mine.

Au niveau des eaux de la mine la concentration en orthophosphates est élevée dans les échantillons L1 et L3, et faible pour L2 et L4 (figure 36).

### II-2.5 Azote de Kjeldahl

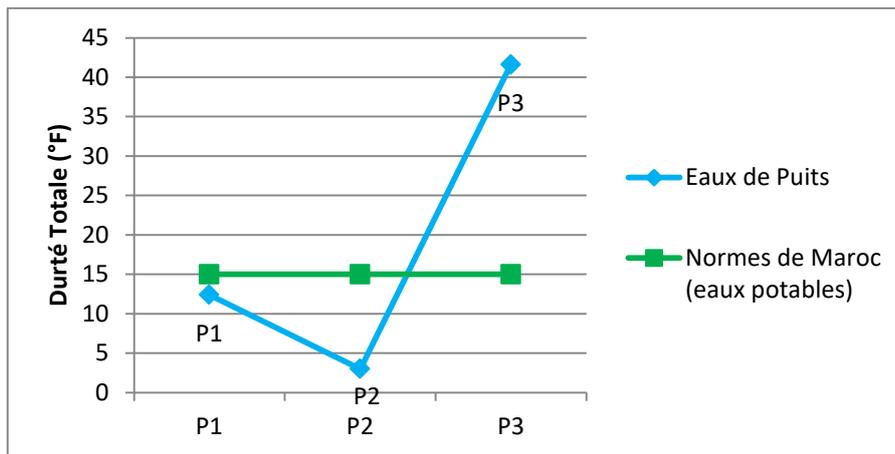


**Figure 37 - Variation de l'azote de Kjeldahl des échantillons**

D'après le diagramme (figure 37) on constate que les concentrations en azote dans les puits sont élevées dépassant les normes de potabilité (1 mg/l).

Les lixiviats de déchet minier présentent des valeurs faibles par rapport aux eaux de puits.

## II-2.6 Dureté totale



**Figure 38 - Variation de la dureté totale des eaux de puits.**

D'après la courbe ci-dessus (figure 39) nous avons une forte variation de la dureté totale des puits P1, P2 et P3.

La dureté totale pour les lixiviats de déchet minier est trop élevée, cela est remarqué après le dosage et les dilutions des échantillons des lixiviats de déchet minier avec des facteurs de dilution 1/1000 et 1/2000.

Cela est expliqué par l'existence des schistes calcaires, ce qui favorise l'enrichissement des eaux infiltrées suite l'échange avec les faciès calcaires.

Donc les eaux de puits 1 et 2 sont des eaux douces, de puits 3 sont dures et celle des lixiviats de déchet minier sont très dures (annexe 4).

Puisque la dureté de l'eau donne une indication sur la minéralisation globale des eaux, Nous pourrions dire que P1 et P2 sont faiblement minéralisés, les autres échantillons (P3, L1, L2, L3, L4), sont à minéralisées importante (annexe), c'est principalement due à la contamination par les phénomènes de dissolution et de précipitation des minéraux dans la région.

## **Conclusion et Perspectives**

---

## **∞ Conclusion**

---

Ce rapport porte sur l'étude de l'impact des déchets miniers sur la nappe souterraine de la mine Kettara, elle a révélé que les eaux de puits présentent une qualité bonne à acceptable tant que la majorité des paramètres physico-chimique ne dépassent pas les normes marocaines des eaux potables. Pour le puits 3, le plus proche de la mine, nous avons remarqué des valeurs plus concentrées.

Au contraire les lixiviats de déchet minier à Kettara contiennent des concentrations en ces éléments plus élevées que les normes légales en vigueur. Les rejets miniers de la mine sont donc volumineux et génèrent des quantités importantes en DMA. Par conséquent, traiter et chercher des solutions contre la contamination de la nappe souterraine est nécessaire pour protéger la qualité de l'eau et de l'environnement dans la région.

Pour compléter notre étude nous avons cherché et discuter les différents traitements et solutions qu'on peut agir avec, pour minimiser l'impact environnemental des activités d'exploitation à long terme tels que :

**L'isolement** : garder les déchets et les aquifères productifs éloignés. Cela doit avoir généralement lieu au cours de la phase de planification de tout développement, en particulier là où il Ya un niveau élevé de déchets générés.

**Le confinement** : Lorsque des déchets sont générés à proximité de sources d'approvisionnement en eau souterraine ou en eau de surface, alors le confinement des déchets dans des bassins imperméables est une option de gestion. Les décharges de déchets solides doivent être conçues de telle sorte qu'il y ait une base imperméable, qui peut être une forme de polyéthylène à haute densité en doublure ou une couche d'argile compactée.

**La décontamination** : c'est la restauration des aquifères pollués, cela est techniquement complexe, de longue durée et coûteux. Des méthodes telles que pomper, traiter et réinjecter l'eau traitée.

---

**∞ Perspectives d'avenir :**

---

Vu le temps qui a été alloué à l'étude d'une part et le nombre d'échantillons prélevés et la complexité des essais de laboratoire d'autres part, la méthodologie employée n'est qu'une approche pour discerner les différents paramètres contribuant aux impacts négatifs sur le milieu environnant.

Ainsi, nous suggérons et pour mener l'étude à bien, une ample campagne d'investigation consistant en :

- Etude étalée sur aux moins deux saisons (hivernale et estivale),
- Echantillonnage suffisant pour pouvoir réaliser des analyses statistiques adéquates à différents profondeurs et puits.
- Prélèvement par moyens offrant de conditions sanitaires et sécuritaires normalisés,

Tenant compte de ce qui précède, nous sommes prédisposées à contribuer dans une étude plus approfondie de l'impact sur l'environnement aussi bien sur ce même site voire un autre site à caractère pareil.

## Références bibliographiques

ACHOUR, S. et GUESBAYA, N. Essais de floculation de substances humiques en milieux aqueux minéralisés. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 2006, no 5.

Amar, H. (2020). Tri des stériles miniers comme nouvelle approche de gestion intégrée : contrôle du drainage minier et valorisation (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

ARAGON, Fernando M., RUD, Juan Pablo, TOEWS, Gerhard, et al. Mining closure, gender and employment reallocations: the case of UK coal mines. Department of Economics Discussion Papers. Burnaby, BC, Canada: Simon Fraser University, 2015.

ARANGUREN, Matías Miguel Salvarredy. *Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique*. 2008. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.

AUBERTIN, Michel, BUSSIÈRE, Bruno, BERNIER, Louis, et al. La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, 2002, p. 5-8.)

AUBERTIN, Michel, FALA, Omar, MOLSON, John, et al. Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes à stériles. In : Symposium Rouyn-Noranda: L'Environnement et les Mines. 2005. p. 15-18).

BAIZE, Denis. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France): Références et stratégies d'interprétation. Programme ASPITET. Editions Quae, 1997.

BARKOUCH, Yassir, EDDINE, El Khadiri Mohy, et PINEAU, Alain. A New Approach to Understanding Well Water Contamination by Heavy Metals at a Mining Extract Region in Marrakech, Morocco. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, vol. 25, no 3.

Bashar Hussein Qasim. Détermination, spéciation et biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les sols contaminés et technosols. Sciences de la Terre. Université d'Orléans, 2015. Français. ffnnt : 2015ORLE2069ff. fftel-01371906f

Bichara LOUKMAN, Samuel NAKOLENDOUSSE, Abdallah MAHAMAT NOUR2 and Mberdoum NGUINAMBAYE MEMTI. Caractérisation hydrochimique de la nappe de Yao et ses environs: relations entre eaux de surface (lac-Fitri) et eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2017, vol. 11, no 3, p. 1336-1349.

Boulangier-Martel, V. (2019). Évaluation de la performance de recouvrements miniers pour contrôler le drainage minier acide en climat arctique (Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal).

BOUSSICAULT, Bruno. Étude géophysique d'une digue de rétention d'eau, parc à résidus miniers SOLBEC, Stratford, Québec. 2007. Thèse de doctorat. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique)

- CHUHAN-POLE, Punam, DABALEN, Andrew L., et LAND, Bryan Christopher. L'exploitation minière en Afrique: Les communautés locales en tirent-elles parti?. The World Bank, 2019.
- DESHAIES, Michel. Grands projets d'exploitation minière et stratégie des firmes pour se rendre environnementalement acceptables. L'Espace politique. Revue en ligne de géographie politique et de géopolitique, 2011, no 15.
- EBENSTEIN, Avraham, LAVY, Victor, et ROTH, Sefi. The long-run economic consequences of high-stakes examinations: Evidence from transitory variation in pollution. *American Economic Journal: Applied Economics*, 2016, vol. 8, no 4, p. 36-65.
- ESSAIFI, A. et CORRE, L. 5.3-L'ancienne mine de pyrrhotite de Kettara (Jebilet centrales). *The Former Pyrrhotite Mine of Kettara (Central Jebilet)*, 1977.
- Federico CASTELLUCCI, 2013, ANALYSE DES ELEMENTS MINERAUX DES VINS PAR ICP/AES (INDUCTIVELY COUPLED PLASMA / ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY), Vu l'article 2 paragraphe 2 iv de l'accord du 3 avril 2001.
- GARCIN, Manuel, RICHARD, Didier, LIÉBAULT, Frédéric, *et al.* *Gestion du passif de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie. Guide méthodologique 2018*. 2018. Thèse de doctorat. CNRT "Nickel et son environnement".
- GOUZY, Aurélien et DUCOS, Géraldine. La connaissance des éléments traces métalliques: un défi pour la gestion de l'environnement. *Air pur*, 2008, vol. 75, p. 6-10.
- Hassan Bouzahzah, Mostafa Benzaazoua, Bruno Bussière et Benoit Plante (2014) Recommandations sur l'utilisation des outils de prédiction du drainage minier acide, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda (QC), J9X5E4.
- HUVELIN, Paul, *et al.* *Etude Géologique et Géochimique Du Massif Hercynien Des Jebilet (Maroc Occidental)*. 1977.
- LGHOUL, Meriem, KCHIKACH, Azzouz, HAKKOU, Rachid, et al. Etude géophysique et hydrogéologique du site minier abandonné de Kettara (région de Marrakech, Maroc): contribution au projet de réhabilitation. *Hydrological sciences journal*, 2012, vol. 57, no 2, p. 370-381.
- MEBROUK, Y. et KISSANI, N. Syndromes Parkinsoniens d'origine toxique au Sud du Maroc: Etude épidémiologique, clinique, biochimique, toxicologique et histopathologique.
- NFISSI, Samiha, ZERHOUNI, Youssef, BENZAAZOUA, Mostafa, et al. Caractérisation des résidus miniers des mines abandonnées de Kettara et de Roc Blanc (Jebilet Centrales, Maroc). *Société Géologique du Nord*, 2008, vol. 18, p. 43-53.
- SEBEI, A., CHAABANI, F., et OUERFELLI, M. K. Impacts des rejets miniers sur le sol et les plantes de la région de Boujaber (NO. Tunisie) Fractionnement chimique des métaux lourds dans les sols. *Geo-Eco-Trop*, 2005, vol. 29, p. 37-50).
- SEIGNEUR 2018 – Seigneur Ch, Pollution atmosphérique. Concepts, théorie et applications, Edition Belin 2018.

TAPE, Antoine Sehi Bi, COULIBALY, Aboubakar, ANOH, Paul Kouassi, et al. Production des déchets et santé des travailleurs: Cas de la Mine d'or de Tongon (Côte d'Ivoire). Eur Sci J, 2019, vol. 15, p. 104-18)

Thierry LABASQUE, Apports des traceurs environnementaux à la connaissance des eaux souterraines (thèse de doctorat Université de Corté), 2020.

TOUGHZAOU, S., EL AMARI, K., BENKADDOUR, A., et al. Evaluation de l'effet de l'activité minière dans un climat semi-aride sur la qualité des sols et eaux souterraines: Cas de l'ancienne mine de Kettara. Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées, 2015, (3MA), p. 201.

TOUMBA, Oumarou et WAKPONOU, Anselme. Exploitation minière dans l'arrondissement de Figuil (Cameroun): problèmes de santé publique et effets environnementaux. Belgeo. Revue belge de géographie, 2014, no 4.

**Web-Biblio :**

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&from=ES>

<https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>

<http://www.eaudumaroc.com/2017/10/les-normes-de-leau-potable.html#:~:text=25%20%C.-,2.,aux%20eaux%20conditionnées%20non%20minérales>

<https://www.alamyimages.fr/photo-image-les-morts-terrains-acier-geant-ouvert-la-mine-de-charbon-de-l-excavateur-53824595.html>

<https://www.citepa.org/fr/ml/>

<https://www.toutsurmoneau.fr/eau-dans-ma-commune/SURESNES-92073/calcaire>

<http://www.mercuryconvention.org/Accueil/tabid/5576/language/fr-CH/Default.aspx>

<http://sigesbre.brgm.fr/Qu-est-ce-qu-un-aquifere.html>

## ANNEXES

ANNEXE 1 : Tableau de classification de Ph (Pompe et Traitement d'eau LCR, 2018).

Classe du pH	
Désignation	Valeur
Fortement acide	0- 5,5
Moyennement acide	5,5- 6,0
Faiblement acide	6,0- 6,7
Neutre	6,7- 7,3
Faiblement basique	7,3- 7,8
Moyennement basique	7,8- 8,5
Fortement basique	8,5- 14

ANNEXE2 : Tableau de classification de la conductivité électrique (Ouhamdouch et al, 2018)

Classe de La conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	
Désignation	valeur
Basse conductivité	<250
Conductivité modérée	250- 750
Haute conductivité	750- 2000
Fort conductivité	2000- 2500
Très fort conductivité	>2500

ANNEXE 3 : Tableau de classification de la minéralisation (Abdellatif HAKMI, 2006).

Valeur de la conductivité	Classification de la minéralisation
Conductivité < 100uS.cm-1	minéralisation très faible
100uS.cm-1 < conductivité < 200uS.cm-1	minéralisation faible
200uS.cm-1 < conductivité < 333uS.cm-1	minéralisation moyenne
333uS.cm-1 < conductivité < 666uS.cm-1	minéralisation moyenne accentuée
666 uS.cm-1 < conductivité < 1000 uS.cm-1	minéralisation importante
Conductivité <1000 uS.cm-1	minéralisation élevée

ANNEXE 4 : Tableau de classification de la dureté totale (SUEZ, 2021).

Désignation	Valeur de la dureté en °F
Eau très douce	De 0 à 8°F
Eau douce	De 8 à 15°F
Eau moyennement dure	De 15 à 25°F
Eau dure	De 25 à 35°F
Eau très dure	Au-delà de 35°F

ANNEXE 5 : La minéralisation totale en fonction de la dureté totale de l'eau (ACHOUR et al, 2006)

Dureté totale (°f)	Minéralisation totale
< 30	Faiblement minéralisée
>30	Minéralisation importante