



Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech
Département des Sciences de la Terre



Laboratoire de Géoresources
Unité associée au CNRST
(URAC42)



Centre d'étude et de recherche
Sur l'eau et l'énergie

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques

Eau et Environnement



**Comportement hydrochimique, qualité des eaux et cartographie de
quelques minéralisations au voisinage de la mine de Hajjar
(Plaine du Haouz, Maroc).**

Par :

Noura LKEBIR

Sous la direction de :

Mr. BENKKADOUR A. (FST-G)
Mr. HEJJAJ A. (CNEREE)
Mr. IBOUH H. (FST-G)

Soutenu le 28 juin 2013 devant la commission d'examen composée de :

Mr. BENKKADOUR A.
Mr. HEJJAJ A.
Mr. IBOUH H.
Mr. EL AMARI K.
Mr. TOUIL A.

2012/2013

Remerciements

Au terme de mon travail, je ne peux commencer le présent mémoire sans citer les noms et présenté mes profonds remerciements aux nombreuses personnes, qui ont rendu la réalisation de ce travail, des moments unique.

Tout d'abord, je tiens à présenter mes profonds remerciements à mes encadrants, Monsieur **Benkaddour Abdelfattah** de la faculté des sciences et techniques et Monsieur **Hajjaj Abdesamad** du centre national d'étude et de recherche sur l'eau et l'énergie. Je tiens à leurs présenter ma gratitude et mon respect pour leurs conseils, orientations et pour la grande liberté qu'ils m'ont laissée afin de réaliser ce travail, tout en restant à l'écoute et en veillant a ce que mon stage se déroule dans de bonnes conditions.

Un grand merci est adressé à Madame **Laila Mandi** directrice du CNEREE et à toute l'équipe du centre, pour leurs conseils et leurs encouragements.

Je tiens particulièrement à remercier tous les membres du Jury, Monsieur **Touil Ahmed** et Monsieur **Khalid El Amari** pour avoir accepté d'évaluer mes travaux de me faire part de leurs remarques.

Les mots ne suffisent pas pour remercier les personnes suivantes : Monsieur **Laftouhi Nour Eddin** Monsieur **El Mandour Abdenebi** de la faculté des sciences Semlalia, et Messieurs **Hibti Mohamed, Bachnou Ali, Ibouh Hassan, El Alaoui El Mojahid M. H. et Madame Essarraj Samira**, pour leurs aides, le temps précieux qu'ils m'ont consacrés et de m'avoir fait part de leurs grand savoir.

Merci à mes collègues, amis et frères de la salle d'étude : **Chaoui Maryeme, Boumenni Hassnae, Sabir Soufyane et Adallal Rachid**. Un grand merci pour l'ambiance chaleureuse, vos conseils, la bonne humeur qui règnent dans la salle et les bons moments qu'on avait passé ensemble durant ce stage.

Ma gratitude la plus profonde est pour mes parents : **Lkebir Abdeljalil et El Aoufi Safia**. Merci pour votre dévouement, votre amour, vos encouragements, votre soutien. Les mots ne suffisent pas à leur exprimé mon grand amour.

Enfin je tiens à remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, et dont les noms ne figurent pas dans ce document. Que ces personnes me pardonnent et trouvent ici l'expression de ma grande gratitude et mon plus grand respect.

Table des matières

Résumé.....	6
Liste des abréviations	7
Introduction générale	8
A-CADRE GENERAL ET PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	9
I. Aperçu sur les éléments trace métalliques (ETM)	9
1. Généralités et définitions	9
2. ETM, origine et toxicité pour l'Homme	9
a. Cuivre (Cu).....	9
b. Zinc (Zn).....	10
II. Aperçu sur l'activité minière	10
1. Généralités	10
2. Techniques d'exploitation.....	11
3. Résidus d'activité minière.....	11
III. L'activité minière au Maroc	12
IV. Généralité sur la mine de Hajjar	14
1. Situation de la mine de Hajjar.....	15
2. Historique de la découverte du gisement de Hajjar et l'installation de la mine.....	15
3. Minerais exploités par la mine de Hajjar	16
a. Minéraux sulfurés.....	17
b. Oxydes de fer, de cobalt et de titane	18
4. Méthodes d'extraction et de traitement des minerais sulfurés	19
5. Résidus générés par la mine de Hajjar et leurs caractéristiques.....	19
a. Résidus solides issus de la mine de Hajjar	19
b. Caractérisations des résidus solides de la mine	21
c. Aspect de protection de l'environnement au niveau du la mine	23
V. Cadre général de la zone d'étude	24
1. Géologie de la zone d'étude.....	25
2. Hydrologie et climatologie de la zone d'étude	28
a. Hydrologie.....	28
b. Climatologie.....	29
3. Caractéristiques humaines et infrastructures.....	32

B- TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES ET INDICES DE MINERALISATION DANS LA ZONE D’ETUDE	33
I. Généralité sur la télédétection spatiale et les images satellitaires.....	33
1. Principe de la télédétection	34
2. Différents types des capteurs et caractéristiques des images satellitaires.....	35
3. Rayonnement et spectre électromagnétique.....	37
4. Les images satellitaires	38
a. Notions d’image numérique.....	38
b. Contenu de l’image satellitaire	38
II. Traitement des images satellitaires	39
1. Caractéristiques des images satellitaires étudiées.....	39
2. Re-échantillonnage et re-projection des images	40
3. Extraction des indices de minéralisation.....	41
a. Indice de végétation (NDVI).....	41
b. Extraction de la carte des linéaments.....	43
c. Indice du soufre.....	45
C- CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX AU VOISINAGE DE LA MINE DE GUEMASSA	49
I. Matériels et méthodes	49
1. Prélèvement des eaux.....	49
2. Mesures physico-chimiques des eaux.....	51
a. Mesures <i>in situ</i>	51
b. Analyses au laboratoire.....	53
c. Analyse des ETM.....	55
II. Hydrogéologie	55
III. Résultats des analyses et discussions.....	58
1. Qualité et critiques des analyses chimiques.....	58
2. Hydrochimie des éléments majeurs	61
a. Paramètres physiques	61
b. Eléments chimiques majeurs.....	68
c. Evolution des faciès chimiques des eaux	70
d. Analyse en composante principale.....	74
e. Indices de saturation.....	76
e. Origine de la minéralisation des eaux	78

3. ETM dans les eaux au voisinage de la mine	79
D- NORMES ET QUALITE DES EAUX DANS LA ZONE D'ETUDE.....	84
1. Notion de pollution et normes de qualité	84
2. Loi et législation sur les normes et la qualité des eaux	85
4. Qualité des eaux au voisinage de la mine	86
a. Par rapport à la potabilité	86
b. Par rapport à l'irrigation.....	87
Conclusion générale.....	90
Annexes.....	91
Références bibliographiques.....	97
Liste des figures	101
Liste des tableaux.....	102

Résumé

La mine de Hajjar située au piémont de la chaîne du Haut Atlas est un pôle important dans l'industrie minière. Elle exploite de nombreux minerais notamment des sulfures. La mine est entourée par plusieurs agglomérations. Les ressources en eau exploitée par les habitants sont rares et minéralisées.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier le comportement hydrochimique des eaux au voisinage de la mine. Afin de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux et déceler d'éventuel impact de la mine sur la qualité chimique des eaux.

L'indice de soufre, les linéaments et l'occupation du sol ont été extraits à l'aide des traitements des images satellitaires. L'indice de soufre a montré l'existence naturelle du soufre dans la zone, en plus des haldes. Le sol de la région ne connaît pas une vraie couverture végétale. La carte des linéaments a montré un terrain faillé avec l'existence de plusieurs familles de fracturation.

Les résultats trouvés par le traitement des images ont pour objectif, la connaissance de la répartition des minéraux (spécialement les sulfures) dans la zone. Les résultats ont donné de bons signes au niveau du puits P5 (relation entre encaissant et l'enrichissement en ETM).

17 échantillons d'eaux de surface, de source et des eaux souterraines ont été analysés. L'analyse a porté sur les éléments majeurs et quelques ETM. Les résultats ont montré la présence de forte conductivité et des concentrations en éléments majeurs dans les eaux circulant en aval immédiat de la mine. Les ETM notamment le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont présents dans les cours d'eau en aval des bassins de rétention de la mine ainsi que dans quelques points d'eau souterraine au voisinage de la mine.

A l'exception de quelques concentrations en ETM, la qualité chimique des différentes eaux du site s'est avérée bonne.

Mots clés : Guemassa, hydrochimie, métaux lourds, mine, normes, télédétection, qualité.

Liste des abréviations

ABHT : Agence du Bassin Hydraulique de Tensift.

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.

ONHYM : Office National des Hydrocarbures et des Mines.

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

CMG : Compagnie Minière de Guemassa.

CNEREE : Centre National d'Etude et de Recherche sur l'Eau et l'Energie.

CTT : Compagnie Tifnout Tiranimine.

ETM : Eléments Trace Métallique.

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra-acétique.

GPS: Global Positioning System.

LHEA : Laboratoire d'Hydrobiologie, Ecotoxicologie et Assainissement.

Moy : moyenne.

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

OCP : Office Chérifien de Phosphate.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

PIB : Produit Intérieur Brut.

SAA : Spectromètre à Absorption Atomique.

SONASID : Société Nationale de Sidérurgie.

TDS: Total Dissolved solids (total des solides dissous).

TM: Thematic Mapper.

USGS : United States Geological Survey.

Introduction générale

Le Maroc est connu à l'échelle mondiale par sa richesse minière très importante et très diversifiée. Cela est traduit par un nombre important d'exploitations minières, dont la plus connue dans la région du Haouz est celle de Hajjar. La mine de Hajjar (connu aussi par le complexe industriel de Guemassa) est une mine exploitant un gisement sulfuré d'âge viséens, dont le socle est constitué par des schistes, des grès et des carbonates. Au niveau du complexe, sont également traités les minerais de plusieurs autres gisements (Draa Sfar, Bou Azzer, etc).

La région de Guemassa est caractérisée par un climat aride avec une rareté des ressources en eaux. Plusieurs agglomérations de cette région utilisent l'eau distribuée lors des lâcher du Barrage Lalla Takerkoust qui constitue le seul réservoir alimentant l'aval de l'oued N'fis. Les problèmes de ces eaux de surface, c'est qu'elles ne sont disponibles qu'en fonction du taux de remplissage du barrage et du programme de vidange du fond établie par l'ABHT. Aussi, ces eaux sont utilisées uniquement le long du trajet du l'oued. L'alimentation en eaux en dehors des bords de l'oued N'fis est effectuée par les eaux des sources et des puits implantés d'une manière artisanale dans la région. Ces points d'eau sont connus pour leur faible productivité surtout en périodes sèches. Ces eaux sont, également, caractérisées par leurs minéralisations importantes.

L'étude du comportement hydrochimique des eaux de surfaces et des eaux souterraines (nappe libre du plio-quatenaire) à proximité et en aval de ce site minier, constitue l'objectif principal de ce mémoire. Sont également concernées par ce travail la nature, la typologie et la qualité des eaux tout en identifiant le potentiel impact des rejets du complexe miniers sur les ressources en eaux dans la région. En outre, l'extraction de l'indice du soufre à l'aide du traitement d'images a été faite dans le but de visualiser la dispersion de cet élément dans les formations géologiques de la région.

Le sujet entre dans le cadre d'un projet de fin d'études du Master « Eau et Environnement », de la faculté des sciences et techniques de Marrakech, en collaboration avec le centre national d'étude et de recherche sur l'eau et l'environnement (CNEREE).

Le présent mémoire de stage est organisé en quatre principales parties. La première est une synthèse bibliographique sur l'activité minière, caractéristique du gisement de Hajjar, avec quelques notes sur l'activité du complexe industriel de Guemassa, et une présentation de la zone d'étude.

La deuxième partie est axée sur le traitement des images satellites (ASTER et TM) pour l'extraction de l'information cartographique. Il s'agit de la réalisation de l'indice du soufre, la carte des linéaments et l'extraction de l'indice de végétation.

La troisième partie est consacrée à l'étude hydrochimique de la zone à l'aide des éléments majeurs. Quelques éléments traces métalliques (ETM), seront introduits afin d'évaluer la contribution des rejets miniers sur la chimie de l'eau.

La dernière partie est consacrée, à l'évaluation de la qualité chimique des eaux à la lumière, des différentes lois législatives adoptées au Maroc.

A-CADRE GENERAL ET PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

Cette partie est une synthèse bibliographique concernant l'activité minière et la description de la zone d'étude.

I. Aperçu sur les éléments trace métalliques (ETM)

Avant d'entamer la description de la zone d'étude, il été nécessaire de proposer un bref rappel sur les ETM, car l'activité minière est l'une des sources de contamination par ces polluants. De ce fait, l'impact de la mine, sera évalué par ces métaux.

1. Généralités et définitions

Les métaux lourds peuvent être définis d'un point de vue chimique, comme étant les éléments de la classification périodique qui forment des cations. Mais d'un point de vue physique, le terme "métaux lourds" désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certaines cas métalloïdes, caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g/cm^3 (ADRIANO, 2001). Les biologistes quant à eux définissent les métaux lourds selon leurs effets sur les organismes en métaux essentiels et métaux toxique.

Les métaux essentiels sont des éléments indispensables mais à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires. Mais à forte dose dans l'organisme ses métaux essentiels deviennent toxiques comme c'est le cas de : Cu, Ni, Zn, et Fe, etc.

Par contre les métaux toxiques n'ont aucun effet bénéfique connu pour l'organisme. Ils sont toxiques à très faible quantité. C'est le cas de Pb, Hg et Cd.

Ces éléments sont souvent appelés en littérature par « les éléments trace métallique », car ils sont présent en très faible concentration dans l'environnement (BAKER et WALKER, 1990). Le terme ETM est celui adapté lors de la présente étude.

A cause de certains problèmes de l'appareil de mesure au niveau de SAA (absence des lampes à cathode creuse), l'étude des ETM dans ce travail sera limitée à deux éléments, à savoir : le cuivre (Cu) et le zinc (Zn).

2. ETM, origine et toxicité pour l'Homme

a. Cuivre (Cu)

Le cuivre selon NICOLINI, 1990 est un élément abondant dans la croûte terrestre (présente un peu près 0,01%). Les principaux minerais de cuivre sont : la chalcosine (Cu_2S), covelline (CuS) chalcopyrite (CuFeS_2), bornite (Cu_5FeS_4), cuprite (Cu_2O), et l'azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Il a plusieurs origines ; soit naturelle due au lessivage des formations et des gisements qui le contiennent, soit anthropique par les rejets des usines de traitement minier et de industriel.

C'est un oligo-élément qui joue un rôle particulièrement important dans la résistance aux maladies et à la régulation de l'eau chez les plantes. La toxicité de ce métal pour les organismes aquatiques

dépend de la forme chimique (et notamment de son état d'oxydation) dans laquelle il se trouve. A une concentration élevée, le cuivre entraîne chez l'homme, la détérioration des hématies, des poumons, du foie et du pancréas. Il provoque la maladie de Wilson (se caractérise par une cirrhose du foie et des troubles neurologiques) due à un dépôt de cuivre dans les viscères tels que le foie, le cerveau et le rein (EL HACHIMI, 2006).

b. Zinc (Zn)

Le zinc est un oligo-élément, souvent associé au plomb et au cadmium dans les minerais naturels où il représente une teneur s'échelonnant de 4 à 20% . Le minerai principal est la blende (ZnS), et la calamine (ZnCO₃). Le zinc est souvent associé au plomb, au fer et au cuivre (association blende, pyrite, galène, chalcopryrite). La dernière association est celle de la mine de Hajjar.

La plupart du zinc est rejeté par les activités industrielles, telles que l'exploitation minière, la combustion du charbon de bois et des déchets et l'industrie de l'acier.

Cet élément provoque des problèmes de santé importants, comme des crampes d'estomac et des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie. De très hauts niveaux de zinc peuvent endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines (BILLON *et al.*, 2010)..

II. Aperçu sur l'activité minière

Cette partie du mémoire est consacrée aux généralités sur les mines, les types d'exploitations et les résidus issus de ces activités.

1. Généralités

La mine est définie par l'ensemble des installations nécessaires à l'extraction, au traitement à la valorisation d'un gisement.

Les mines existaient avec l'homme depuis l'Antiquité, et évoluaient avec son évolution et avec ses besoins en minerais. Mais la grande apogée des mines était depuis l'ère de la révolution industrielle jusqu'au aujourd'hui. Car avec les progrès techniques et technologiques, surtout en géologie et en méthode d'extraction minière, la production devenait plus rapide avec des quantités plus importantes. En plus, cela avait amélioré d'une manière remarquable la qualité des matériaux extraits.

L'explication des différentes méthodes d'exploitation et de traitement du minerai a pour but la compréhension des différentes étapes nécessaires à l'extraction d'un minerai.

L'extraction d'un gisement se fait selon deux méthodes. Ces méthodes distinguent le type de la mine. D'après le BRGM, 1999, c'est la situation topographique, la géométrie, la morphologie du gisement et son tonnage qui déterminent la meilleure méthode utilisée pour l'exploitation. Les deux types des mines sont :

- **La mine à ciel ouvert :**

C'est une exploitation effectuée uniquement pour un gisement dont la profondeur ne dépasse pas les 300 mètres et qui présente un grand tonnage avec une teneur faible. Pour ce type de mines le coût d'extraction reste faible, mais demande plusieurs opérations de mise en évidence du gisement.

- **La mine souterraine :**

L'exploitation dans ce type de mines est coûteuse avec une productivité inférieure à la mine à ciel ouvert. Le gisement se situe en profondeur et doit avoir des teneurs importantes du minerai afin de rentabiliser son exploitation. L'exploitation s'effectue en galeries souterraines. En plus des galeries, les exploitants ont l'obligation de creuser des puits permettant la liaison entre les galeries et l'aération. Ces puits permettent l'évacuation du minerai, du personnel et l'exhaure des eaux.

2. Techniques d'exploitation

Les techniques d'exploitation des mines varient en principe selon les conditions d'extraction, de valorisation et du type du minerai extrait. En gros les opérations réalisées afin d'extraire un minerai peuvent être classées selon trois étapes (BRGM., 1999) :

- **Les travaux nécessaires pour donner accès au gisement** : naturellement ce sont les travaux de découverte dans le cas d'une mine à ciel ouvert et de creusement des galeries et puits dans le cas d'une mine souterraine. A noter que dans cette phase d'exploitation les déblais générés sont considérés comme des stériles.
- **Les travaux liés à l'extraction du minerai** : ces travaux consistent à un tri préliminaire afin d'éliminer le maximum possible de gangue lors de la phase de traitement du minerai.
- **Les travaux du traitement du minerai** : ils sont effectués dans un ensemble de filières de traitement, qui sont regroupés dans une usine d'enrichissement "la laverie". Dans cette usine on sépare la phase minérale utile de la gangue. Le traitement est réalisé selon différentes techniques de séparation : minéralogie, hydrométallurgie et pyrométallurgie. La séparation est effectuée par gravimétrie, par flottation, par lixiviation, par amalgamation, etc.

3. Résidus d'activité minière

Selon le BRGM, 1999, Un résidu minier peut être défini comme tout produit ou dépôt qui résulte d'une des étapes de la recherche, de l'exploitation minière et/ou du traitement d'un ou plusieurs minerais.

Ces résidus peuvent être de diverses natures, soit des résidus naturels tel que les minéralisations non exploitables, les stériles ou les produits artificiels plus au moins transformés issus des différentes phases de traitement et d'enrichissement du minerai (comme les rejets de laverie et de la fonderie). Ces derniers rejets peuvent contenir des additifs chimiques minéraux ou organiques toxiques à l'environnement.

Le volume de ces résidus varie en fonction du type de la mine, de la taille du gisement et du mode de traitement du minerai (DAROUSSIN, 1998). Ils seront stockés dans des sites aux alentours de la mine.

Les résidus miniers solides peuvent être classés en quatre groupes (BRGM, 1999) :

- Les stériles de découverte ou de creusement des galeries, stockés souvent sous forme des terrils.
- Les stériles d'exploitation sans importance économique, stocké sous formes de haldes.
- Les résidus de traitement et d'enrichissement contenant des concentrations résiduelles non négligeables en minerai et en produit de traitement. Ces résidus sont souvent transférés vers une des digues à stériles ou déposés en verses.
- Les rejets de grillage ou de la fonderie qui se présentent sous forme de scories, produits de nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées.

En plus des rejets solides, les mines génèrent aussi des rejets liquides. Ils peuvent être soit :

- Des eaux d'exhaure qui sont des eaux souterraines issues du pompage des eaux qui immerge les zones d'exploitation.
- Des eaux issues du lavage de la phase du traitement du minerai.

Ces eaux ayant une minéralisation assez importante, riches en matière en suspension et en réactifs de traitement qui n'ont pas consommés lors de la phase de traitement, (tel que : les cyanures, les collecteurs, les moussants, les régulateurs, etc.), seront stockés soit dans des bassins de décantation afin de les réutiliser après leur traitement. Soit déversés directement dans la nature dans des rivières ou dans des terrains avoisinants (EL HAMIANI, 2011).

III. L'activité minière au Maroc

Le domaine des mines au Maroc constitue un apport économique important pour le pays, car il renferme des structures géologiques diverses et très demandées à l'échelle locale et internationale (Figure 1) Ces structures sont connues par des concentrations de nombreuses substances minérales. Ces substances offrent au Maroc une richesse de 2.83 % de son PIB, avec l'emploi de 38000 personnes. En plus, l'installation des sites miniers constitue un apport en développement avec la construction de plusieurs infrastructures, surtout dans les régions rurales (EL ADNANI, 2008). Selon le ministère de l'énergie et des mines, le secteur des mines constitue 19.3 % de l'exportation nationale vers l'étranger, avec une production annuelle de 22.586 millions de tonnes.

Ce secteur est exploité par 2695 titres miniers : 637 opérateurs, 110 sociétés et 525 opérateurs individuels. Les producteurs exploitent plusieurs gisements, dont les principaux minerais exploités sont : les phosphates, le charbon, le plomb (Pb), l'argent (Ag), l'or (Au), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le cobalt (Co), le manganèse (Mn), l'antimoine (Sb), le fer (Fe), la barytine (BaSO₄), la fluorine (CaF₂),

le sel (NaCl), le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), etc. De toute cette liste, c'est les phosphates et les métaux de base (Pb, Cu, Fe, Zn, Mn et Sb) qui détiennent une grande importance économique dans le secteur (El ADNANI, 2008). La figure 1 montre les différentes mines existant au Maroc et les minerais extraient.

Mais le grand problème que connaît ce secteur c'est les sites miniers orphelins, qui génèrent en exploitant les minerais, des rejets et résidus sans traitement jetés directement à la nature (Cas de la mine de Kattara dans la région de Marrakech, les mines Zaida, Aouli et Mibelaben dans la haute Moulouya), en absence de législation sévère sur la gestion des déchets miniers et la réhabilitation des sites après fermeture, les mines en activité sont consternées avec ce problème de rejet et résidus non aménagés (El ADNANI, 2008).

La région de Marrakech selon El ADNANI, 2008 enferme des richesses minières diversifiées et d'une grande importance économique. Plusieurs substances minérales sont exploitées comme : le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le sel (NaCl), l'argent (Ag), etc. Actuellement 487 titre miniers ont été attribués afin d'accroître l'exploitation, en plus des compagnies de prospection menées par ONHYM dans la région, afin de découvrir de nouvelles ressources.

Actuellement, la région de Marrakech connaît un nombre important de mines abandonnées, tel que : la mine de pyrrotite de Kattara, la mine polymétallique de Goundafa, la mine du plomb et d'argent de Karkour, la mine de plomb et de zinc d'Assif El Mal, etc. Les gisements de Draa Sfar et Hajjar sont les principaux gisements en cours d'exploitation pour leurs métaux de base : plomb (Pb), zinc (Zn) et cuivre (Cu). Le chapitre qui va suivre traitera le gisement de Hajjar l'un des gisements exploités par la mine de Hajjar, et qui se trouve au cœur de la zone concernée par ce travail.

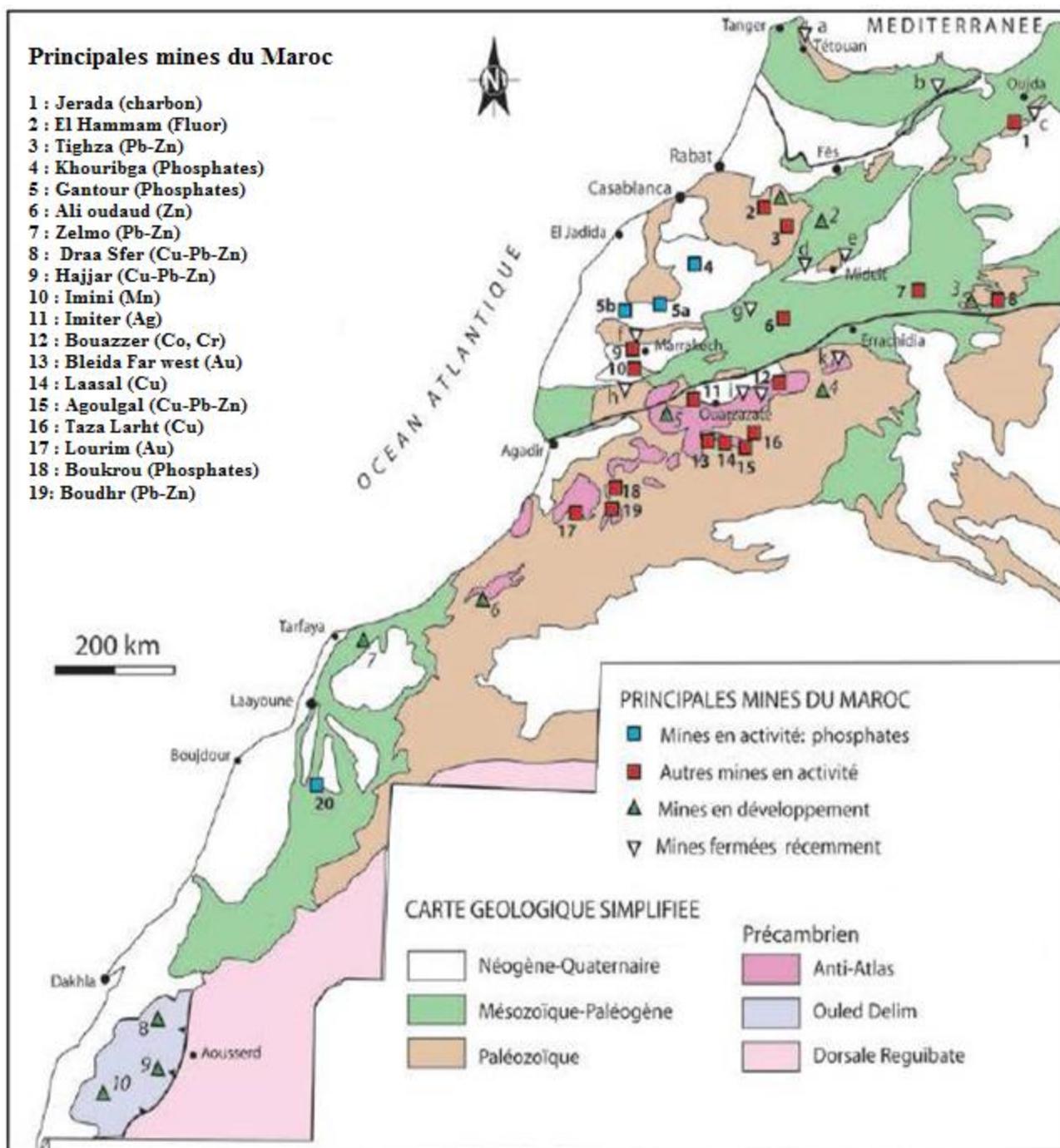


Figure 1 : Localisation des mines marocaines les plus importantes, classées selon leur état d'exploitation. (ABARRO *et al.*, 1998 in MOUTTAQI *et al.*, 2011).

IV. Généralité sur la mine de Hajjar

La présente partie traitera les différents gisements exploités et les modes d'extraction effectuées au niveau de la mine. Un côté est consacré aux déchets miniers avec les différents aspects de protection de l'environnement.

1. Situation de la mine de Hajjar

La mine de Hajjar se situe au sud-ouest de la ville de Marrakech dans la plaine du Haouz central (Figure 2), à une distance approximative de 35 km de la citadine.

Cette mine appartient au groupe minier MANAGEM qui y exploite le gisement polymétallique de type volcano-sédimentaire hydrométal de Hajjar (Douar Lahjar) situé à l'est du massif de Guemassa (CMG, 2003). Depuis 2001, la mine a commencé l'exploitation du gisement de Draa Sfar. Ce dernier est situé dans un contexte géologique et minéralogique semblable à celui de Hajjar (El ADNANI, 2008), à 16 Km au Nord-Ouest de la ville de Marrakech.

Les deux gisements sont constitués d'un amas sulfuré qui comporte comme richesse minérale : la sphalérite (ZnS), la chalcopirite (CuFeS₂), et la galène (PbS). La mine extrait le concentré de ces minerais. De ce fait la mine était classée parmi les dix premiers gisements de Zn au Monde (HIBTI, 1993).

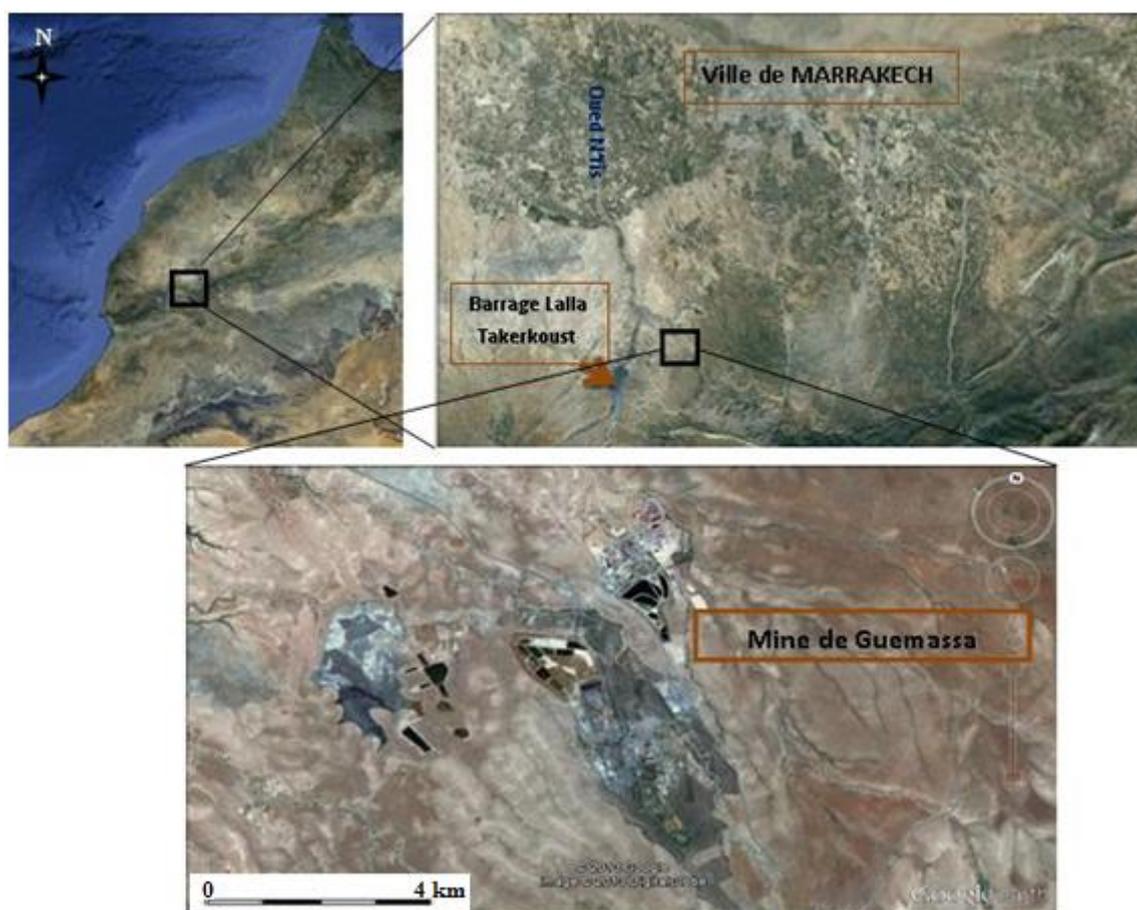


Figure 2 : Images satellites montrant la situation géographique de la mine de Guemassa. (Images de GOOGLE EARTH datées de 27/06/2011).

2. Historique de la découverte du gisement de Hajjar et l'installation de la mine

La découverte du gisement de Kattara dans les années trente, a poussé les explorations dans le secteur de Jebilet et de Guemassa. Ces explorations ont abouti finalement au début des années soixante

à la découverte du site de Hajjar (HIBTI, 1993 et 2001). Grâce à un levé aéroporté, les localités de Frisem et N'Zala ont montré une forte anomalie magnétique (HUVELIN et SNOEP, 1965). Depuis cette découverte, la Direction de la géologie du Ministère de l'énergie et des mines en collaboration avec l'ONHYM et le BRGM, ont entamé plusieurs travaux de recherche miniers dans le massif de Guemassa (HAIMEUR, 1998 et HIBTI, 1993).

En 1984, le premier sondage carotté (HS1) était réalisé dans le site. Ce sondage a découpé un peu près de 118 m de sulfures massifs, ce qui représente une importante réserve en métaux de base et en soufre. Ce dernier est trop recherché pour la valorisation des phosphates (HAIMEUR, 1998).

Après plusieurs sondages, l'évaluation de la richesse minière du site de Hajjar est estimée à 20 Millions de tonnes avec 8% de Zn, 2 à 3% de Pb, 0.4 à 0.6% de Cu et 60 g/t de Ag (EDDEBBI et *al.*, 1998).

En 1988, été l'année de création de la Compagnie Minière de Guemassa (CMG). La mine a démarré au mois de novembre 1992. Sa durée de vie était estimée à environ 16 ans (HIBTI, 1993).

La nomination mine de Hajjar et complexe industriel de Guemassa ne désigne pas la même chose. La mine de Hajjar (CMG actuellement) est l'ancienne nomination du site. Par contre la nomination de complexe industriel de Guemassa regroupe en plus de la mine de Hajjar, autres unités industrielles qui ne sont pas concernés par la présente étude.

3. Minerais exploités par la mine de Hajjar

Le complexe industriel de Guemassa qui s'étale sur 200 ha, est composé de quatre filières principales. Plus de 1800 personnes y travaillent : la CMG, la CTT, REMINEX et TECHSUB, dont les deux premières sont des filières d'exploitations tandis que les deux autres sont des sociétés de service.

La transformation du minerai est assurée par plusieurs unités dont les plus importantes sont (Figure 3) :

- La première usine appartenant à la CMG traite les sulfures du gisement de Hajjar et Draa Sfar. Le produit principal est l'oxyde de zinc (4.500 t/an pour la céramique ou le caoutchouc).
- La deuxième usine appartient à la CTT et traite le cobalt extrait de la mine de Bou Azzer. Il produit la cathode de cobalt à une moyenne de 1.800 T/an (qui représente 4% de la production mondiale). En plus de cobalt, l'usine traite le trioxyde d'arsenic (6.870 t/an pour la fabrication de préservatif de bois, de pesticides, etc.)
- La troisième usine qui est la plus récente, produit l'acide sulfurique à partir des déchets stockés dans la digue.

Actuellement, le complexe traite plusieurs gisements : celui des sulfures de Hajjar et Draa Sfar, la calamine du Jbel Bou Dhar (Haut Atlas Oriental), le cobalt (Co) de Bouazzer (Anti-Atlas central), le cuivre (Cu) et d'argent (Ag) de Bouskour (J. Saghro, Anti-Atlas oriental), etc. L'ensemble de leurs activités est certifié ISO 9001, version 2000.

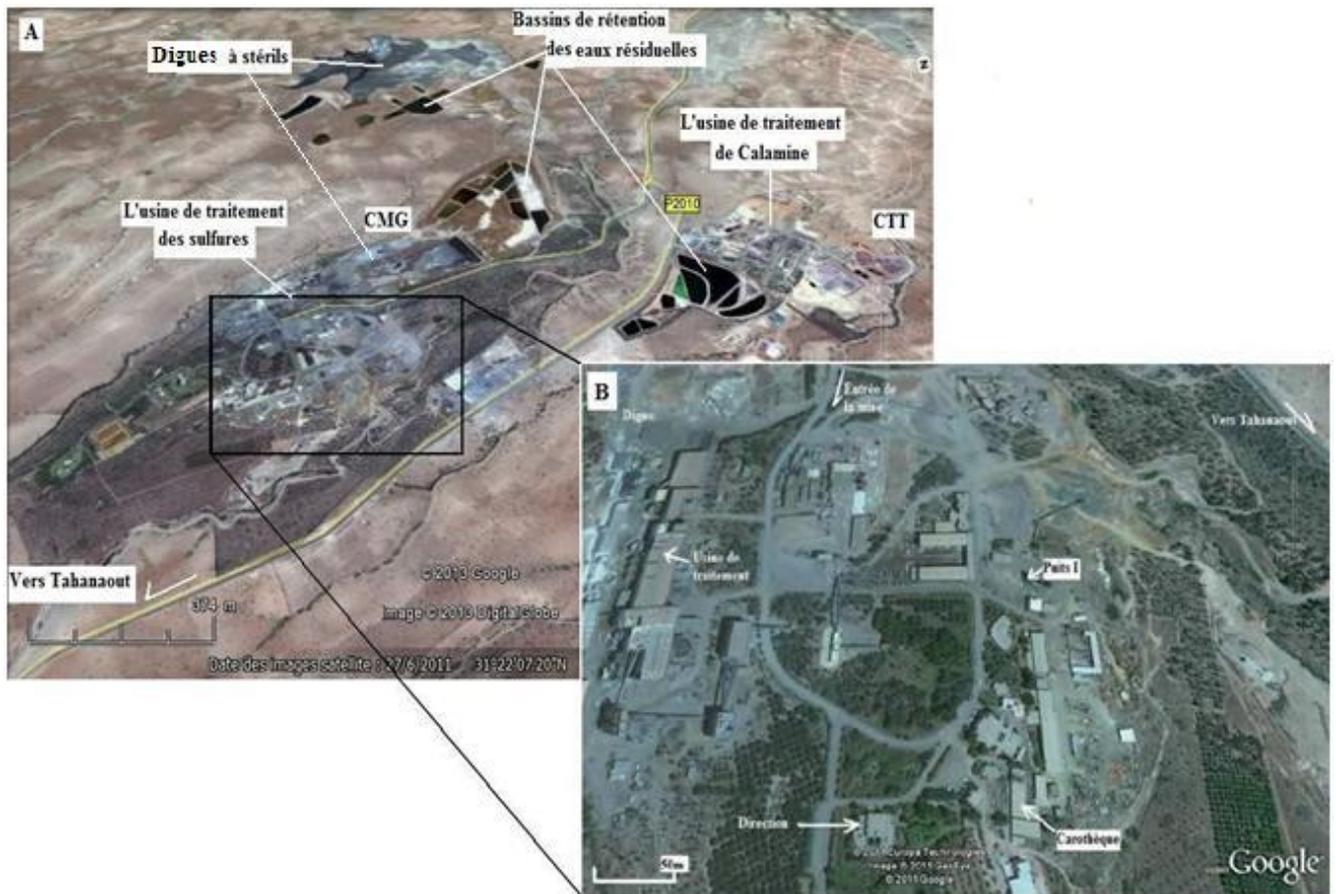


Figure 3 : Image satellitaire de la mine de Guemassa (A : Vue d'ensemble B: vue des aménagements de la CMG, images GOOGLE EARTH du 27/06/2011).

a. Minéraux sulfurés

Les sulfures sont des minerais non métalliques, se présentant largement dans la nature sous plusieurs formes. Les différents sulfures traités dans le complexe sont :

- **Pyrrhotite ($Fe_{1-x}S_{1+x}$)**

La pyrrhotite est la roche principale de tous les sulfures exploités par la mine. Elle représente un peu près de 75 à 95 % du minerai de Hajjar (HAIMEUR, 1988) et 75 à 90 % du volume minéralisé de Draa Sfar (HIBTI, 2001). La pyrrhotite de Hajjar est comme celle de Kattara, très riche en enclave de gangue et d'encaissant schisteux. En plus elle est enrichie en plomb de 1320 à 3510 ppm, selon la position de l'exploitation (SQUARE, 1988 *in* HIBTI, 1993). Pour la pyrrhotite de Draa Sfar, elle est associée généralement à la chalcopryrite dans les zones à faible minéralisation, et à la sphalérite ou la galène dans les zones à forte minéralisation (HIBTI, 2001).

La pyrrhotite est un sulfure de fer, qui ne représente pas une vraie richesse minérale pour la mine. Elle constitue un déchet stocké sous forme de halde. Dernièrement la mine commencera l'extraction de l'acide sulfurique à partir de ces déchets.

- **Pyrite (FeS₂)**

Comme la pyrrhotite, la pyrite est présente partout dans le gisement du Hajjar (HIBTI, 1993), mais énormément abondante dans la partie ouest du gisement sulfuré (EDDEBBI *et al.*, 1998). Par contre le gisement de Draa Sfar présente une minéralisation plutôt pauvre en ce minéral (HIBTI, 2001). Ce sulfure de fer constitue un déchet comme la pyrrhotite.

- **Arsénopyrite (FeAsS)**

Elle est aussi présente dans le gisement qu'il soit de Hajjar ou de Draa Sfar. Son enrichissement en arsenic varie entre 30.6 et 33.5 %. Le fer présente des teneurs de 31.6 à 33.8 %. Ce sulfure contient aussi du sélénium de 600 à 1700 ppm dans la minéralisation de Hajjar (EDDEBBI *et al.*, 1998). Celle de Draa Sfar est enroulée par la pyrrhotite et la sphalérite (HIBTI, 2001).

A cause de sa richesse en As qui est un poison naturel, ce sulfure constitue une nuisance pour l'environnement des mines.

- **Sphalérite ((Zn, Fe) S)**

C'est le sulfure le plus abondant dans le gisement de Hajjar après la pyrrhotite. Elle est souvent entourée par la chalcopyrite. D'après HIBTI (1993), Ce sulfure de zinc est caractérisé par des enrichissements importants en fer (6.5% à 7.5%), en manganèse (de 500 à 2500 ppm) et en plomb (de 220 à 2800 ppm). C'est le principal minerai de Zn dans le gisement de Hajjar et de Draa Sfar exploités par la mine.

- **Galène (PbS)**

La galène est souvent associée à la sphalérite, et parfois en inclusions au sein de la pyrrhotite (HIBTI, 1993 et 2001). La galène est un sulfure de plomb, enrichie en argent (Ag) et en cadmium (Cd), avec des teneurs dans le gisement de Hajjar, qui peuvent aller jusqu'à 1400 ppm en Ag, et de 330 ppm à 750 ppm en Cd (EDDEBBI *et al.*, 1998).

- **Chalcopyrite (CuFeS₂)**

Elle est la phase minérale principale porteuse du cuivre (Cu) dans les gisements. Elle se présente sous différentes formes : rubané, lité ou remobilisé. Elle est moins abondante que la pyrrhotite et la sphalérite, et se présente sous forme d'incrustations au sein de la pyrrhotite (HIBTI, 1993 et 2001).

En plus des sulfures principaux, la minéralisation traitée contient des enrichissements plus au moins abondants d'autres sulfures. Tel que : la marcasite (FeS₂), la wurtzite ((Zn, Fe) S), La stannite (Cu₂FeSnS), etc.

b. Oxydes de fer, de cobalt et de titane

En association avec les sulfures, les deux gisements représentent des teneurs variables en oxyde de fer et de titane. Le gisement de Hajjar selon HIBTI, (1993), contient de l'hématite (Fe₂O₃), de la magnétite (Fe₃O₄), de l'ilménite (FeTiO₃), et du rutile (TiO₂). Les oxydes rencontrés dans le minerai de Draa Sfar sont essentiellement formés de la magnétite (Fe₃O₄) et la cassitérite (SnO₂).

4. Méthodes d'extraction et de traitement des minerais sulfurés

Selon EDDEBBI *et al.*, (1998), le gisement de Hajjar a la forme d'une lentille qui s'étend latéralement en direction E-W sur 250 m et en direction N-S sur une centaine de mètres. La minéralisation du gisement est fortement inclinée et se situe entre les côtes 630 et 330 m.

Le pôle de traitement de la mine peut extraire 85 000 tonnes de concentré de Zn, 20 000 tonnes de concentré de Pb, et 15 000 tonnes de concentré de Cu (groupe MANAGEM, 2012). Avec le rejet de 3500 à 4500 T/j de stériles (constitués essentiellement de sulfure de fer) stockés derrière une digue, et de 6900 à 9000 m³ d'eau/j, de résidus de lavage et d'extraction (KARRAKCHOU, 2012).

La mine de Hajjar comporte différentes unités de traitements et de valorisation du minerai *in situ*. Le traitement passe par plusieurs étapes : concassage primaire, concassage secondaire, broyage et classification. Ensuite une étape de pré-concentration est appliquée afin d'éliminer les silicates du minerai. Cette dernière étape est la flottation différentielle qui est l'étape clé du traitement (Figure 4). Il suffit d'injecter de l'air avec un produit chimique dans le bassin à flottation pour séparer les boues qui restent au fond, du minerai qui flotte à la surface sous forme de mousse. Ce procédé se fait à l'aide de plusieurs réactifs qui sont : les moussants, les collecteurs, les déprimants-activant et les régulateurs du pH (EDDEBBI *et al.*, 1998).

Au final de ces étapes, le concentré collecté en éléments est à 68 % plomb, 28 % cuivre et à 52 % zinc (EDDEBBI *et al.*, 1998).

Après le zinc récupéré passe par un procédé de conditionnement, où un séparateur magnétique permet de réduire la teneur en fer à plus de 10 %. Au final les concentrés collectés sont séchés et expédiés comme produits finaux.

5. Résidus générés par la mine de Hajjar et leurs caractéristiques

Les résidus miniers peuvent être de différentes natures. Les types et la quantité des déchets dépendent de la nature du gisement et des méthodes d'extraction. La présente partie traitera uniquement les rejets solides de la mine.

a. Résidus solides issus de la mine de Hajjar

Sur le site minier de Hajjar, la roche encaissante est principalement des sulfures. Cette roche est constituée essentiellement par : la pyrite et la pyrrhotite. Ces sulfures ne sont pas économiquement rentables. Donc ils se retrouvent dans les résidus stockés sous forme de haldes, ou bien dans les bassins d'évaporation d'eau résiduelle issus du traitement du minerai

Les phases rentables, (sphalérite, la chalcopirite et la galène), contiennent aussi des résidus. Ces résidus sont récupérés dans la phase du traitement du minerai. La partie récupérée est stockée, elle aussi soit dans la digue soit dans les bassins. Ces rejets sont souvent d'une taille fine, avec une couleur grisâtre à noirâtre (EL ADNANI, 2008).

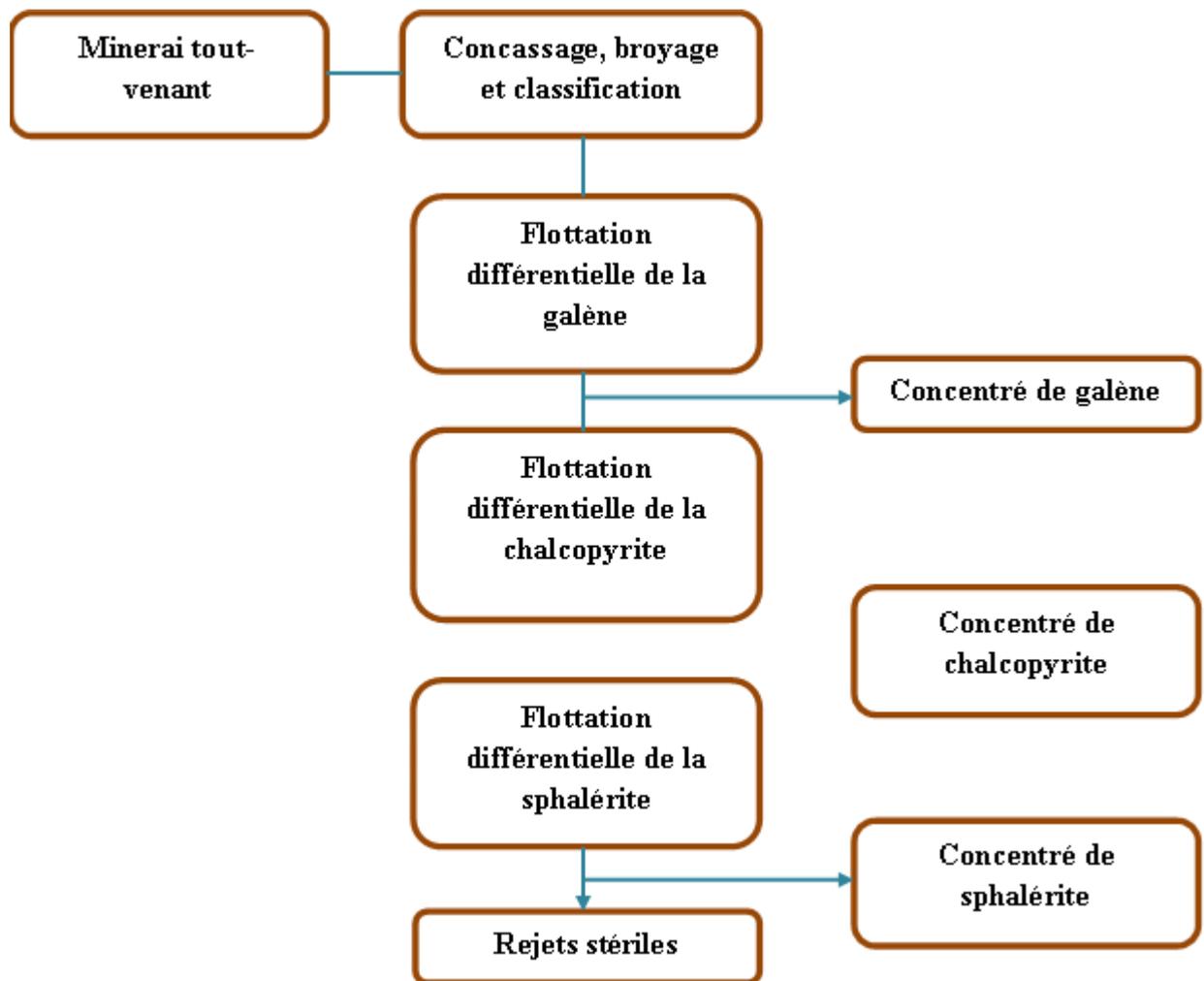


Figure 4 : Procédés d'extraction et de traitement du minerai sulfuré de Hajjar (KARRAKCHOU, 2012 modifié).

Le site contient deux parcs à résidus (Figure 5). Le premier est un ancien site, qui a une superficie de 175000 m². Il contient les résidus de traitement de minerai de Hajjar uniquement. Sa surface est partiellement sèche et se caractérise par une coloration jaune marron (Figure 5 A). Cette coloration témoigne de l'oxydation des sulfures et de la précipitation des minéraux secondaires. L'actuel parc à résidus se caractérise par une superficie plus importante (372000 m²). Il contient les résidus du traitement de Hajjar et de Draa Sfar mélangés (Figure 5B). La forte teneur en eaux des résidus de l'actuel parc fait que les résidus ne sont pas encore oxydés et se caractérisent par une coloration grise-noirâtre (EL ADNANI, 2008).

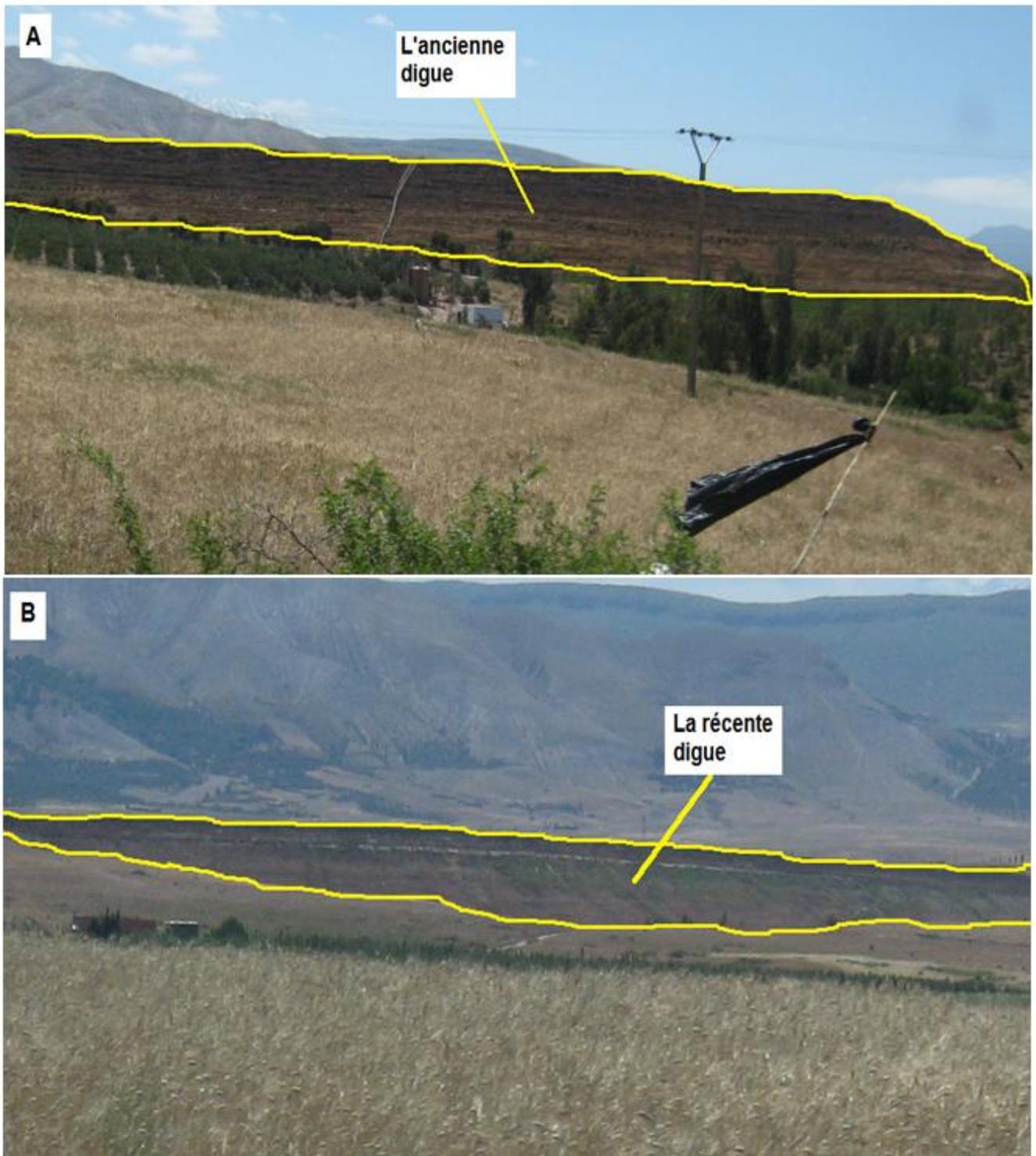


Figure 5. : Photos des deux parcs à résidus de la mine de Hajjar, prises le 29/04/2013 (A : ancien parc. B : récent parc).

b. Caractérisations des résidus solides de la mine

Selon ELADNANI, 2008, qui a étudié les caractéristiques des résidus stockés dans les deux parcs à résidus. L'étude a donné les interprétations suivantes :

- Les résultats des analyses des résidus des deux parcs à stériles sont avérés identiques.
- Les résidus sont en générale constitués avec de résidus fins.
- La conductivité électrique de ses résidus est en moyenne de l'ordre de 2.9 mS/cm, et le pH est de l'ordre de 5.07.
- Les analyses chimiques réalisés (Tableau I.) montrent la présence de plusieurs éléments chimiques avec des teneurs variable (Fe>S>Si>Al>SO4>Ca>Mg>K>Na>Mn), en plus de la présence de plusieurs éléments traces métalliques (Zn>Pb>As>Cu>Co>Cd).
- L'analyse minéralogique réalisée à l'aide de diffraction des rayons X et les observations réalisés par un microscope électronique à balayage (MEB), confirme que la pyrrhotite est la phase minérale la plus dominante dans les résidus. Suivie par la pyrite et la sphalérite comme minéralisation présente en second ordre. Par contre la galène, l'arsénopyrite et la chalcopryrite n'ont pas été détectées même s'elles sont présentes dans la minéralisation initiale. Aussi les résidus contiennent une grande proportion de quartz, de chlorite, des micas surtout les moscovites, des feldspaths surtout les albites, et en faible concentration le gypse et le rutile.

Tableau I : Minéralisation des résidus solides de la mine de Hajjar (D'après EL ADNANI, 2008).

Eléments	Teneurs dans les résidus	origine
Element chimique	Teneurs en %	
S	24.9	Sulfure de fer
SO4	1.4	L'altération des sulfures de fer
Ca	1.06	Carbonate et silicate
Mg	0.86	Carbonate et silicate
Na	0.092	Silicates et aluminosilicates
K	0.35	Silicates et aluminosilicates
Mn	0.09	Carbonate et silicate
Si	6.1	Silicates et aluminosilicates
Al	2.1	Silicates et aluminosilicates
Fe	47.8	Sulfure de fer et oxyde de fer
Ti	0.28	Rutile et ilménite
ETM	Teneurs en mg/kg	
Zn	10399	Sphalérite

Pb	2740	Galène
Cu	815	Chalcopyrite
As	1527	Arsénopyrite
Cd	20	Galène et Sphalérite
Co	309	Sphalérite

c. Aspect de protection de l'environnement au niveau de la mine

Le complexe minier qui regroupe quatre des filiales de MANAGEM (REMINEX, TECSUB, CTT et CMG) a fait l'objet de plusieurs études d'ordre environnemental. De ce fait plusieurs mécanismes de protection de l'environnement ont été effectués au niveau de la mine, afin de réduire au maximum les dangers liés à l'exploitation. L'aspect de cette protection décrit par BENKHADRA et EL ABBAOUI (2005) peut se résumer comme suit :

- La totalité des eaux résiduaires est recyclée.
- La présence d'un système de pulvérisation de l'eau permet de diminuer considérablement les poussières générées par les stations de concassage. En plus, l'ensemble du site a été entièrement plantés (presque cent vingt hectares) permettant ainsi la réduction des émanations de poussière. Dans un souci de préservation des ressources en eaux, un système d'arrosage à la goutte à goutte a été introduit sur le site, afin d'arroser les espaces verts.
- L'unité de grillage du concentré de cobalt dispose d'un électrofiltre couplé à un filtre à manche pour garantir un maximum de rétention de poussières. En aval des filtres, une colonne de lavage des gaz permet de réduire l'émission de gaz SO₂. Un dispositif d'aspiration installé sur toute l'usine permet d'éliminer toute fuite de poussière.
- La digue des arsénates a été entièrement imperméabilisée par du plastique. Un système de drainage permet de récupérer l'ensemble des eaux et de les recycler. L'ensemble de ces eaux sont récolté dans quatre bassins, d'une capacité totale de quatre hectares, permettent d'évaporer la totalité des effluents non recyclables.
- Un projet de valorisation des déchets de la mine été adopté en partenariat entre MANAGEM, l'OCP et la SONASID. Ces déchets qui sont sous forme de sulfures de fer seront transformés via une Biolixiviation en deux produits distincts : le soufre et l'oxyde de fer. Le soufre sera utilisé par l'OCP et l'oxyde de fer par la SONASID.
- Enfin, un Centre de Recherche a été accrédité par le COFRAC selon la norme EN 45001 pour l'analyse de l'eau (programme 101), permet à MANAGEM d'effectuer des contrôles des eaux de toutes ses exploitations avec un outil d'analyse fiable et reconnu.

Malgré tous les dispositifs de sécurité et de protection afin de protéger l'environnement qui entoure la mine, la digue du bassin de stockage des rejets de la mine (au niveau de l'unité industrielle de la CTT) a connu en 2002 une rupture frontale qui a provoqué une coulée de liquide très chargée en métaux lourds toxiques. La boue s'est propagée le long des affluents à écoulement sec et sur une longueur d'environ 4 Km. Les rejets déversés risquaient d'atteindre l'oued N'fis en aval du barrage Lalla Takerkoust, et par conséquent, le champ captant de l'office nationale de l'eau.

V. Cadre général de la zone d'étude

La zone d'étude se localise entre le 31°26'00'' et 31°19'00'' Nord et 8°11'00'' et 8°00'00'' Ouest (Figure 6). Cette zone était choisie en prenant en considération la répartition des points de prise d'eau destinée à l'étude de l'hydrochimie de la région.

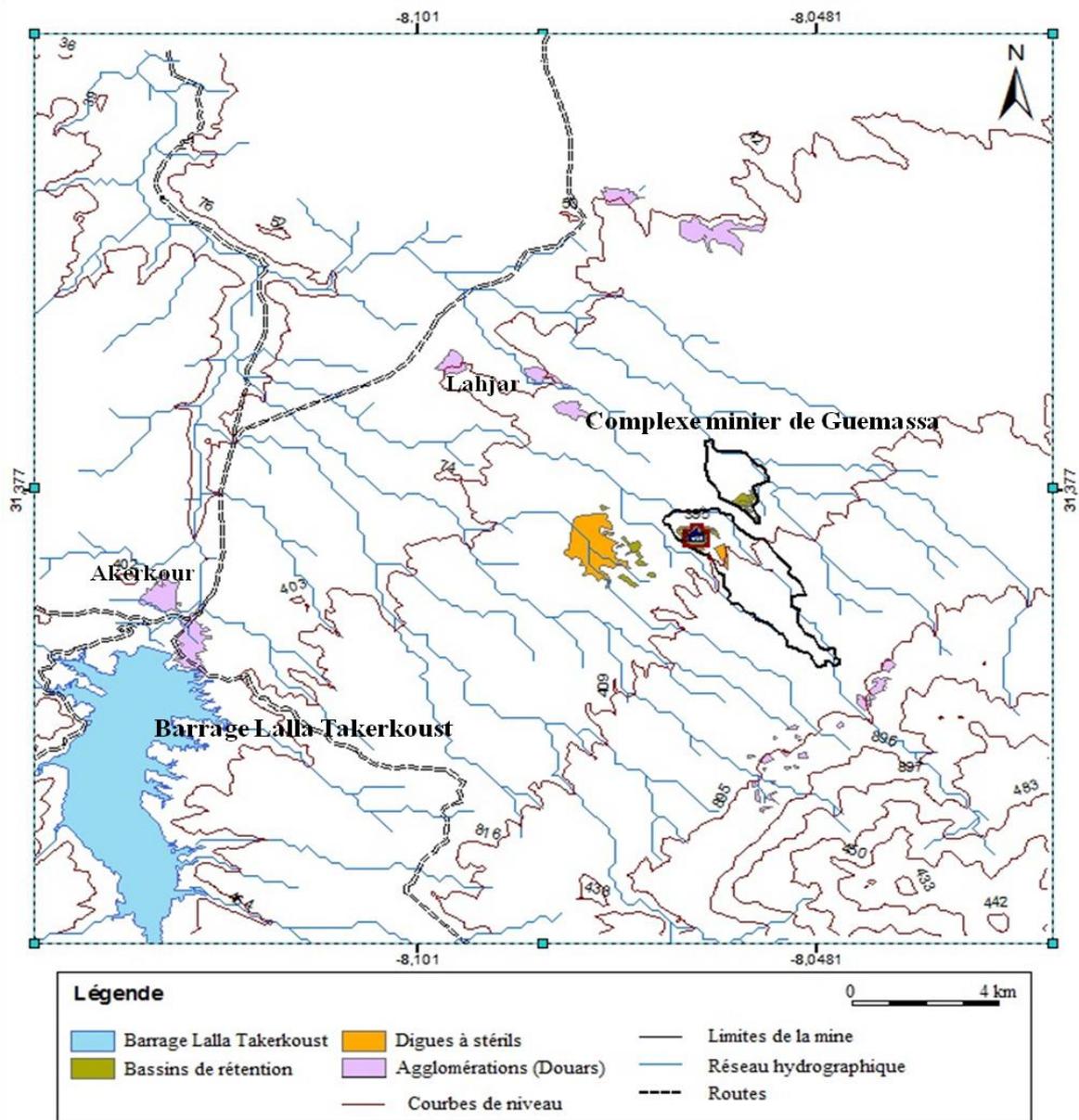


Figure 6. : Localisation de la zone d'étude.

1. Géologie de la zone d'étude

La zone d'étude, a fait l'objet de plusieurs études surtout pour le contexte géologique. Ces études sont soit des travaux miniers de la CMG, le BRGM et du ministère de l'Energie et des mines et ou bien des études académiques. (HAIMEUR, (1988 et 1998), HIBTI, (1993 ; 2001), RAQIQ, (1997) et SOULAIMANI, (1991)).

Le secteur étudié se situe à l'extrême sud de la meseta occidentale marocaine (MICHARD, 1976 et PIQUE et MICHARD, 1981). Il appartient à un bassin d'âge viséens (carbonifère) de la chaîne Hercynienne. Ce bassin viséen a connu dans son évolution géologique, une phase d'ouverture et une phase de comblement (IZART, 1990).

Les affleurements Hercyniens du massif de Guemassa, constituent le prolongement sud de ceux de la série de Sarhlef du massif de Jebilet (HIBTI, 1993). Ce massif est constitué des boutonnières d'âge Paléozoïque qui affleurent à l'intérieur de la couverture mio-pliocène et quaternaire de la plaine du Haouz. Le massif a une géométrie qui ressemble en gros à un trapèze, orienté NW-SE, et dont la surface est d'environ 480 Km² (RAQIQ, 1997), avec une longueur de 40 km (HIBTI, 1993 et 2001).

Les affleurements sont formés par des dépôts volcano-sédimentaires, globalement monotones contenant des bancs silto-gréseux, des carbonates, des schistes, et des quartzites. Avec quelques intrusions volcaniques. Toutes ses formations sont entourées par une couverture composée d'alluvions, de limons, des carbonates et des grès qui constituent les dépôts de la plaine du Haouz (RAQIQ, 1997 et HAIMEUR, 1988).

Le massif de Guemassa est subdivisé en deux domaines bien distincts (Figure 7):

- Le domaine des Guemassa au sens strict (Guemassa occidentale).
- Le domaine de N'fis (Guemassa orientale).

➤ Guemassa Occidentale

La Guemassa occidentale représente la partie nord-orientale du massif (HIBTI, 1993). Il est constitué d'un relief de socle paléozoïque continu d'une hauteur de 650 m (RAQIQ, 1997). Ce domaine est traversé par la faille médiane (la plus importante dans le massif, après celle d'Ait Khaled au Sud-est des Guemassa Orientales), allant depuis l'Est de Douar El Karia, jusqu'au Douar Guemassa à l'extrême Ouest (HIBTI, 1993).

Les plis sont globalement orientés NW-SE, et associés à une schistosité régionale de la même orientation (RAQIQ, 1997).

➤ Guemassa Orientale

RAQIQ (1997) a décrit le Guemassa orientale comme un ensemble de buttes tuffitiques (Imarine, Taourda, Akhlij, Oukhribane, Amzough) de tailles variables. Les buttes les plus importantes sont celles d'Imarine, d'une longueur de 7 Km (SOULAIMANI, 1991).

Ce domaine montre l'alternance de plusieurs formations d'âge viséen, Mio-pliocène et Quaternaire (Figure 8):

➤ **Formations d'âge viséen**

Le viséen apparaît au niveau de deux zones : Imarine et Souktana.

Le domaine d'Imarine se caractérise par la dominance des formations silto-chloritique volcano-sédimentaire et des formations schisteux gréseuses à interaction avec des calcaire et des grès carbonaté. Le sommet de ces tufs est dominé par des pyrrhotines disséminés et des calcaires.

Le massif de Souktana se caractérise par alternance de plusieurs types de formations :

- Pélites gris micacées, et noire carbonatées.
- Schistes verts à blocs (ollistolites).
- Schistes gréseux à interaction avec de calcaires bioclastiques et de lave acide (Rhyolites).
- Calcschistes.
- Schistes et quartzites avec des brèches sédimentaires.
- Schistes noirs.

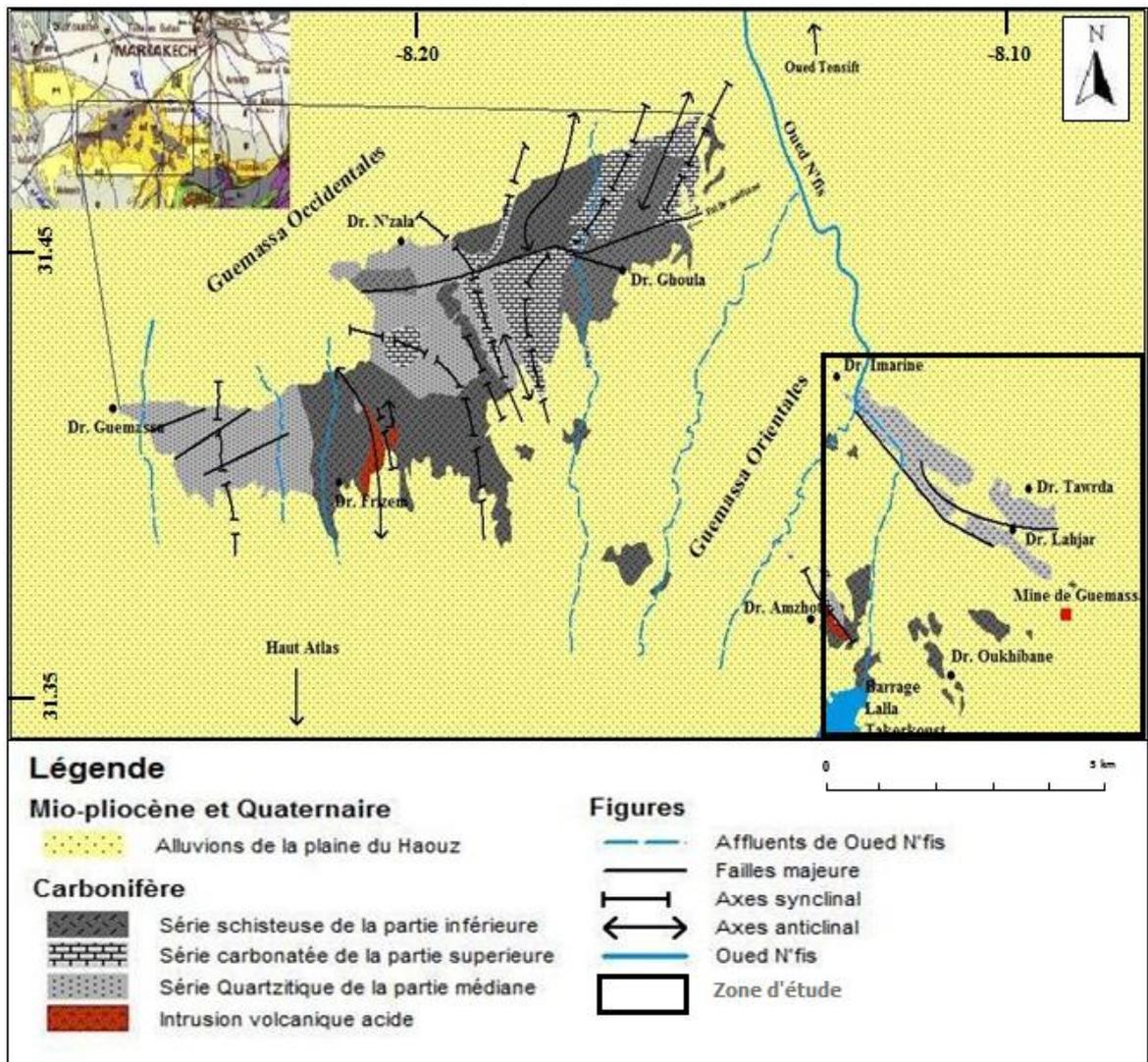


Figure 7. : Carte géologique simplifiée des Guemassa (HAIMEUR, 1988 et HATHOUTI, 1990).

➤ **Formations d'âge mio-pliocène**

Les formations mio-pliocènes sont constituées de poudingue à ciment argileux-sableux, roses ou jaunâtres, des cailloutis et des conglomérats fortement encroutés.

➤ **Formations d'âge Quaternaire**

Le Quaternaire apparaît au niveau des berges de l'oued N'fis et des affluents qui l'alimente. Il est constitué par des terrasses limoneuses, ou caillouteuses avec des encroûtements calcaires.

Le domaine des Guemassa orientales est affecté par un réseau de failles de direction globale NW-SE (RAQIQ et al. 1996). Ces failles contrôlent la déformation syn-schisteuses (plissement et schistosité des Guemassa orientales). Mais il existe d'autres familles de failles postérieures à celles-ci, de direction subméridienne à NE. Ces dernières sont fréquentes et dispersées sous forme de mini graben d'échelle centimétrique à métrique (RAQIQ, 1997). C'est dans ce domaine où se situe la mine de Guemassa.

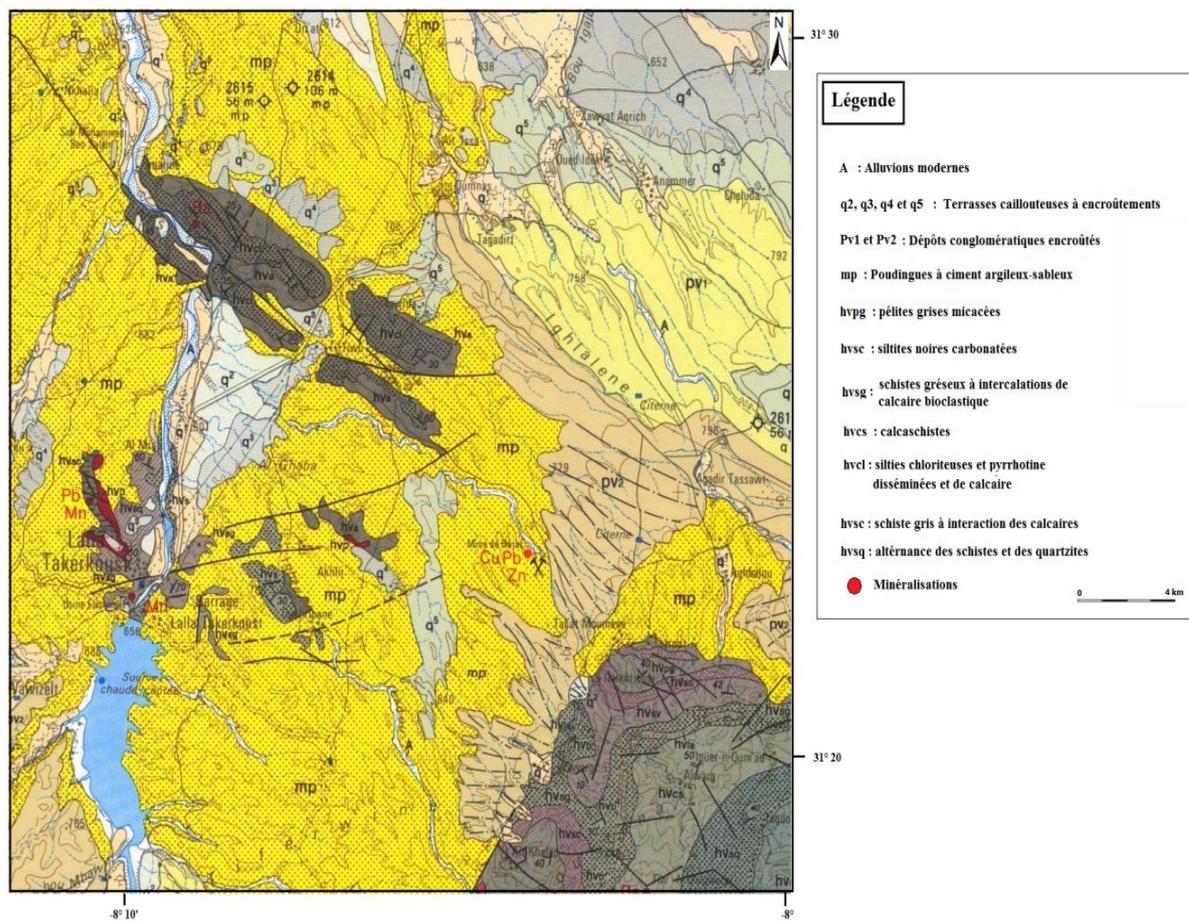


Figure 8. : Carte géologique détaillée de la zone d'étude (D'après carte géologique d'Amez Miz 1/100000).

2. Hydrologie et climatologie de la zone d'étude

Située au piémont de la chaîne du Haute Atlas, la zone d'étude connaît un climat aride avec la rareté des ressources en eau.

a. Hydrologie

La mine de Hajjar se situe entre deux affluents de l'Oued Tensift, à savoir : Oued N'fis et Oued Righaya. Mais puisque les écoulements de surface venant de la mine, verse à Oued N'fis, la présente étude sera focalisé sur ce dernier.

L'Oued N'fis est l'Oued le plus long et le plus important des affluents de Tensift, sa longueur est de 152 km. Le bassin versant de cet affluent à un périmètre de l'ordre de 315 km, est le plus grand en surface (1709.82 Km²). Il est un oued qui draine les plus forts apports en débit d'eau : 5.25 m³/s comme débit moyen mensuel enregistré à la station du Barrage Lalla Takerkoust (ABHT, 2010).

Malgré l'importance que constitue ce lac artificiel, les ressources en eau dans la région aval du barrage reste limite. A cause de l'irrégularité des volumes d'eau lâchés au niveau du barrage, qui dépend des apports du l'oued et de l'importance des précipitations au niveau du bassin versant.

Le complexe industriel de Guemassa se situe à la rive droite aval de l'Oued. Le site minier connaît le drainage de plusieurs affluents (petite branche desséchée d'un Oued), qui alimentent en saison pluvieuse l'aval de N'fis (Figure 9). A cause de la rareté des précipitations durant cette année (2013), toutes les Affluents ont été à sèches. Une seule Affluent avait connu une faible alimentation grâce à une source d'eau naturelle. C'est cet affluent qui représentera relativement les eaux de surface dans la partie hydrochimie de la présente étude.

b. Climatologie

La mine de Hajjar se situe à proximité de la station climatique du barrage Lalla Takerkoust. Cette station fournit quotidiennement les valeurs mesurées des : précipitations, de la température, de la vitesse du vent et de l'évaporation.

- Précipitations et Température :

D'après l'analyse d'une série de données qui s'étalent sur 38 ans (de 1972 à 2010), les précipitations moyennes mensuelles sont comprises entre 85 mm et 1270 mm. Ces précipitations sont importantes depuis le mois d'Octobre à Avril. Les autres mois de l'année montrent des précipitations faibles. Le mois Juillet est le mois le plus sec de l'année (avec une moyenne de 85 mm). Le mois le plus pluvieux de l'année est le mois d'Avril (avec une moyenne de 1270 mm). Par contre le mois de Décembre montre une valeur faible par rapport à Novembre et à Janvier (Décembre 798 mm, Novembre 1023 mm et Janvier 1080 mm). En gros, cette station enregistre une moyenne annuelle de l'ordre de 234 mm/ an.

Pour les températures enregistrées au niveau du barrage Lalla Takerkoust, elles sont cernées entre 11.5 °C et 28 °C. Le mois le plus froid est le mois de Janvier avec une moyenne de 1.2 °C. Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec une moyenne de 33.5 °C. La moyenne annuelle est de 19 °C. Sachant que la plus basse température jamais enregistrée au niveau de la station, était de -7.4 °C (en Janvier 1990), et la plus élevée était de 50 °C (en Juillet 2012).

On peut dire donc, que durant l'année on a deux saisons bien distinctes (Figure 10):

- Une saison pluvieuse et froide qui s'étend de Novembre à Avril.
- Une saison sèche et chaude qui s'étend de Mai à Octobre.

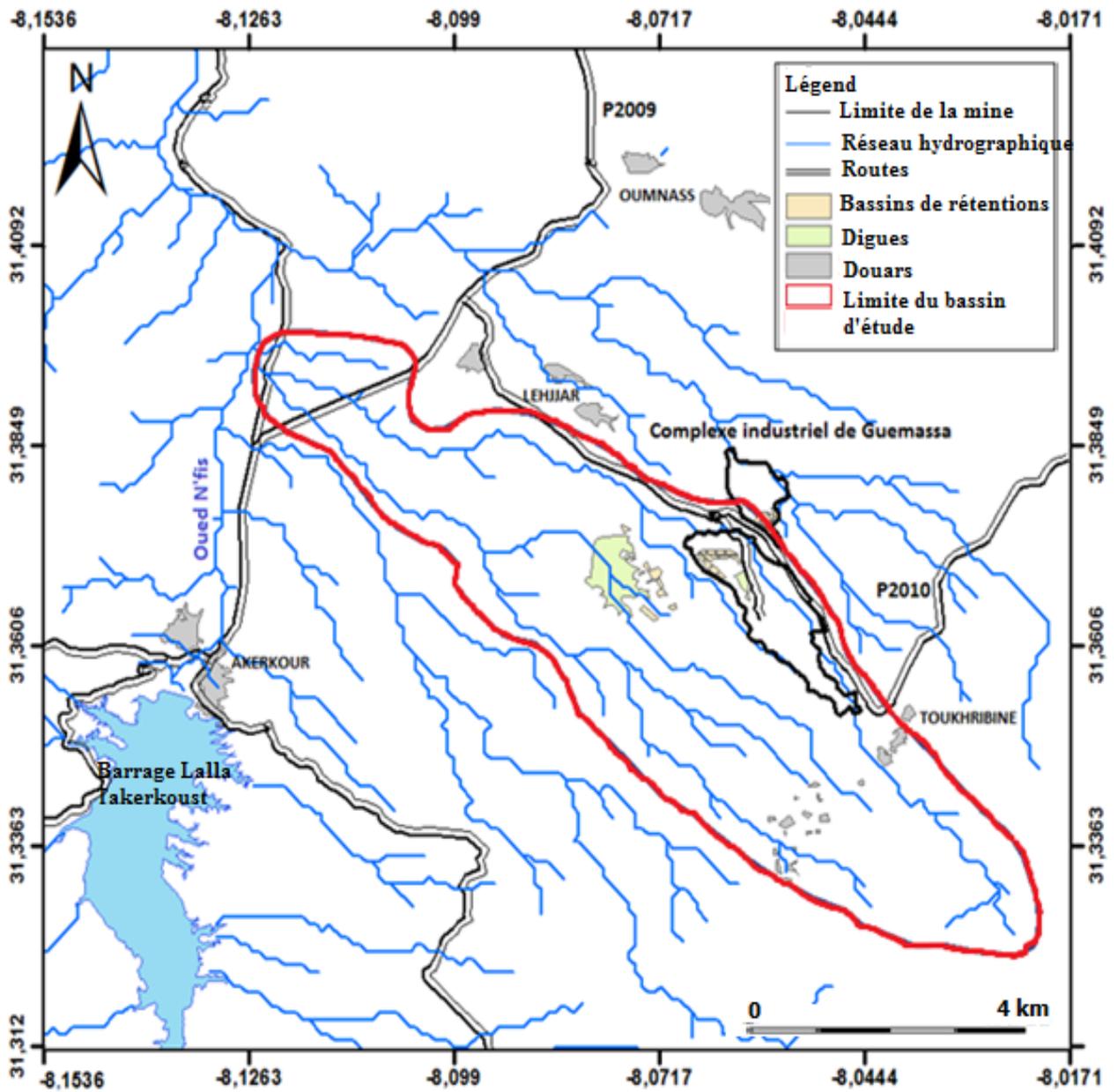


Figure 9. : Situation de la mine de Hajjar sur Oued N'fis et les limites des affluents qui la jalonnent.

Afin de connaître le type de climat, on calculera l'indice d'aridité de De Martonne (ROGER, 1996), qui se calcul comme suite :

$$I = P \text{ moy (mm)} / (T \text{ moy. Mensuelle (}^{\circ}\text{C)} + 10)$$

Avec :

- I < 10 : le climat est aride.
- 10 < I < 20 : le climat est semi-aride.
- 20 < I < 50 : le climat est froid, tempéré ou tropical.
- I > 50 : le climat est équatoriale ou montagnard.

L'indice d'aridité de De Martonne de la zone d'étude est de 8,07. Donc le climat qui règne dans la région est un climat aride chaud, avec l'alternance de deux saisons, une froide et une autre sèche.

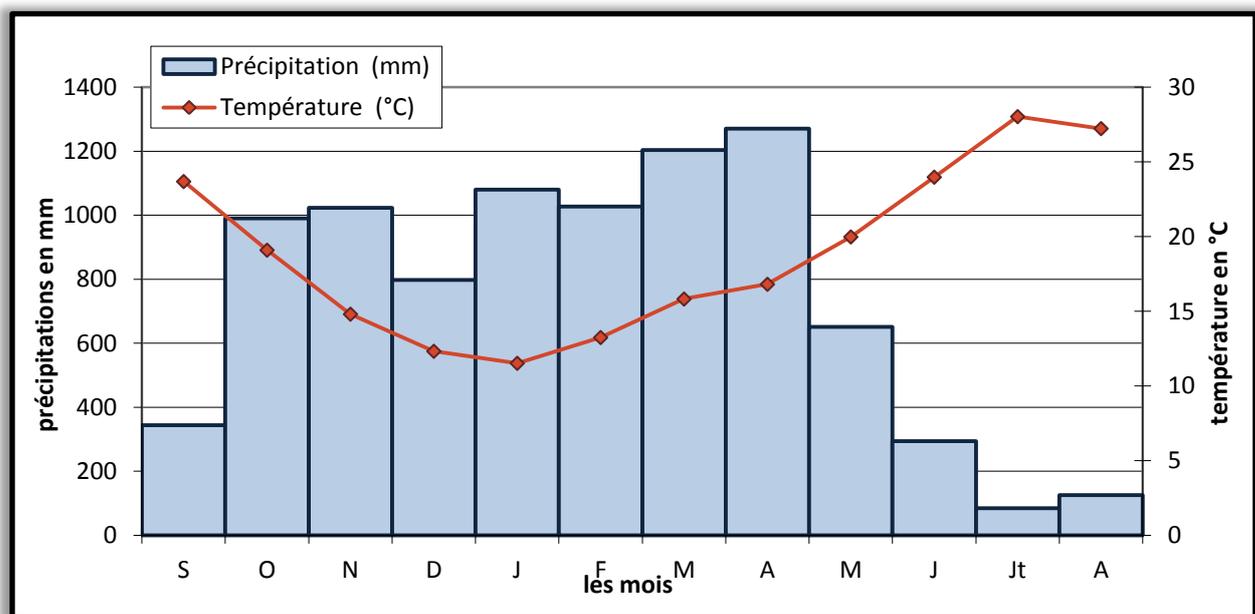


Figure 10. : Température et précipitations mensuelles de la station Lalla Takerkoust.

- Evaporation et vitesse du vent :

L'évaporation moyenne annuelle au niveau du barrage est estimée à 1383 mm. Cette valeur est importante, due à l'aridité du climat en période estivale et à la disponibilité d'une importante masse d'eau à évaporer (barrage Lalla Takerkoust).

Le vent à une vitesse comprise entre 0.8 à 1.8 m/s, avec une moyenne de 1.2 m/s. Cette vitesse varie d'un mois à l'autre. La vitesse maximale est enregistrée au mois de Juillet et la plus faible au mois de Janvier (Figure 11). Elle sera probablement liée à la différence de pression atmosphérique entre la chaîne montagneuse du Haut Atlas et la plaine du Haouz.

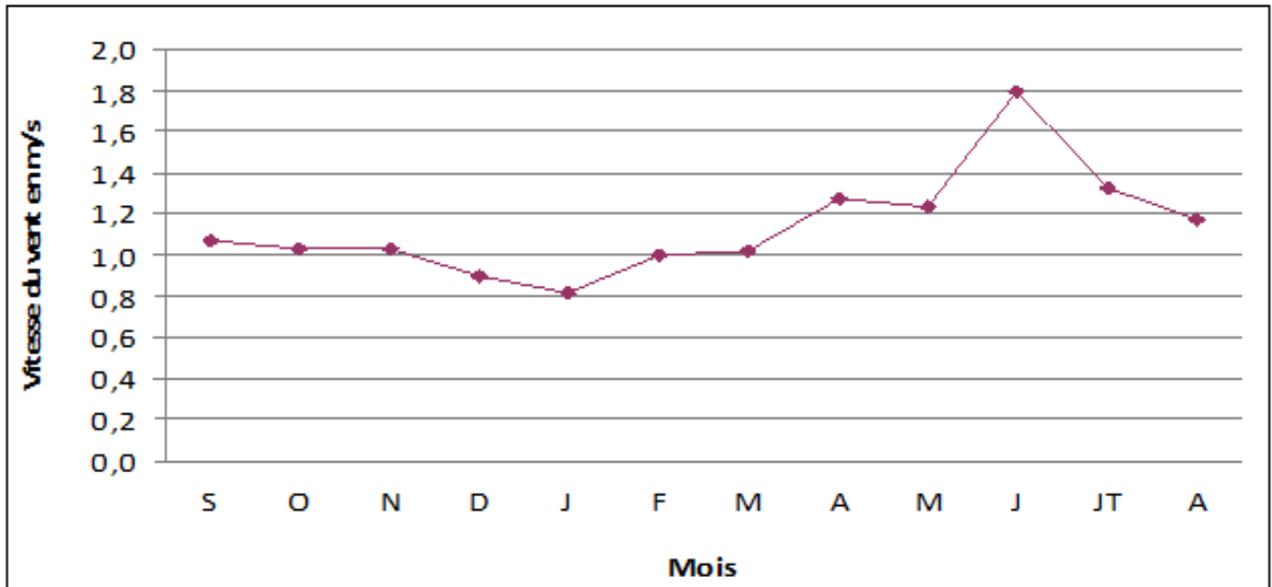


Figure 11. : Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station de Lalla Takerkoust.

3. Caractéristiques humaines et infrastructures

La région des Guemassa orientales (domaine de N'fis), abrite plusieurs villages qui entourent la mine comme : village Imarine, Oumnass, Tawerda, Tiwli, Lahjar, Lamrah, Oukhribane et Akhlij (Figure 12).

Ces villageois vivent essentiellement de l'agriculture et du pâturage. Mais à cause du climat chaud et sec de la région, la majorité des terres cultivées est localisée à proximité de l'oued N'fis (lit majeur de l'oued) et ses affluents (HIBTI, 1993). Même si plusieurs villages se vident de leurs habitants à cause de la rareté des ressources en eaux (RAQIQ, 1997).

La région est reliée à la ville de Marrakech par la route provinciale P2009 (ancienne S 507). Cette route relie Marrakech à Amez Miz en passant tout près d'Oumnas et Tiwli. En arrivant au 29^{ème} km, on trouve l'embranchement de la P 2010. Cette dernière route amène vers la mine de Hajjar en passant par Douar Lahjar. Pour accéder aux autres villages, il existe des pistes carrossables ou en mauvais état.

A part le complexe industriel de Guemassa, le barrage Lala Takerkoust constitue un important pôle industriel dans la région, grâce à la production de l'électricité estimée à 15 millions de kwh (portrait du département d'eau, 2013). Ce barrage de type poids fut construit entre 1929 et 1935. Il a été surélevé entre 1978 et 1980 de 9 m. Le barrage à une capacité de stockage de 85000 m³. Il contribue au développement du secteur agricole surtout au niveau du périmètre irrigué de N'fis, avec une superficie de 9800 ha irrigables par les eaux stockées dans sa retenue (ABHT, 2010).

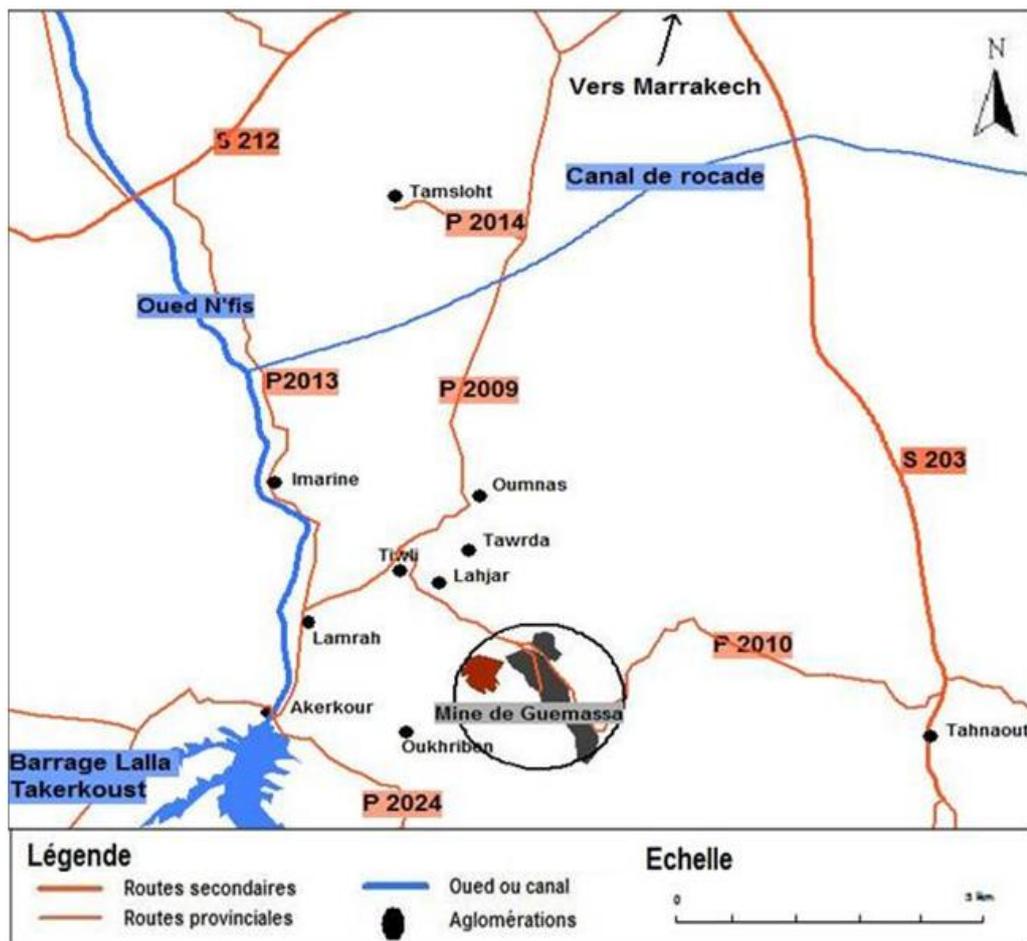


Figure 12. : Routes et villages qui jalonnent la mine de Guemassa.

Le complexe industriel de Guemassa est une zone industrielle d'une grande importance économique pour la région du Haouz. La mine de Hajjar exploite le minerai polymétallique de Hajjar. La zone de la présente étude constitue le voisinage de la mine. Elle est formée essentiellement de roches sédimentaire du mio-pliocène et du quaternaire. Le climat de la région est aride. L'oued N'fis et ses affluents avals, constitue les seuls ressources en eau de surface pour plusieurs village de la zone.

B- TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES SATELLITAIRES ET INDICES DE MINERALISATION DANS LA ZONE D'ETUDE

Afin d'extraire certain indices nécessaires à la présente étude, le traitement de deux types d'images satellitaires était nécessaire. Dans la présente partie, l'étape d'extraction des indices sera précédée par un bref rappel sur la télédétection, les types des capteurs et les caractéristiques des images satellitaires utilisées.

I. Généralité sur la télédétection spatiale et les images satellitaires

Dans la présente partie, l'étude de la zone par la télédétection sera limitée au traitement des images satellitaires. Dans le but de ressortir les indices de minéralisation les plus importants (indice de soufre), afin de connaitre l'origine probable du soufre dans les terrains avoisinants la mine.

1. Principe de la télédétection

La télédétection spatiale (*Remote sensing*) est une science récente qui permet d'obtenir plusieurs informations sur la surface de la terre à distance, à l'aide des images. Cette technique regroupe toutes les méthodes et les applications qui consistent à capter et à enregistrer l'énergie émise ou réfléchie d'un rayonnement électromagnétique (BOUDHAR, 2009).

Cette science nouvelle est devenue un moyen fiable de la connaissance, le contrôle, la gestion, l'aménagement du territoire et la prédiction des risques dans les sciences de l'environnement. Cela est dû à son coût qui est relativement faible, à l'importante dimension spatiale qu'elle peut couvrir (qui peut englober tout la planète terre), et à la pertinence des données fournis (AMRANI, 2007).

Le principe de la télédétection spatiale est simple (Figure 13). Il fait appel à trois éléments essentiels à savoir : la source d'énergie (1), la cible (3) et les vecteurs (2). Tout d'abord la source d'énergie (qui est souvent le soleil), émet une onde électromagnétique qu'éclaire la cible. Cette dernière réfléchit l'onde captée. La réflexion de cette onde dépend des propriétés de réflexion, d'absorption et de transmission des éléments présents à la surface (particules des sols, organes de la végétation, cristaux de neige, molécule d'eau, etc.), ainsi que de leurs agencements (densité, structure et géométrie). Le captage s'effectue grâce à des capteurs placés au niveau des satellites. L'onde captée sera par la suite transmise à un centre ou station de réception, afin de la traiter (BOUDHAR, 2009).

Généralement, Il existe deux types de télédétection :

- La télédétection passive qui utilise le soleil comme source d'énergie.
- La télédétection active où les satellites contiennent des capteurs/émetteurs, qui jouent à la fois le rôle de sources d'énergie et les capteurs.

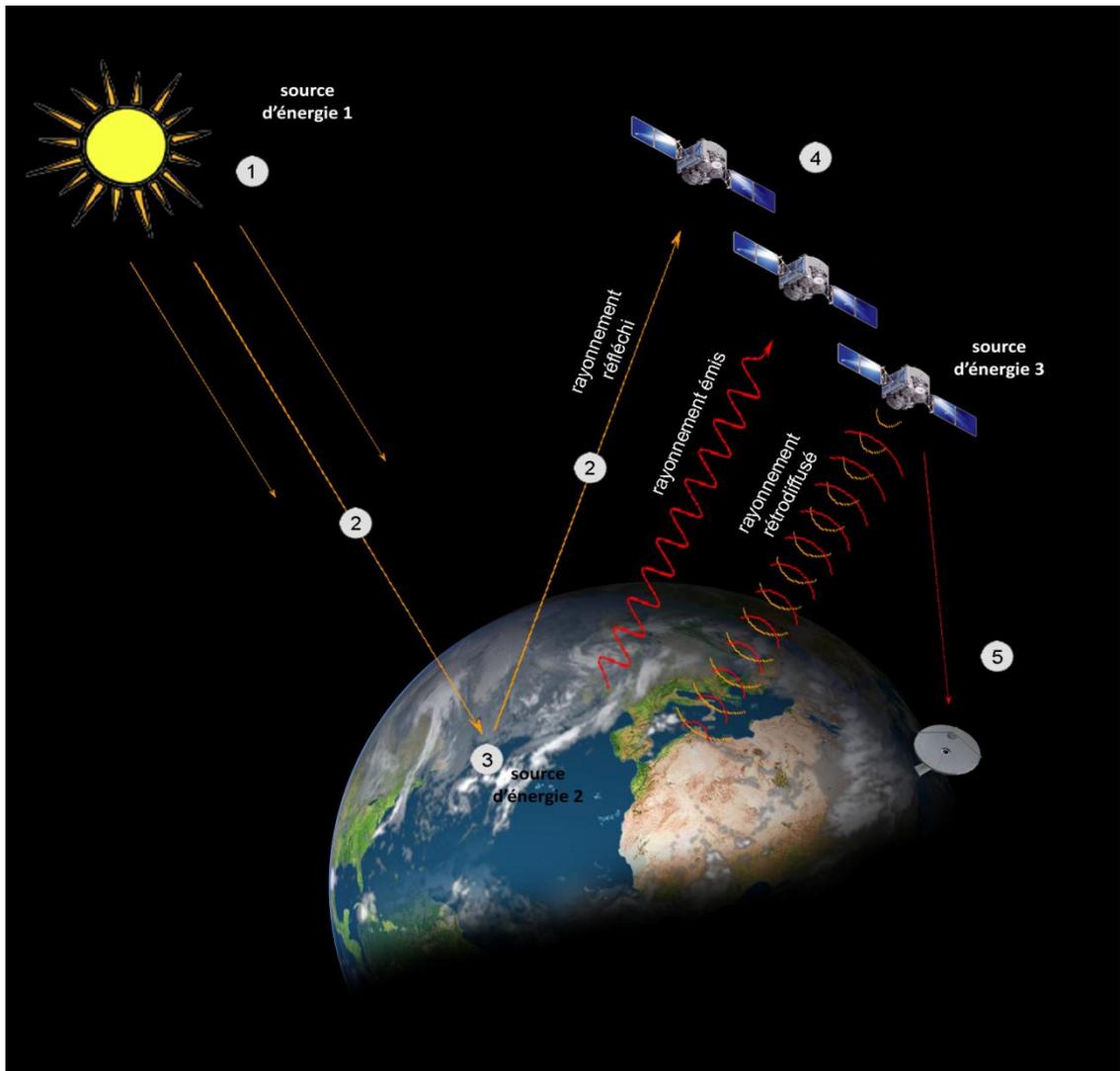


Figure 13. : Schéma expliquant les étapes de la télédétection.

2. Différents types des capteurs et caractéristiques des images satellitaires

Le rôle des capteurs est l'enregistrement d'une manière sélective le rayonnement correspondant à une longueur d'onde bien spécifique. La plus petite surface qui peut être enregistrée est le pixel dont le diamètre varie d'un capteur à l'autre. Chaque pixel émet un niveau d'énergie en fonction des propriétés des éléments qui le constituent. L'ensemble de ces pixels constitue l'image satellitaire (ABOURIDA, 2007). Actuellement, il existe plusieurs capteurs spatial, dont les plus important sont : capteur TM porté par le satellite LANDSAT 5 et capteur ASTER porté par le satellite TERRA. Les images issues de ces deux capteurs feront objet de la présente étude.

a. Capteur TM de LANDSAT 5

TM est un radiomètre américain (instrument qui permet de mesurer l'intensité du flux de rayonnement électromagnétique, dans différents domaines de longueurs d'onde), lancé le 01/03/1985, dans le cadre d'un programme civil d'observation de la Terre par satellite réalisé par la NASA et USGS. Le capteur TM (*Thematic Mapper*) détecte l'énergie solaire réfléchie sur le sol ainsi

que l'énergie thermique de la Terre sur sept bandes du spectre électromagnétique (Tableau II). Il permet ainsi d'identifier une vaste gamme d'éléments de la couverture terrestre avec une résolution de 30×30 m et d'une prise de vue de 185×185 km.

Tableau II : Caractéristiques des bandes du capteur TM et leur application.

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
TM 5	1,55 - 1,75 (IR de courte longueur d'onde)	sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
TM 7	2,08 - 2,35 (IR de courte longueur d'onde)	discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation

b. Capteur ASTER de TERRA

Le capteur ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) est un capteur imageur multi-bande à bord du satellite TERRA, lancé dans le ciel depuis décembre 1999. Ce capteur couvre une large région spectrale avec 14 bandes couvrant : le visible, l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique. Une bande de l'infrarouge proche supplémentaire fournit la couverture stéréoscopique. La résolution spatiale varie avec la longueur d'onde : 15 m dans le visible et l'infrarouge proche (*VNIR-Visible and NearInfrared*), 30 m dans l'infrarouge à ondes courtes (*SWIR-*

Short- WaveInfrared) et 90 m dans l'infrarouge thermique (*TIR-Thermal Infrared*). Chaque image couvre une superficie de 60 x 60 km (Tableau III.)

Tableau III : Différentes composantes des bandes du capteur ASTER.

Caractéristique	VNIR	SWIR	TIR
Gamme spectrale	Band 1: de 0,52 à 0,60 μm	Band 4: 1,600 à 1,700 μm	Band 10: 8,125 à 8,475 μm
	Band 2: de 0,63 à 0,69 μm	Band 5: 2,145 à 2,185 μm	Band 11: 8,475 à 8,825 μm
	Band 3: de 0,76 à 0,86 μm	Band 6: 2,185 à 2,225 μm	Band 12: 8,925 à 9,275 μm
	Band 3: de 0,76 à 0,86 μm	Band 7: 2,235 à 2,285 μm	Band 13: de 10,25 à 10,95 μm
		Band 8: 2,295 à 2,365 μm	Band 14: de 10,95 à 11,65 μm
		Band 9: 2,360 à 2,430 μm	
Résolution au sol	15 m	30m	90m

3. Rayonnement et spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est une énergie transportée dans l'espace sous forme d'ondes (POUCHIN, 2001). Il se caractérise par sa direction de propagation, son intensité, sa fréquence, sa polarisation et sa phase.

Par contre le spectre électromagnétique, représentation de l'ensemble des composantes monochromatiques d'un rayonnement électromagnétique en fonction de l'énergie associée à chaque composante (Figure 14), ou d'une autre grandeur directement liée à l'énergie telle que la fréquence ou la longueur d'onde. Il s'étend théoriquement de zéro à l'infini en fréquence (ou en longueur d'onde), d'une façon continue.

Le rayonnement électromagnétique ne constitue qu'une partie du spectre électromagnétique. La télédétection utilise plusieurs gammes du spectre électromagnétique : l'ultra-violet, le visible, l'infrarouge, etc.

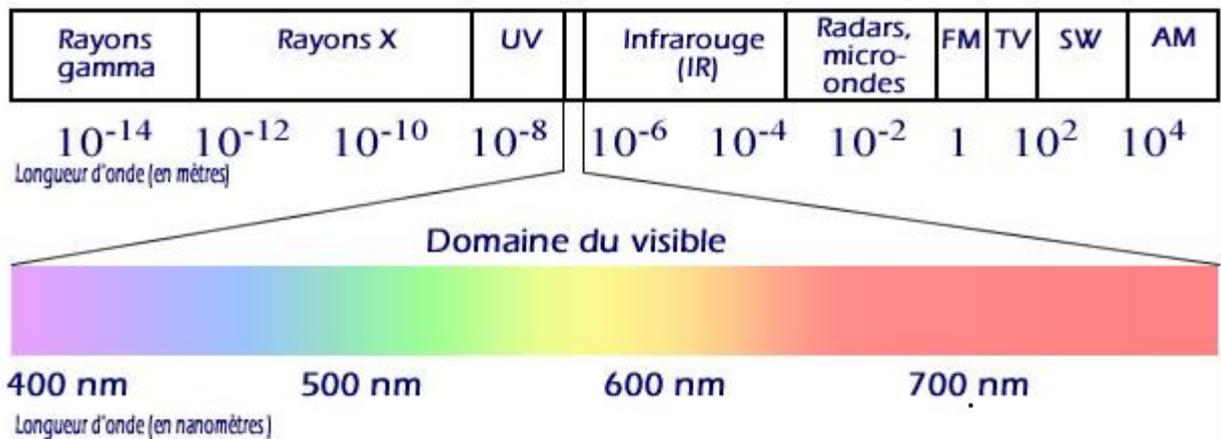


Figure 14. : Spectre électromagnétique et domaine du visible.

4. Les images satellitaires

a. Notions d'image numérique

Une image est la projection plane d'une scène tridimensionnelle sur un support physique capable de restituer les valeurs de luminance en chacun de ses points (PUN, 1982). Une image numérique correspond donc à un tableau ou une matrice bidimensionnelle. La taille de l'image est définie par le nombre de lignes et de colonnes qui constituent cette matrice (nombre des lignes x nombre des colonnes). Chaque pixel appartenant à cette matrice, correspond à une valeur comprise entre 0 et 255 (8 bits).

L'image satellitaire est souvent multi-spectrale ou multi-bande. Il y a donc un fichier image par bande. Une bande correspond à un intervalle de longueur d'onde (λ) dans le spectre électromagnétique.

b. Contenu de l'image satellitaire

L'image selon la description d'EL HARTI, (2005) est une mesure relative de la luminance exprimée par des niveaux de gris dans le cas d'une image analogique, et par des nombres généralement compris entre 0 et 255 dans celui d'une image numérique. A ce contenu thématique de luminance s'ajoute celui de son positionnement dans la dimension spatiale de la réalité qui est le géo-référencement.

C'est à partir de ce double contenu informatif de l'image, que tout le processus d'interprétation et de production de l'information sera établi. Par contre, deux niveaux peuvent être distingués dans l'exploitation de l'image : un premier niveau simple, dans lequel n'intervient que l'information interne de l'image (la luminance), le deuxième niveau intègre les connaissances et les expériences apportées par l'interprète ou par le spécialiste. Une des sources principales d'information est donc externe à l'image. Ainsi, l'interprète possède dans son esprit de nombreuses connaissances au sujet de sa discipline qui lui permettent, à partir d'un indice apparemment mineur, de dégager la dynamique d'un phénomène complexe (comme c'est le cas de la présente étude).

En plus du double contenu informatique des images, les images numériques issues de la télédétection, contiennent des informations spécifiques à chaque image captée, qui sont les métadonnées ou méta-informations de l'image, ces informations sont relatives aux résolutions spatiale et spectrale, à l'orbite de l'image et à la date de prise de vue de l'image.

II. Traitement des images satellitaires

1. Caractéristiques des images satellitaires étudiées

Les images qui seront traitées afin d'en tirer les différents indices de minéralisation, proviennent des deux capteurs décrits auparavant. La première est une image du TM et la deuxième est une image d'ASTER.

L'image du TM est présentée en sept bandes, représentent une scène de 185×185 Km et une résolution de 30×30 m par pixel. Cette scène qui présente le bassin versant de Tensift, sera découpée et traitée par le logiciel ERDAS IMAGINE 9.2. L'image découpée est représentée dans la figure 15, avec un composé coloré (743) assignée respectivement au rouge, vert et bleu.

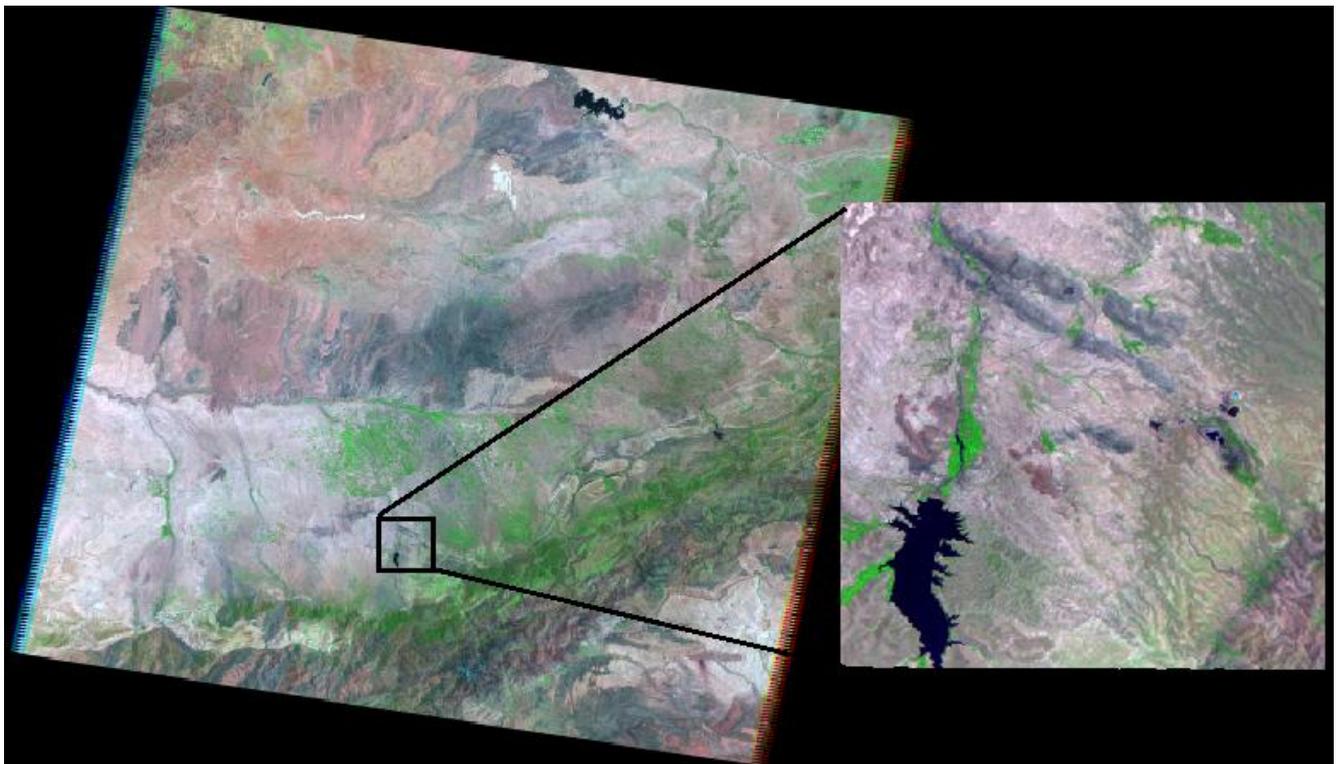


Figure 15. : Capture de l'image TM et de la zone d'étude.

L'image ASTER se présente en 14 bandes avec des résolutions différentes :

- De la bande 1 à la bande 3 la résolution est de 15 m, ces images sont prises dans le visible et l'infrarouge proche (VNIR).

- De la bande 4 à la bande 9 la résolution de l'image est de 30m. ils sont pris dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR).
- De la bande 10 à 14 la résolution de l'image sont de 90 m. Ils sont prises dans l'infrarouge thermique (TIR).

L'ensemble de ces images présentent une scène de 60×60 Km (Figure 15), avec un composé coloré (432) assigné respectivement au rouge, vert et bleu.

La date de prise des images selon leurs métadonnées sont : 08/06/2002 pour la TM et 02/08/2002 pour l'ASTER.



Figure 16. : Capture de l'image ASTER et de la zone d'étude.

2. Re-échantillonnage et re-projection des images

L'image satellitaire issue du capteur ASTER, est une image brute. Elle contient uniquement la projection WGS 84. En plus les valeurs du pixel de chaque bande sont différentes, donc il est impossible de les superposer. Il est donc nécessaire de faire un ré-échantillonnage de cette image. Cette opération avait pour objectif de faire une opération qui va réduire tous les pixels constituant les bandes de l'image à une résolution identique. La résolution adaptée est 15×15 m, qui est la résolution des bandes VNIR.

L'image TM a été au préalable ré-échantillonné lors d'une séance de travaux pratiques. Il lui suffit tout simplement de changer le système de projection du Lambert conique conforme à WGS 84.

Le système de projection affecté aux images et aux différentes cartes réalisées au niveau de ce mémoire est UTM (*Universal Transverse Mercator*), qui a un *Datum* de référence WGS 84 (*World Geodetic System 1984*). Le choix de cette projection comme système de référence est basé sur le fait que ce système est simple, pratique et conforme au mode de fonctionnement de l'appareil GPS (*Global Positioning System*), surtout que ce système donne moins d'erreur en projection des points d'échantillonnage que les autres systèmes.

3. Extraction des indices de minéralisation

Les indices de minéralisation sont les indices utilisables pour l'étude thématique de la minéralisation naturelle ou artificielle d'une portion d'un terrain donné. L'extraction des indices consiste en la réalisation à l'aide d'un logiciel de traitement des images satellitaires (ERDAS 9.2), différentes opérations mathématiques au niveau des pixels de chaque bande.

L'importance de l'utilisation des indices dépend des objectifs d'études. Dans notre cas l'utilisation des indices aura pour principal objectif l'extraction, l'identification et la cartographie de la minéralisation en soufre afin de faire le lien entre la minéralisation sur le terrain et le comportement hydro-chimique des eaux.

Les indices décrits dans la littérature sont nombreux et changent selon les types des images satellitaires utilisées. Dans la présente étude on se limitera à l'extraction de deux indices (soufre et NDVI) et de la carte de linéament.

L'extraction de l'indice de soufre a pour but d'identifier les zones qui contiennent un enrichissement en cet élément sous ces différentes formes, surtout que les minerais exploités sont principalement des sulfures. Les différentes formes chimiques du soufre susceptible d'être présentes dans la zone sont : soufre natif (S), sulfures (PbS, ZnS, FeS, FeS₂ et CuFeS₂) et sulfates (SO₄²⁻).

L'extraction de la carte d'occupation du sol par un indice préétabli par le logiciel ERDAS a pour objectif la visualisation de l'abondance de la couverture végétale dans la zone d'étude, afin d'en déduire les zones vulnérables à la contamination. L'indice extrait pour cette opération est l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

La carte des linéaments, a un rôle dans la détermination des zones susceptibles de connaître une infiltration de l'eau chargée en éléments chimiques.

a. Indice de végétation (NDVI)

NDVI est un indice prédéfini dans le logiciel ERDAS, il permet de mettre en évidence la végétation chlorophyllienne. L'intensité de cet indice dépend de la richesse en végétaux dans la zone d'étude. Il est appliqué sur l'image TM et défini par le rapport de la différence entre les reflectances de surface dans les domaines proche infrarouge et le rouge sur la somme de celles-ci (ROUSE et *al.*, 1974 et

JACKSON, 1983 in ER-RAKI, 2007). Dans notre cas le ratio utilisé est (Bande 4 – Bande 3) / (Bande 4 + Bande 3).

La figure 17 représentant l'NDVI en gamme de gris. Elle montre que la végétation la plus intense (représentée en couleur blanche et en gris clair) est localisée sur le lit du l'oued N'fis, aux alentours barrage, sur les haldes et au voisinage de la mine. Apparition de la végétation dans ces zones est due à la disponibilité des ressources en eaux. Les environs de la mine de Hajjar connaissent une fixation des rejets par les plantes, d'où l'intensité de la couverture végétale dans le site.

Par contre, la majeure partie des terres de la zone d'étude qui apparaissent en couleurs noire, et gris foncé sont des terres vides de toutes végétations. Ces terres constituent la proportion des terrains les plus abondants dans la zone d'étude.

Les restes des terrains représentés en dégradé de gris (entre gris foncé et clair), sont des terrains qui connaissent une végétation restreinte et plutôt défavorable par rapport à celle représenté en blanc et en nuance de gris clair.

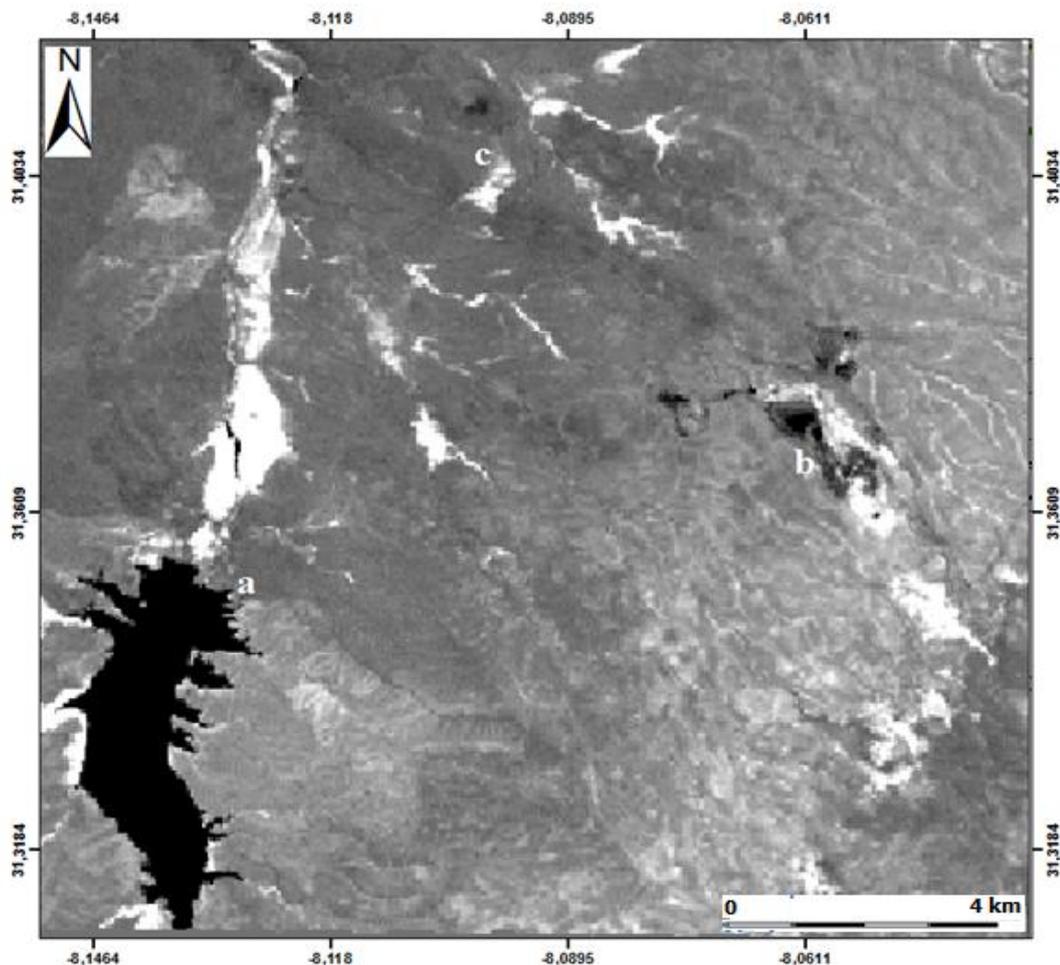


Figure 17. : Résultat de l'application de NDVI en niveau de gris (a : Barrage Lalla Takerkoust, b : complexe industriel de Guemassa, c : Tufs d'Imarine).

Afin de mieux visualiser l'occupation du sol dans la zone, l'image satellitaire fut traitée par le logiciel de SIG : ARCGIS. Le résultat obtenu est présenté dans la figure 18.

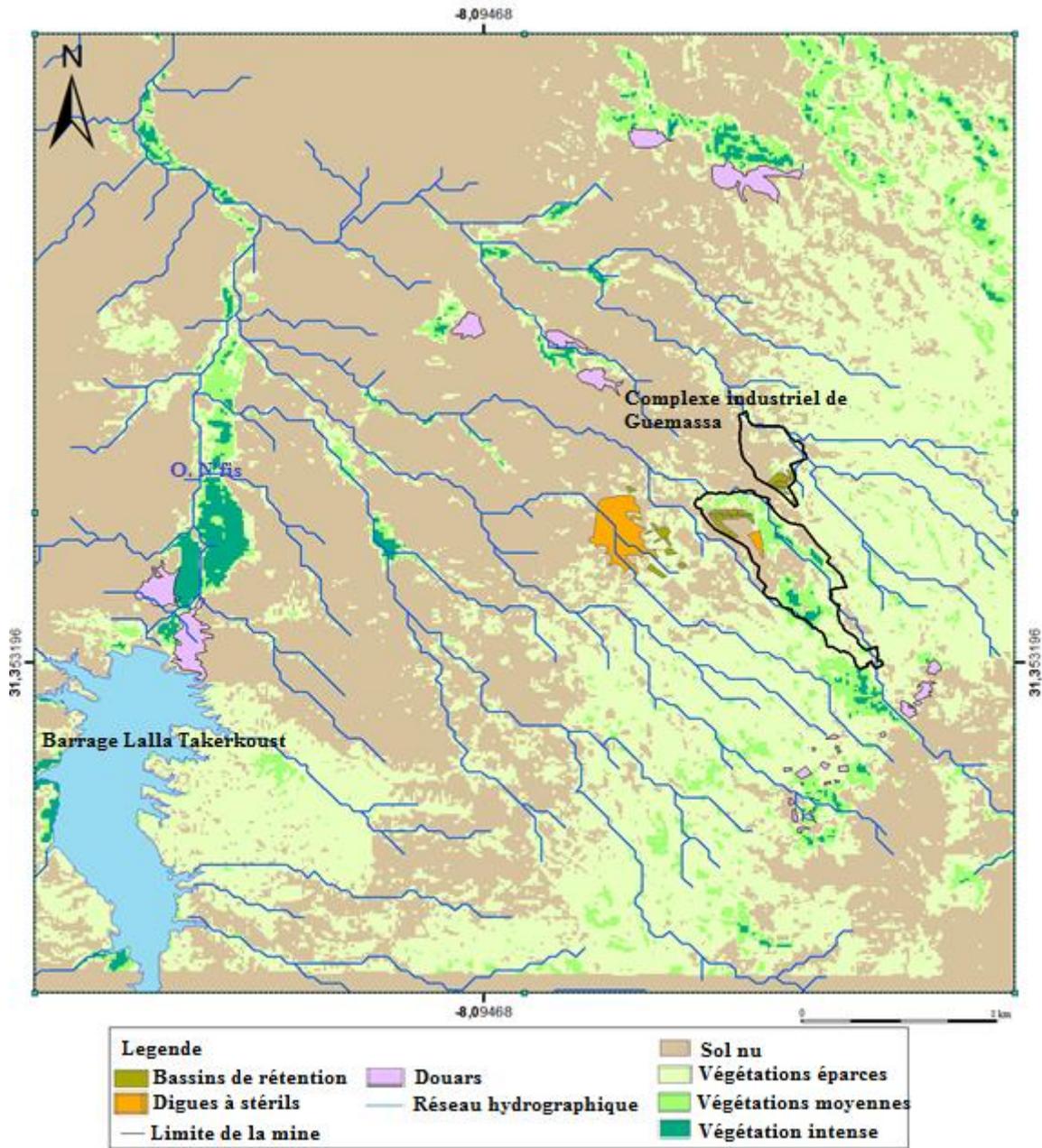


Figure 18. : Cartographie de l'indice de végétation NDVI sur la carte de la zone.

b. Extraction de la carte des linéaments

L'extraction des linéaments, consiste à fournir une image permettant la discrimination de toutes lignes droites présentes sur le terrain telles que les failles, les fractures, les falaises et les zones de contacts entre les formations. Les lignes extraites sont souvent comparées au réseau de faille et de fracturations représentés sur la carte géologique ou la carte structurale de la zone d'étude. Parfois la comparaison peut aussi être effectuée sur terrain.

L'objectif de cette comparaison est d'éliminer toutes les lignes qui se montrent comme étant des failles ou des fractures mais qui ne le sont pas.

L'extraction des linéaments à partir de la carte TM de la zone (figure 19), montrent un terrain très accidentés avec l'abondance de plusieurs familles de linéaments, surtout dans la zone sud et dans la zone nord occidentale.

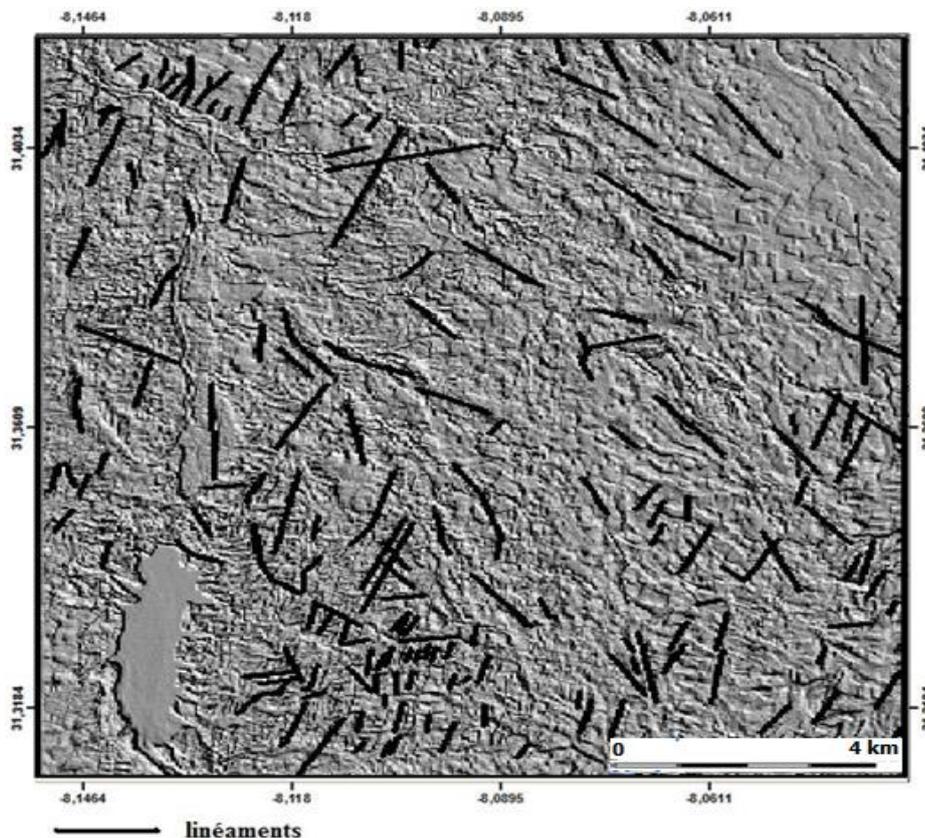


Figure 19. : Différentes familles des linéaments de la zone d'étude.

Pour connaître l'orientation de ce réseau de linéament, une rosace directionnelle été établie (figure 20). La direction préférentielle dominante représentant 52 % des linéaments à une orientation NNE-SSW.

Dans la littérature, la région de Guemassa orientales est connue par un jeu de failles de direction globale NW-SE. Mais postérieurement à la fracturation globale, RAQIQ, (1997), a décrit que la schistosité dans la zone est contrôlée par une famille des fracturations postérieurs à la première. L'orientation de ces failles est subméridienne à NE. Ce qui confirme les résultats trouvés par la carte des linéaments.

L'intensité du réseau des linéaments dans la zone d'étude est due sûrement à la localisation du site sur la bordure Nord de la chaîne du Haut Atlas. Cette chaîne en cours de surrection connaît une activité tectonique assez importante.

La forte abondance des fractures dans la zone, la rend vulnérable surtout pour le transport des polluants par les eaux en évènement pluvieux, ou par les eaux de surface. Ces eaux peuvent s'infiltrer dans les cassures et migrer vers les réservoirs d'eaux souterraines.

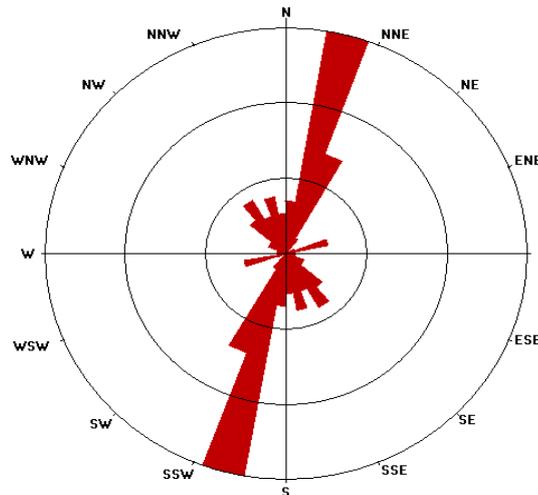


Figure 20. : Rosace directionnelle des différentes familles de linéaments de la zone d'étude.

c. Indice du soufre

A l'aide de l'image ASTER, nous avons pu extraire et identifier les zones qui connaissent une forte concentration (accumulation) du soufre dans sa surface. L'indice de soufre est visualisé à l'aide d'un composé (12, 5 et 3) assigné respectivement au rouge, vert et bleu.

. Les zones riches en soufre ont été identifiées par 1, 2, 3, 4 et 5 (Figure 21).

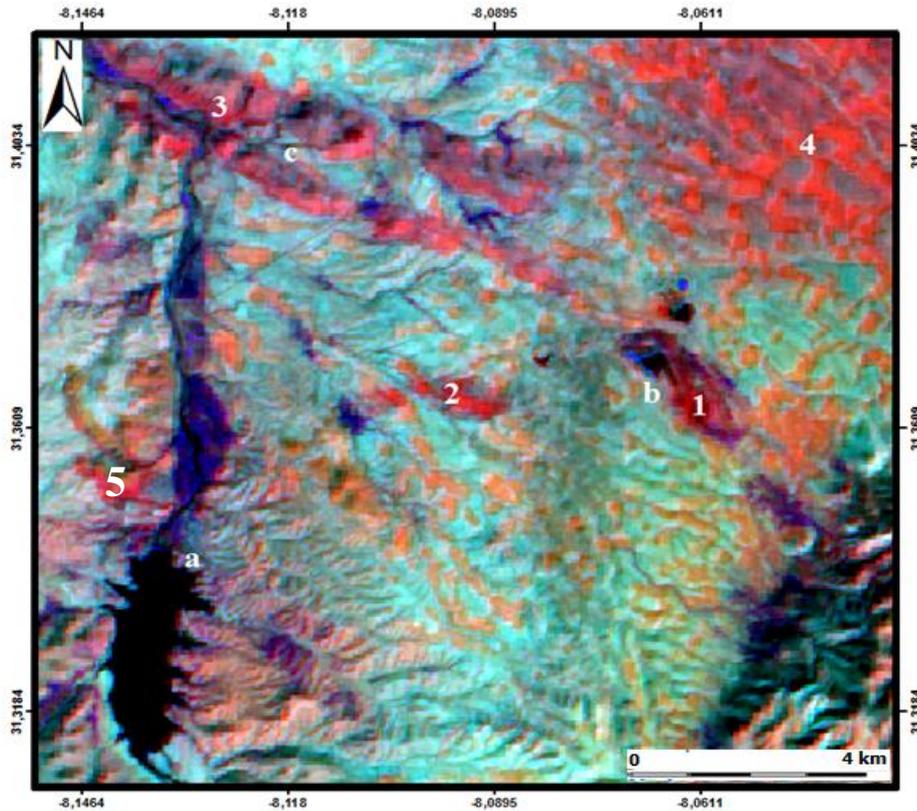


Figure 21. : Résultat de l'application de l'indice de soufre (a : Barrage Lalla Takerkoust, b : complexe industriel de Guemassa, c : Tufs d'Imarine, 1,2, 3 et 4 minéralisation en soufre).

Cet élément chimique (soufre) se présente naturellement dans les formations géologiques de la zone. En outre la mine contribue elle aussi, par les rejets sulfurés (halde). Le soufre qui se présente dans la pyrite et la pyrrhotite, s'oxyde en présence d'oxygène et de l'eau. Le produit de cette oxydation qui est solution acide (acide sulfurique), fortement chargée en éléments chimiques (surtout les métaux lourds mobilisables lors de cette oxydation). Le phénomène résultant de cette oxydation est le drainage minier acide (DMA). Ce phénomène est considéré comme un indice de pollution minière.

La réaction résumant ce phénomène est la suivante (EL HACHIMI, 2006) :



El ADNANI (2008), a montré qu'il existe une certaine instabilité de halde, vis-à-vis à ce phénomène. De ce fait, l'identification du soufre (gamme du rouge foncé et orange dans la carte digitalisée), montrent que cet élément est présent dans la zone nord du site d'étude, au niveau des halde de la mine, et des bassins de rétention. L'abondance en soufre dans cette zone et dans la zone ouest de la digue à stériles est due bien évidemment aux rejets des sulfures de la mine (figure 22).

L'élément est aussi présent au sommet des tufs d'Imarine, qui contiennent un enrichissement naturel en pyrrhotine. Outre la rive gauche du barrage et la zone nord-est d'Oumenass connaissent la présence de cet élément. A cause de l'affleurement du socle paléozoïque.

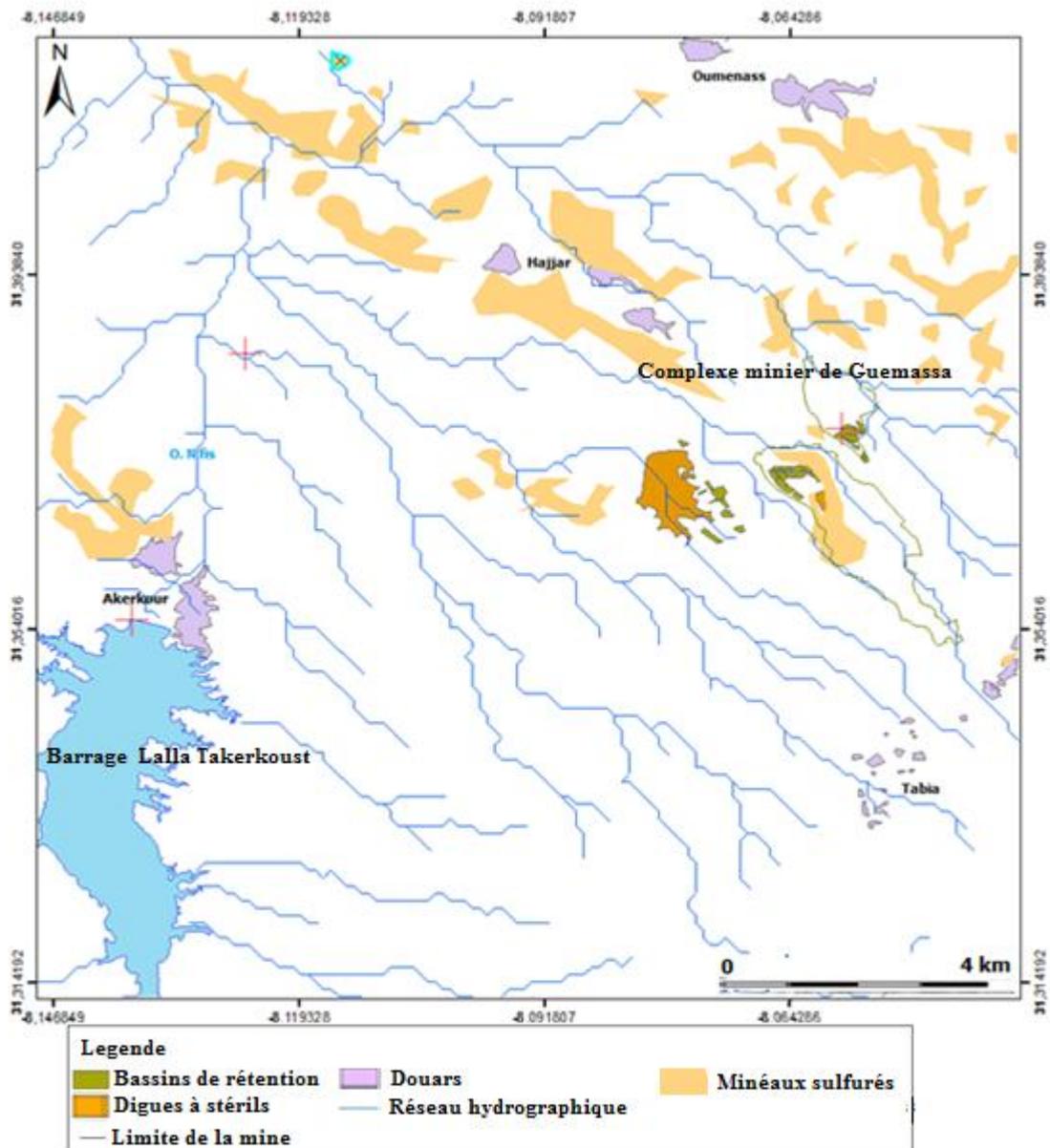


Figure 22. : Digitalisation de l'indice de soufre sur la carte de la zone.

La figure 23 montre la superposition de cet indice avec la carte des linéaments (uniquement les fracturations les plus importantes). L'assemblage entre les deux cartes montre des zones qui peuvent avoir une circulation des eaux. La circulation peut être descendante par l'infiltration des eaux de pluie. Ou bien ascendance surtout pour les circulations des eaux profondes.

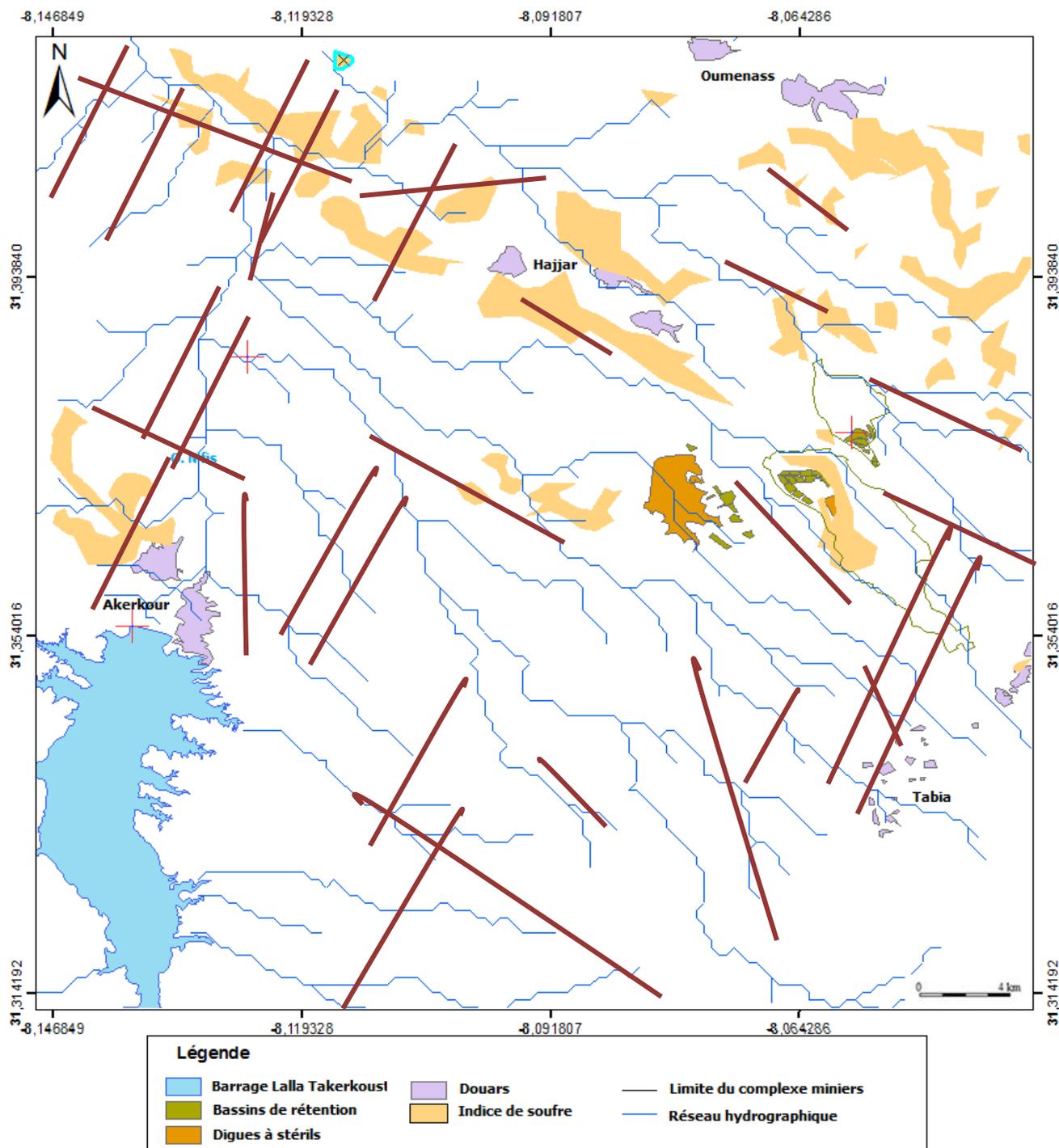


Figure 23 : Superposition des linéaments sur la carte de l'indice de soufre.

Le traitement des images satellitaires a une utilité importante. Cette utilité se résume à la connaissance des différentes formations qui peut avoir une relation avec le chimisme des eaux.

C- CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUE DES EAUX AU VOISINAGE DE LA MINE DE GUEMASSA

Cette partie du mémoire est consacré à l'hydrochimie des eaux de la zone d'étude. En premier lieu, il sera présenté les différentes analyses effectuées et leur mode opératoire. En second lieu les résultats de ces analyses feront objet d'interprétations et de discussions.

I. Matériels et méthodes

Cette partie, décrira les différentes méthodologies étudiées afin de connaître le comportement hydrogéologique et hydrochimique des eaux.

1. Prélèvement des eaux

L'échantillonnage des eaux est une étape primordiale pour toute étude, surtout en hydrochimie. Cette étape doit être effectuée selon les méthodes conventionnelles (RODIER, 2009) afin de collecter un échantillon le plus représentatif possible et pour ne pas fausser les analyses, et par la suite les interprétations.

Quatre missions de terrain ont été effectuées :

- Mission du 01/03/2013, dédiée à l'exploration et la connaissance des différentes composantes environnementales de la zone d'étude et la repartitions des points d'échantillonnage ;
- Mission 14/04/2013, avait pour objectif la localisation à l'aide d'un GPS des différents points d'échantillonnage et de prendre contact avec les propriétaires des puits afin d'effectuer la campagne d'échantillonnage ;
- Missions du 01/04/2013 et 25/04/2013, avaient pour objectif la réalisation de la campagne d'échantillonnage des eaux de surface, des eaux souterraines (puits et sources).

L'importance de prendre des échantillons d'eau de surface est de décrire la variabilité de la chimie de ces eaux tout au long de leur trajet. Surtout qu'une partie des affluents échantillonnés fait véhiculer l'eau issue d'une source d'eau à débit relativement important et dont l'axe d'écoulement est superposé avec quelques bassins de rétentions des eaux résiduelles de la mine. Cette source est utilisée par les agriculteurs de la région. L'effluent qui draine les eaux issues du ruissellement des digues à stériles de la mine était à sec au moment de l'échantillonnage. L'étude des eaux souterraines avaient pour but d'élucider l'effet de l'infiltration des écoulements de surface. Elle permettra également de relier la chimie de l'eau à la nature lithologique de l'encaissant.

La méthodologie adaptée fut simple :

Eaux de surface : l'échantillonnage a porté sur les eaux de l'Oued N'fis ainsi que celle des affluents qui l'alimentent et qui sont situés aux environs de la mine. Les échantillons d'eau de surface sont référencés : S0, S1, S2, S3 et S4.

Les points S0 et S4 sont des points localisés sur Oued N'fis, tandis que les points S1, S2, S3 concernent l'affluent (Affluent) alimenté par la source se trouvant en aval du bassin de rétention de la mine (Figure 24).

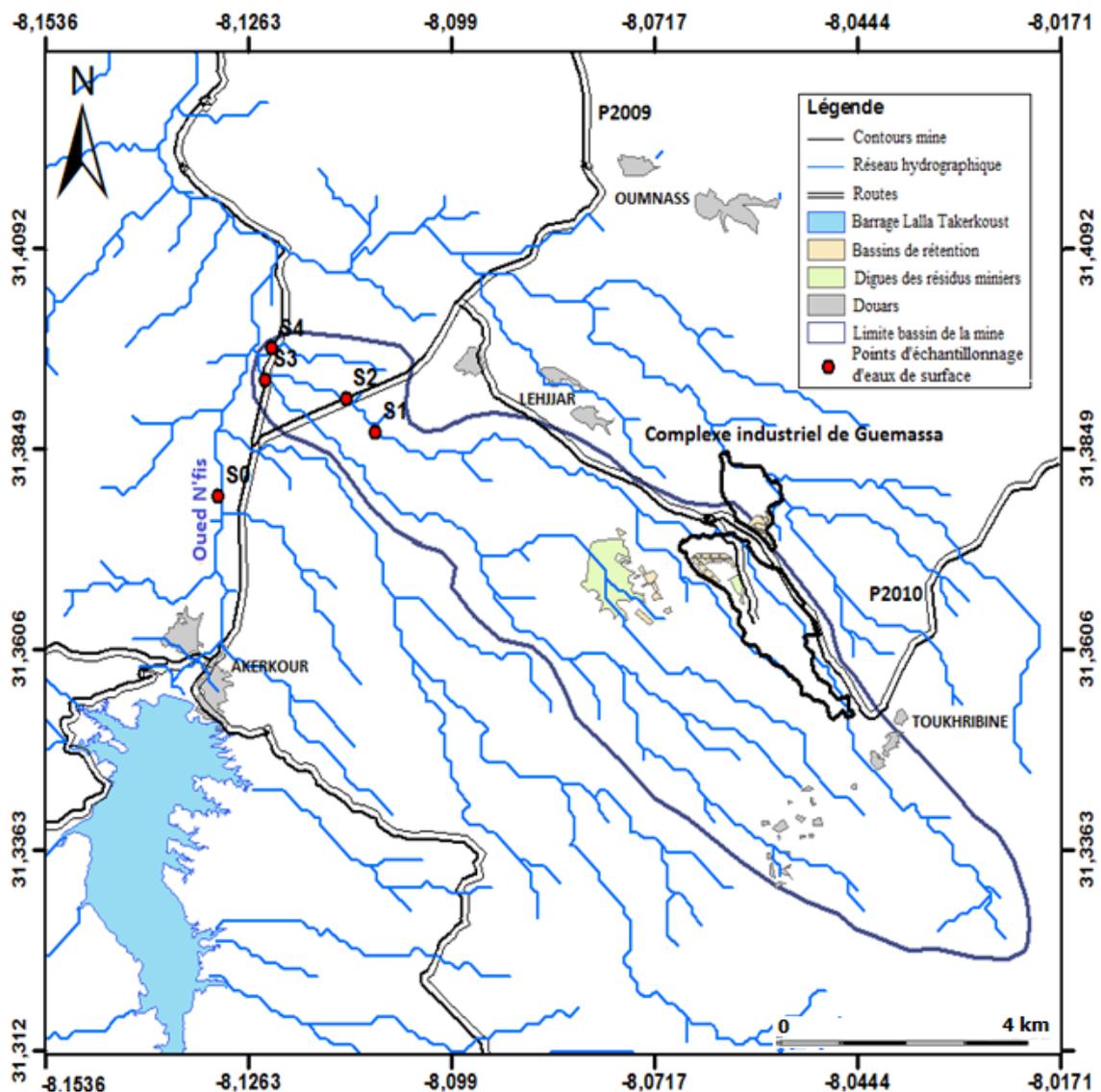


Figure 24 : Répartition des points d'échantillonnage des eaux de surface.

Eaux souterraines : les échantillons d'eau de puits ont été prélevés à l'aide d'un seau propre. Pour les puits équipés d'un système de pompage, les prélèvements ont été réalisés après une purge du puits pendant une dizaine de minutes.

La totalité des puits échantillonnés sont protégés par des margelles couplées à un couvercle.

Ces échantillons sont référencés : P1, P2, P3, P3', P4, P4', P5, P6, P7 et P8. Les points P7 et P8 représentent des points en amonts de la mine, et qui vont servir de témoin. Tandis que les autres points sont situés en aval (Figure 25).

Afin d'avoir des données représentatives et fiables, les points d'échantillonnage étaient répartie selon leur disponibilité sur l'ensemble du secteur.

Chaque échantillon est pris en deux exemplaires, et stocké à une température de 4°C.

Le positionnement des points d'échantillonnage (eaux de surfaces et eaux souterraines) a été effectué à l'aide d'un GPSGARMIN (GPSmap 60 CSx, de précision de 10 m). Les coordonnées sont consignées dans l'annexe I.

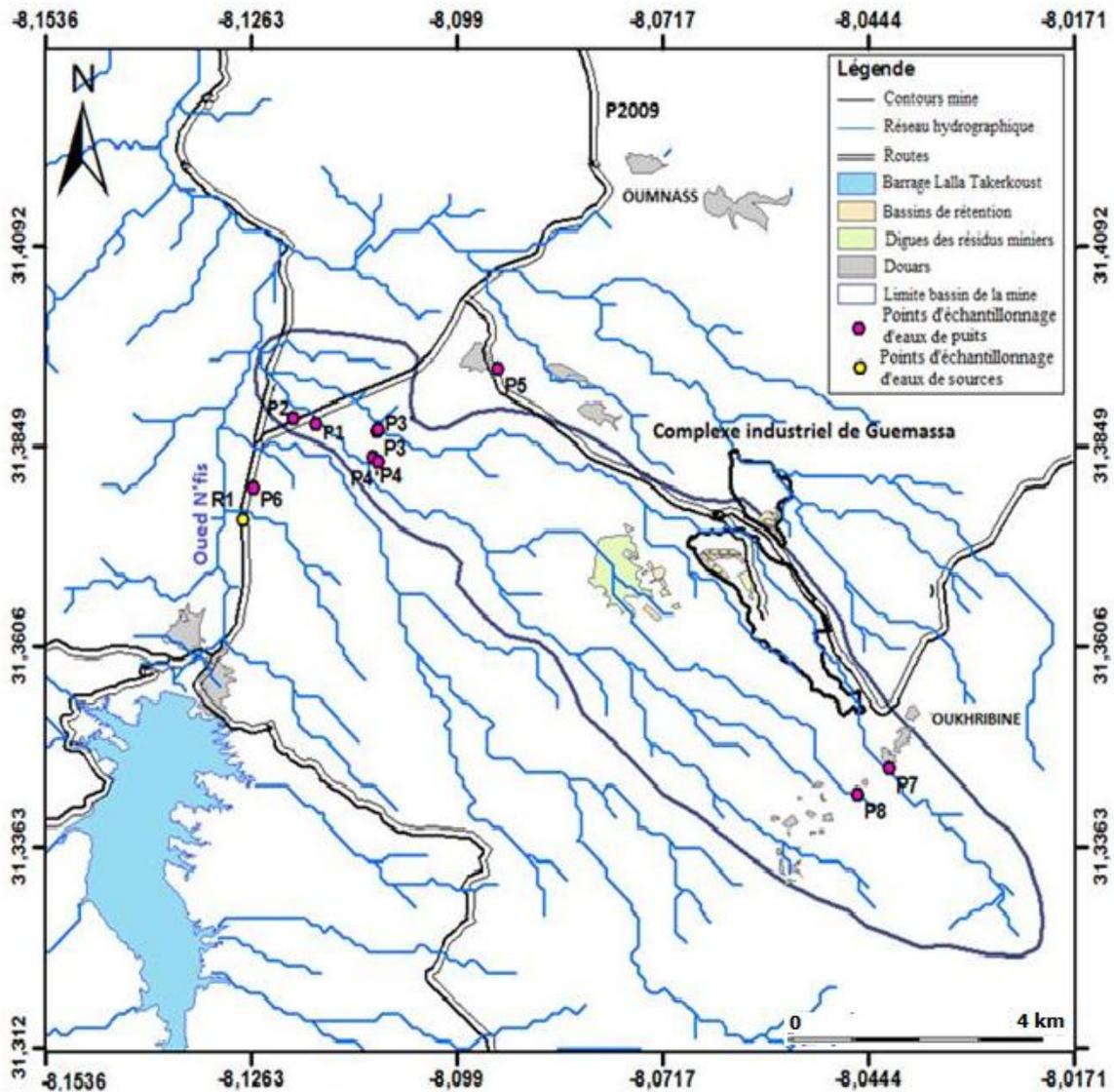


Figure 25 : Répartition des sites d'échantillonnage des eaux souterraines (puits et sources).

2. Mesures physico-chimiques des eaux

a. Mesures *in situ*

A cause de leurs non observabilité et de leur caractère thermo-dépendant, les mesures de la température, du potentiel d'hydrogène (pH), de la conductivité, de l'oxygène dissous et du potentiel d'oxydoréduction, ont été réalisés *in situ*. La profondeur de l'eau dans les puits ainsi que les débits des affluents et Oued N'fis ont été, également, aussi mesurés sur le terrain.

- **Piézométrie (P)**

La piézométrie est une profondeur mesurée à l'aide d'une sonde piézométrique, par rapport à une référence qui est l'altitude zéro du niveau de la mer calculé par le GPS GARMIN. Ce paramètre exprimé en m, donne une idée sur la surface de la nappe d'eau souterraine.

- **Température de l'eau (T)**

C'est un paramètre physique variable qui influence tous les autres paramètres physiques, les équilibres chimiques, la densité, la viscosité, la solubilité des gaz et les éléments chimiques dans l'eau (BREMOND et PERRODON, 1979 *in* CURIE, 2006). Elle varie selon la température de l'atmosphère. Elle a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à thermistance de marque EUTECHDO6+. En plus de la température de l'eau, la température de l'atmosphère fut mesurée à titre de comparaison. L'unité de mesure est le ° C.

- **Conductivité (CE)**

C'est un paramètre qui permet de mesurer les propriétés conductrices d'une solution, et avec laquelle on peut déduire la minéralisation totale d'une eau. Il était mesuré selon la norme AFNOR (NF T-90-031). Les mesures ont été effectuées au laboratoire à l'aide d'un conductimètre de marques WTWLF 90. Les résultats sont exprimés en mS/cm à une température fixée à 25°C.

- **Potentiel d'hydrogène (pH)**

Le pH est un paramètre physique, qui donne une idée sur l'activité de l'ion H_3O^+ dans l'eau et par conséquent, il donne une idée sur le degré d'acidité ou de l'alcalinité d'une eau. Il est influencé par la température, la concentration du dioxyde de carbone dissous, de l'oxydation et de la concentration des éléments dissous dans l'eau. Ce paramètre était mesuré selon la norme AFNOR (NF T90-008), à l'aide d'une sonde multifonction (potentiomètre à électrode de verre Ag/AgCl) de marque CONSORT C933 à une température fixée à 25° C. C'est un paramètre sans unité.

- **Oxygène dissous (O_2 d)**

L'oxygène moléculaire dissous est un paramètre qui contrôle la majorité des processus chimiques et biologiques. Sa teneur donne une idée sur les équilibres, les échanges gazeux avec l'atmosphère, la production de l'oxygène par les organismes autotrophes lors de la photosynthèse et sa dégradation par les organismes hétérotrophes lors de la respiration (LEVÊQUE, 1996 *in* CURIE, 2006). Les mesures étaient effectuées par la méthode électrochimique (RODIER, 2009), grâce à un oxymétrie de marque EUTECHDO6+ qui donne les teneurs en O_2 dissous à une température de 25° C, à la fois en % de saturation et en mg/l.

- **Potentiel d'oxydoréduction (Eh)**

Le potentiel redox donne une idée sur le pouvoir oxydant/réducteur d'une eau. Il est influencé essentiellement par le taux d'oxygénation d'une eau. Il était mesuré grâce à la sonde multifonction CONSORT C933. Les résultats sont exprimés en mV. Ces derniers ont été corrigés selon RODIER,

2009 par apport à une électrode Ag/AgCl, dite de référence ayant une valeur de 199 mV à 25 °C. La correction se fait comme suite : $Eh_{\text{corrigé}} \text{ (mV)} = Eh_{\text{mesuré}} \text{ (mV)} + 199 \text{ (mV)}$.

b. Analyses au laboratoire

Les analyses chimiques effectuées étaient réalisées au sein du laboratoire S2E du CNEREE (Alcalinité, chlorures, sulfates, calcium, magnésium, dureté, potassium et sodium) et au sein du laboratoire LHEA de la faculté des sciences Semlalia (Nitrates).

L'analyse des éléments majeurs de l'eau comporte l'analyse des anions (alcalinité, chlorures, sulfates et nitrates) et l'analyse des cations alcalins (sodium et potassium) et des alcalino-terreux (calcium et le magnésium).

- Alcalinité de l'eau (HCO_3^- et CO_3^{2-})

L'alcalinité d'une eau est la capacité de celle-ci à accepter les ions H^+ . Elle est déterminée à l'aide d'une titration acide : Titre Alcalimétrique (TA) et le Titre alcalimétrique Complet (TAC). Ces titres permettent de déduire la concentration en HCO_3^- et en CO_3^{2-} .

L'alcalinité est mesurée selon la méthode décrite par RODIER (2009). Cette méthode consiste à doser 25 ml d'échantillon, en utilisant l'acide chlorhydrique (N/50) et en présence de la phénolphtaléine pour le TA (CO_3^{2-}) et le vert de Bromocrésol pour le TAC (HCO_3^-) comme indicateur coloré.

A noter qu'aucun des échantillons ne contient les anions bicarbonates (CO_3^{2-}).

- Ions chlorures (Cl^-)

Les ions chlorures (Cl^-), sont des anions qui se présentent naturellement et toujours dans les eaux naturelles (élément conservé), et surtout en grande quantité dans l'eau de mer (la moyenne est de 19 g/l). Sa teneur dépend de l'origine de l'eau, de la nature des terrains qu'elle traverse ainsi que de la pollution.

Les chlorures sont dosés dans un volume d'échantillon de 25 ml. Selon la méthode de Mohr décrite dans RODIER (2009). Le dosage se fait à l'aide d'une solution de nitrate d'argent (N/10) en présence de chromate de potassium comme indicateur coloré.

- Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates (SO_4^{2-}) est la forme la plus oxydée du soufre. Ils sont présents dans presque toutes les eaux naturelles. Leurs origines sont diverses, mais cet élément provient souvent de la dissolution du gypse, de l'oxydation des sulfures qui se trouvent en abondance dans les déchets miniers.

Les sulfates sont déterminés par la méthode néphélométrie, décrite dans RODIER (2009). Elle consiste à mesurer à l'aide d'un spectrophotomètre (de marque BOECO, S20), l'absorbance d'une prise d'eau de 39 ml d'échantillon. La prise est acidifiée par l'ajout d'un 1 ml de HCl (N/10), afin de la

stabilisé et on ajoute 5 ml de la solution de chlorure de baryum (BaSO_4^{2-}) stabilisé par le Tween 20. La mesure est effectuée à une longueur d'onde de 650 nm.

- **Nitrates (NO_3^-)**

Les nitrates (NO_3^-) est la forme la plus oxydée de l'azote. Ils sont indispensables aux développements des végétaux. La plupart des eaux naturelles contient normalement des nitrates à des doses faibles (quelques milligrammes par litre). Cependant de nombreuses eaux souterraines et de surfaces ont une concentration élevée en nitrate du fait de l'enrichissement des sols par les engrais ou par les rejets d'eaux usées domestiques ou industrielles.

La détermination des nitrates était effectuée par la méthode de la réduction par colonne cadmium traité au cuivre. Cette méthode décrite en RODIER (2009) consiste à faire passer un volume de 50 ml par la colonne. Ce volume contient 5 ml d'échantillon, 5 ml de la solution tampon et 40 ml d'eau distillée. Le volume versé dans la colonne sera récupéré mais uniquement les derniers 25 ml. L'eau récupérée contenant des nitrites (résultats de la réduction des nitrates par la colonne), qui seront transformés en sel de diazonium par l'ajout du réactif de diazotation. La solution finale est mesurée par un spectrophotomètre à une longueur d'onde de 537 nm.

- **Duretés et mesure de concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+}**

Les concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été obtenues par la mesure des duretés totale et calciques.

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations des cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent, des fois, les ions fer, aluminium, manganèse et strontium (RODIER, 2009). Ce titre était mesuré selon la méthode complexométrie, décrite en RODIER (2009), en utilisant une solution d'EDTA (N/50) en milieu basic, avec le noir d'Eriochrome comme colorant.

Le calcium (Ca^{2+}) est le cation le plus abondant dans tous les types d'eaux. Sa teneur est généralement liée aux équilibres calco-carboniques, due à la concentration du CO_2 dissous dans l'eau et au pouvoir agressif des eaux.

Le magnésium (Mg^{2+}) est un élément abondant dans la nature. Il se trouve naturellement dans plusieurs roches ignées et sédimentaires, les eaux de mer, les saumures, et anthropiquement dans certaines rejets industriels.

Ces éléments chimiques ont été déterminés grâce à la méthode titrimétrique à l'EDTA (RODIER, 2009). La méthode de détermination du calcium est la complexométrie. Elle consiste à doser l'échantillon en pH basic, avec une solution EDTA di-sodique (N/50) en utilisant le murexide comme indicateur coloré. Pour le magnésium, il était déterminé grâce à la différence du volume de titration de la dureté et du volume de titration du calcium.

- Le sodium (Na⁺) et le potassium (K⁺)

Le sodium est un élément constant de l'eau. Il a plusieurs origine mais les plus importantes sont la dissolution des formations salifères, des silicates, des roches ignés, des retombés marines, de l'industrie et de la remonté du bisou salé dans les nappes souterraines.

Le potassium est élément le moins abondant dans l'eau, malgré sa forte présence dans les formations ignés. Une forte concentration de cet élément dans l'eau est souvent causée par les mines de potasse ou la pulvérisation de forte quantité d'engrais.

Ces ions ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre de flamme de marque AFP-100 BIOTECH selon la méthode décrite en RODIER, 2009. Cette méthode est basée sur le fait qu'un sel métallique qui traverse une flamme s'ionise et émet une longueur d'onde caractéristique. Connaissant la longueur d'onde du sodium et du potassium, on peut, avec un appareil correctement étalonné, déterminer leurs concentrations.

c. Analyse des ETM

L'identification des métaux lourds était réalisée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique (SAA) en mode flamme. L'appareil est de la marque SHIMADZU AA-6300. Cette mesure comporte le Zn et Cu.

Le principe de la SAA est basé sur la mesure de l'intensité de la lumière absorbé par un atome. Les atomes passent, sous l'action de la radiation, d'un niveau d'énergie fondamentale à un état excité de niveau d'énergie plus élevé. Cette variation d'énergie dépend de la fréquence de la radiation. La loi de BEER-LAMBERT donne la concentration de la substance qui sera proportionnelle à l'absorption. La précision et la rapidité sont les principaux avantages de cette technique.

Mais avant de réaliser les mesures par le SAA, l'extraction des ETM contenues des eaux est nécessaire. Pour cela une prise d'essai de 250 ml d'eau est évaporée à l'étuve pendant 24 h à une température de 105 °C. Le résidu sec restant est attaqué à l'aide d'une solution erlang (2.5 ml HNO₃ et 7.5 ml HCl), et chauffé sur une plaque chauffante à sable à une température de 30° C pendant 1 h.

Après refroidissement, la solution obtenue était ajusté à 10 ml par l'HCl à 5%. Ensuite la solution est filtré et conservé dans des tubes jusqu'au moment d'analyse.

II. Hydrogéologie

L'hydrogéologie de la zone d'étude est mal documentée, surtout dans les organismes responsables de la gestion et aménagement des ressources en eau (ABHT, 2010). Car les ressources souterraines existantes sont rares et ne constituent pas une part des principales nappes souterraines importantes de la région du Haouz. Les seuls documents qui existent figurent dans la documentation principale du complexe industriel de Guemassa. Ces documents sont difficiles d'accès. De ce fait, des mesures piézométriques ont été effectués, afin de déterminer le sens d'écoulement des eaux et de prévoir le sens

probable de transfert, d'éventuels polluants. Ces mesures ont concerné uniquement les puits traditionnels accessibles.

Les mesures de la piézométrie ont été effectuées le 25 avril 2013. Les valeurs obtenues ont été remontées par interpolation à l'aide du logiciel ARCGIS sur la carte de la zone déjà préétablie. La carte d'iso-valeurs (Figure 26) montre que, globalement, l'écoulement souterrain s'effectue selon une direction SE-NW. Cet écoulement coïncide sensiblement avec le sens de drainage des affluents vers Oued N'fis. Avec une dénivelée de l'ordre de 300m : 900 m en amont à 600 m en aval.

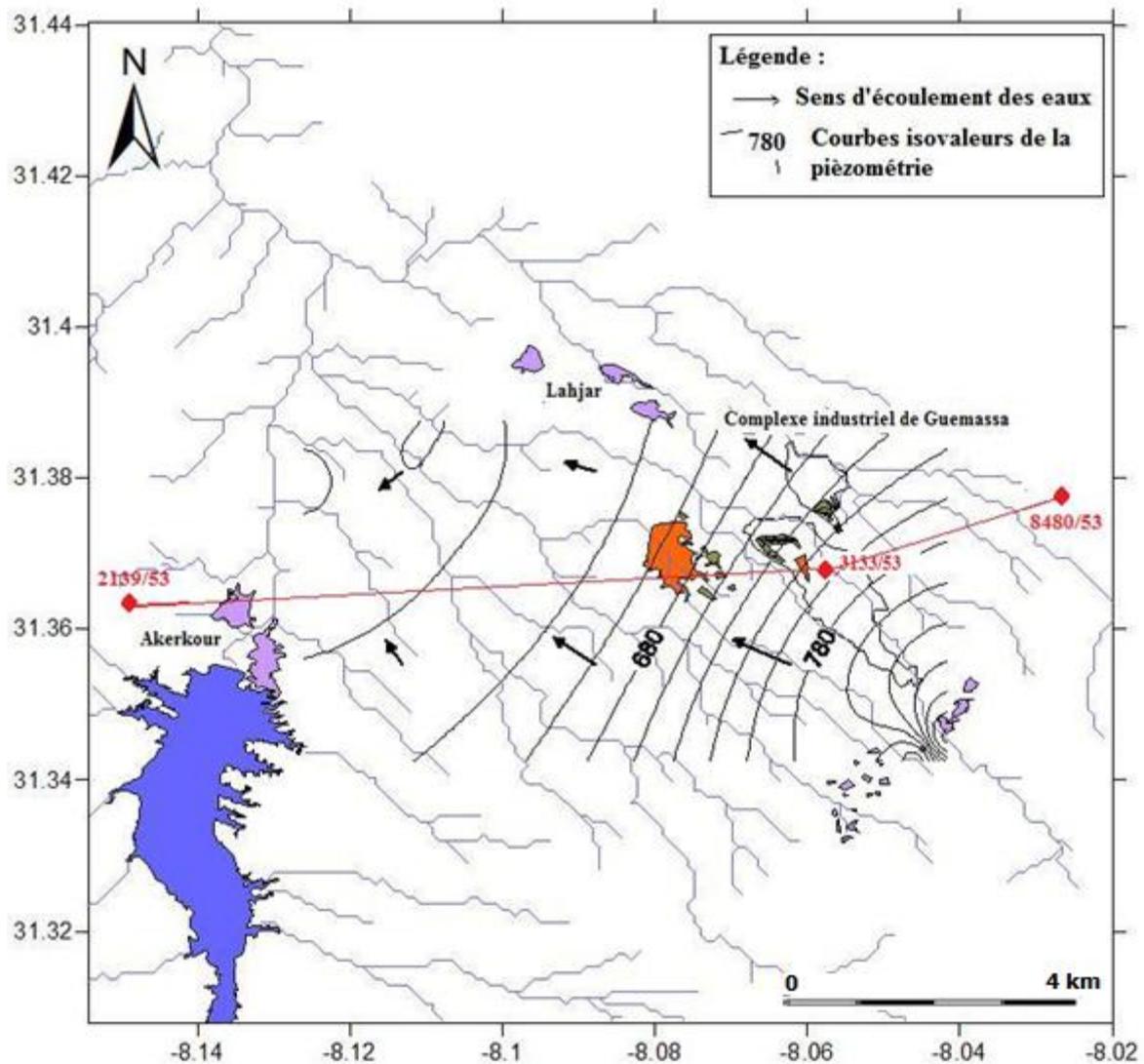


Figure 26 : Carte piézométrique probable de la zone d'étude, établie durant la campagne du 25/04/2013.

A l'aide de trois logs stratigraphiques de forages réalisés dans la région (ABHT), on a pu rétablir une corrélation entre les différentes formations constituant le réservoir aquifère. Les logs réalisés par le logiciel PSICAT (Figure 27), sont référencés ainsi :

- 2139/53 : forage implanté au niveau du Douar El Gaida (Tidrarine),

- 3133/53 : forage implanté au niveau de la mine de Guemassa,

- 3480/53 : forage est implanté au niveau de la rive gauche du Barrage Lalla Takerkoust sur la localité du Douar Amkhlj.

L'analyse de ces logs stratigraphiques montre que les eaux souterraines dans la région sont contenues dans un réservoir constitué essentiellement par des roches sédimentaires. Ces roches sont représentées par des alluvions grossières composées de galets et de graviers (vers la zone est). Ce faciès change légèrement en formation hétérogène de type limons, graviers et sables vers le centre. Et devient franchement conglomératiques vers l'ouest.

Les puits (P7 et P8) situés en amont juste au piémont du Haut atlas, sont creusés dans un réservoir formé de schistes et carbonates très fracturés. En aval de la mine, l'aquifère est formé de formations mio-pliocènes et quaternaires qui constituent le début la plaine du Haouz.

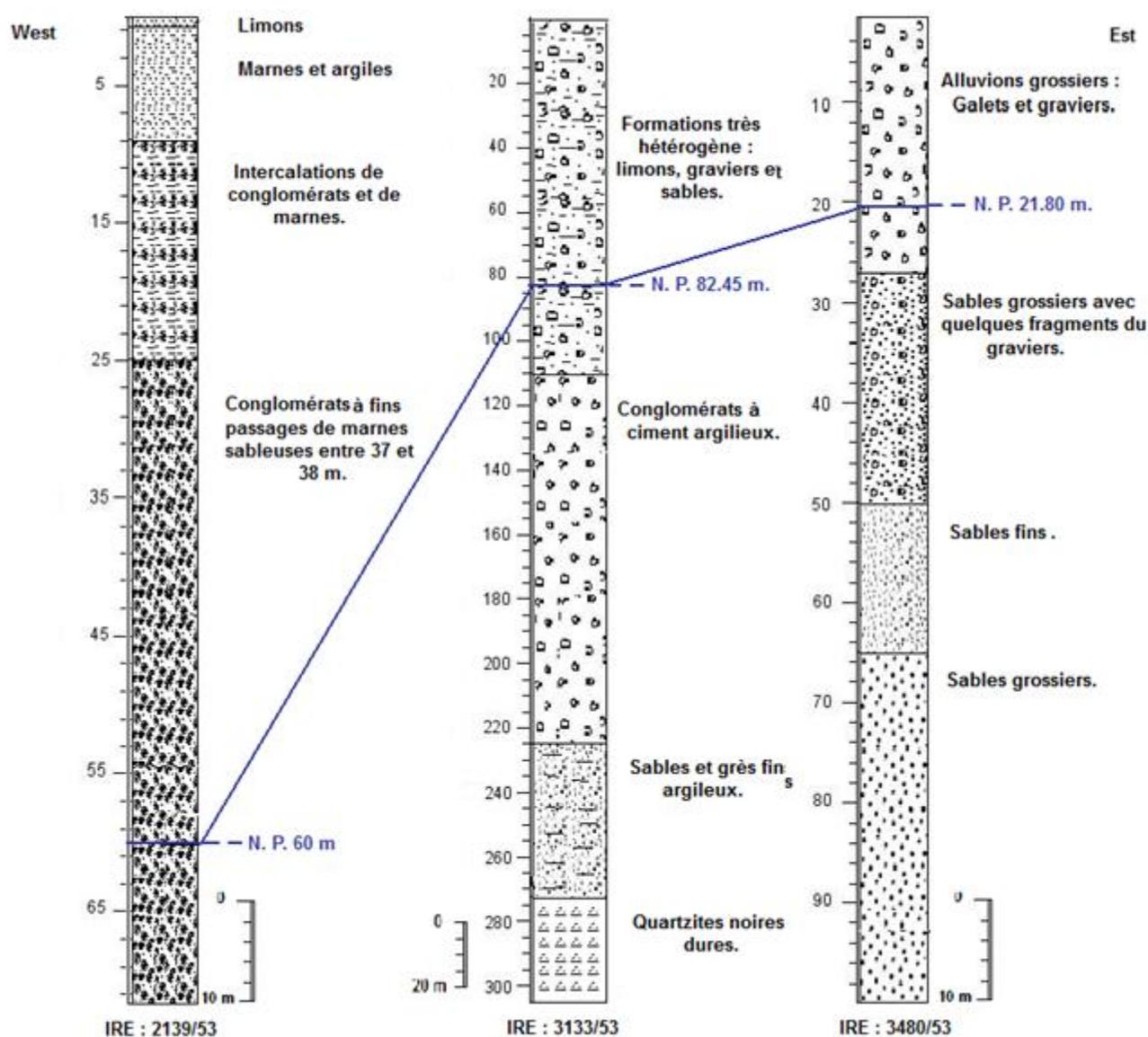


Figure 27 : Logs stratigraphiques synthétique des forages exploités dans la zone d'étude.

III. Résultats des analyses et discussions

Le tableau IV présente un résumé récapitulatif des résultats des analyses : les mesures *in situ* et les analyses de la chimie élémentaire (éléments majeurs).

Pour les résultats détaillés, ils sont présentes dans l'annexe I.

Tableau IV : Représentation des résultats des mesures et des analyses chimiques.

Paramètres		Maximum	Minimum	Moyenne arithmétique	Ecart-type
Paramètres physiques	T (°C)	25	18.50	21.36	1.93
	pH	8.30	6.80	7.39	0.56
	Conductivité (mS/cm)	4,080	0.680	1,790	1,020
	Eh (mV)	177.90	97.70	144.74	29.28
	O2 dissous (mg/l)	7.35	0.8	5	1.7
	O2 dissous (%)	83.30	8	55	19
Paramètres chimiques (anions)	HCO ³⁻ (mg/l)	488	219	344	61
	Cl ⁻ (mg/l)	1434	85	490	417
	SO4 ²⁻ (mg/l)	548	56	173	117
	NO3 ⁻ (mg/l)	19	0.1	3	4
	Ca ²⁺ (mg/l)	266	34	145	67
	Mg ²⁺ (mg/l)	431	9	133	113
	Na ⁺ (mg/l)	179	1	19	6
	K ⁺ (mg/l)	25	3	11	6
Métaux lourds	Cu (mg/l)	14.15	0.06	4.71	4.01
	Zn (mg/l)	9.03	3.57	5.98	1.76

1. Qualité et critiques des analyses chimiques

La qualité des analyses chimiques a été vérifiée à l'aide du bilan ionique exprimé sous forme de la Balance Ionique (BI). La balance ionique est calculée selon la relation proposée par FREEZE et CHERRY en 1979 :

$$Bi = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100 \text{ Avec } \sum cations - \sum anions \text{ exprimés en méq/l}$$

Selon la valeur de la balance ionique trouvée, les analyses chimiques sont classées comme suite :

- BI < 5 % : analyses acceptables et fiables.
- 5 % < BI < 10 % : analyses admissibles.
- BI > 10 % : analyses douteuses.

L'erreur indiquée par la balance ionique doit impérativement être inférieure à 10 %, pour les eaux faiblement chargées. Dans notre cas, uniquement les analyses de l'échantillon P5 présentent une BI inférieure à 10%. Cet échantillon présente une conductivité relativement faible. Le reste des échantillons présentent des BI qui dépassent 10 %. Ces échantillons présentent, également, de fortes conductivités (entre 0.7 et 4.1 mS/cm). Probablement un ou plusieurs éléments chimiques (non majeurs) se trouvaient en grande quantité et n'avaient pas été comptabilisés au niveau de la BI. Ces éléments peuvent être des cations liés à l'activité minière. En effet, les BI sont en totalité négatives.

Malgré les valeurs importantes des balances ioniques obtenues lors de ces analyses, les résultats trouvés seront traités et considérés comme acceptables puisque les analyses ne concernent que les huit éléments majeurs.

Tableau V : Résultats des calculs des balances ioniques des éléments majeurs.

	Points d'échantillonnage	Somme anions (méq/l)	Somme cations (méq/l)	Balance ionique (%)
Eau souterraine	P1	23.17	17.99	-12.58
	P2	18.30	14.61	-11.22
	P3	28.11	17.29	-23.83
	P3'	49.79	28.62	-27.00
	P4	54.61	33.01	-24.65
	P4'	17.12	11.01	-21.73
	P5	13.64	13.57	-0.26
	P6	9.15	7.27	-11.45
	P7	9.32	6.38	-18.72
Eau de surface	P8	13.77	8.34	-24.57
	S0	11.23	5.87	-31.32
	S1	23.89	11.96	-33.28
	S2	23.72	10.40	-39.05
	S3	23.11	13.64	-25.76
Eau de source	S4	17.57	7.57	-39.80
	R1	12.71	9.11	-16.51

Afin de visualiser la bonne relation entre la somme des ions dissous et la conductivité, une corrélation a été réalisée entre la conductivité et le total des ions dissous (TDS). La corrélation (Figure 27) montre qu'il y a une forte liaison entre la conductivité et le TDS (avec un coefficient de

détermination de 0.95). Donc 95% des valeurs de la conductivité sont expliquées par le TDS. De ce résultat on peut confirmer que malgré les fortes BI, les conductivités confirment la relative bonne qualité des analyses.

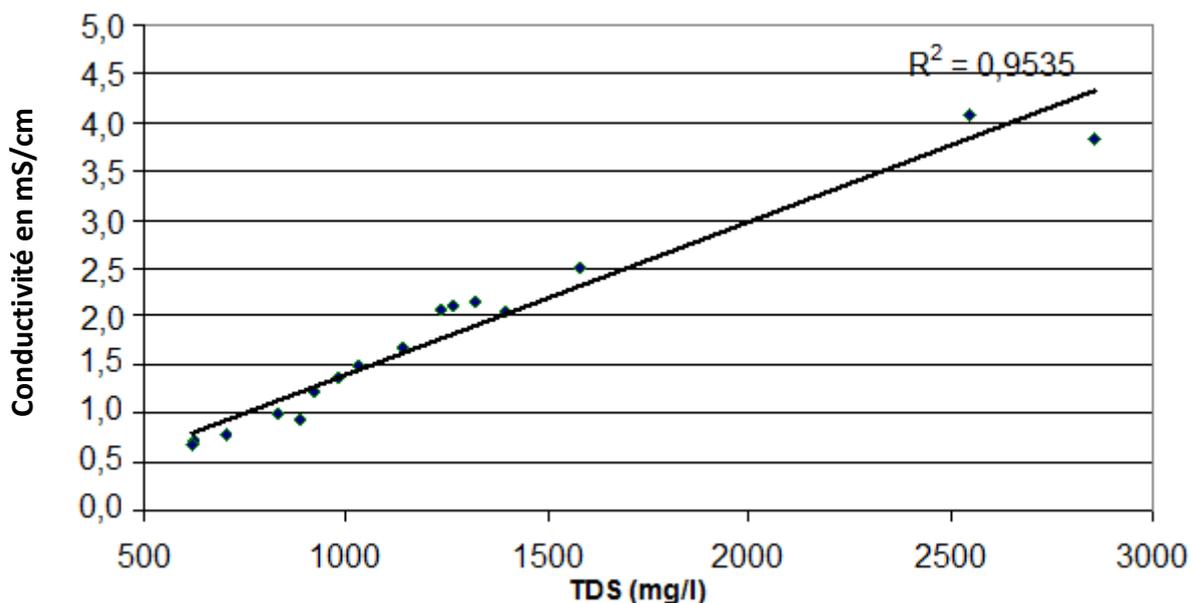


Figure 27 : Corrélation linéaire entre la conductivité électrique et le TDS.

La présence de plusieurs éléments chimiques dans les eaux été confirmée. Les résultats trouvés des ETM ont été introduits dans le calcul des BI. Les nouvelles BI montrent une certaine amélioration (Tableau VI). Cette amélioration confirme la fiabilité des analyses.

Tableau VI : Comparaison des balances ioniques.

Stations	BI ions majeurs	BI ions majeurs + ETM
P1	12,58	10,65
P2	11,22	9,34
P3	23,83	21,49
P3 '	27,00	24,53
P4	24,65	22,28
P4 '	21,73	19,47
P5	0,26	1,26
P6	11,45	9,56
P7	18,72	16,57
P8	24,57	22,20
R1	16,51	15,75
S0	31,32	28,68
S1	33,28	30,56
S2	39,05	36,09
S3	25,76	23,35
S4	39,80	36,80

2. Hydrochimie des éléments majeurs

Dans la présente partie seront exposés les différents résultats trouvés. La discussion des résultats aura pour but l'identification de l'origine probable de la minéralisation des eaux.

a. Paramètres physiques

Les résultats des mesures effectuées in situ seront exposés dans cette partie.

- Température des eaux

Les températures mesurées dans les eaux de surface durant les deux campagnes du mois d'avril, sont homogènes. Elles sont comprises entre 18.7 et 21.6 °C. La température des eaux reflète l'influence de la température ambiante de l'air sur celle de l'eau. On note même l'existence d'une évolution selon l'heure des mesures.

Les températures des eaux souterraines varient entre 18.7 et 25 °C, avec une valeur moyenne de 22 °C. Ces températures sont à la fois influencées par la température ambiante de l'atmosphère, mais montrent également l'effet de la profondeur. Les puits profonds comme P4' (44 m) ont la température de l'eau plus importante que la température du puits le moins profond P7 (5 m).

- pH des eaux

L'ensemble des eaux de surface présente des pH relativement alcalins. Le pH varie entre 7.6 et 8.2 (Figure 28). Les pH montrent une évolution spatiale, probablement liée aux dépôts des tufs travertineux (encroutements) comme c'est le cas de l'affluent S2 avec un pH de 8.2 (Figure 29). Au niveau de l'Oued N'fis, le site tout à fait en aval (pH de 8,1) montre l'effet de mélange de différentes eaux.

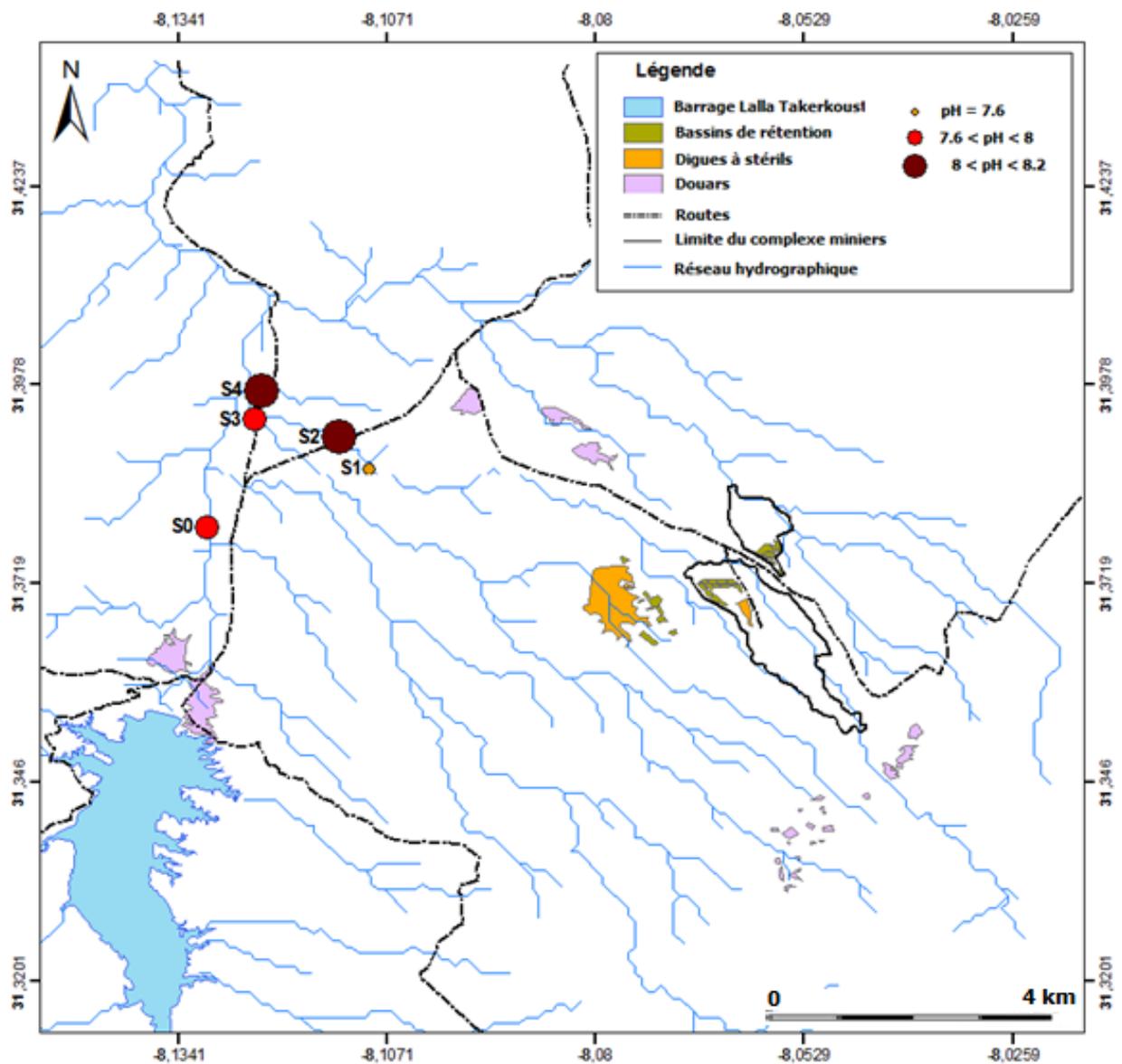


Figure 28 : Variations du pH pour les eaux de surface.

Dans notre cas les eaux de surface sont alcalines à cause de l'enrichissement en calcite. L'enrichissement de ces eaux en calcite est dû à la dissolution des formations carbonatées présente dans les dépôts mio-pliocène et quaternaire où percole ces eaux. A l'opposé, les eaux souterraines qu'on soupçonne être issues en partie de l'infiltration des eaux de surface, surtout que la plupart des puits faisant objet de cette étude se situent à proximité des berges de N'fis et du l'affluent, traversé par ces eaux. Le pH élevé du P6 peut être expliqué par le fait que les eaux issues de ce puits percolent dans des terrains carbonatés d'où la tendance de l'eau à dissoudre la calcite. D'où l'alcalinité élevée dans ce puits.



Figure 29 : Photo des encrustements au niveau de la station S2.

Les eaux souterraines (Figure 30) ont des pH relativement neutres, compris entre 6.8 et 8.3. Le pH de 8.3 est mesuré au niveau du puits 6.

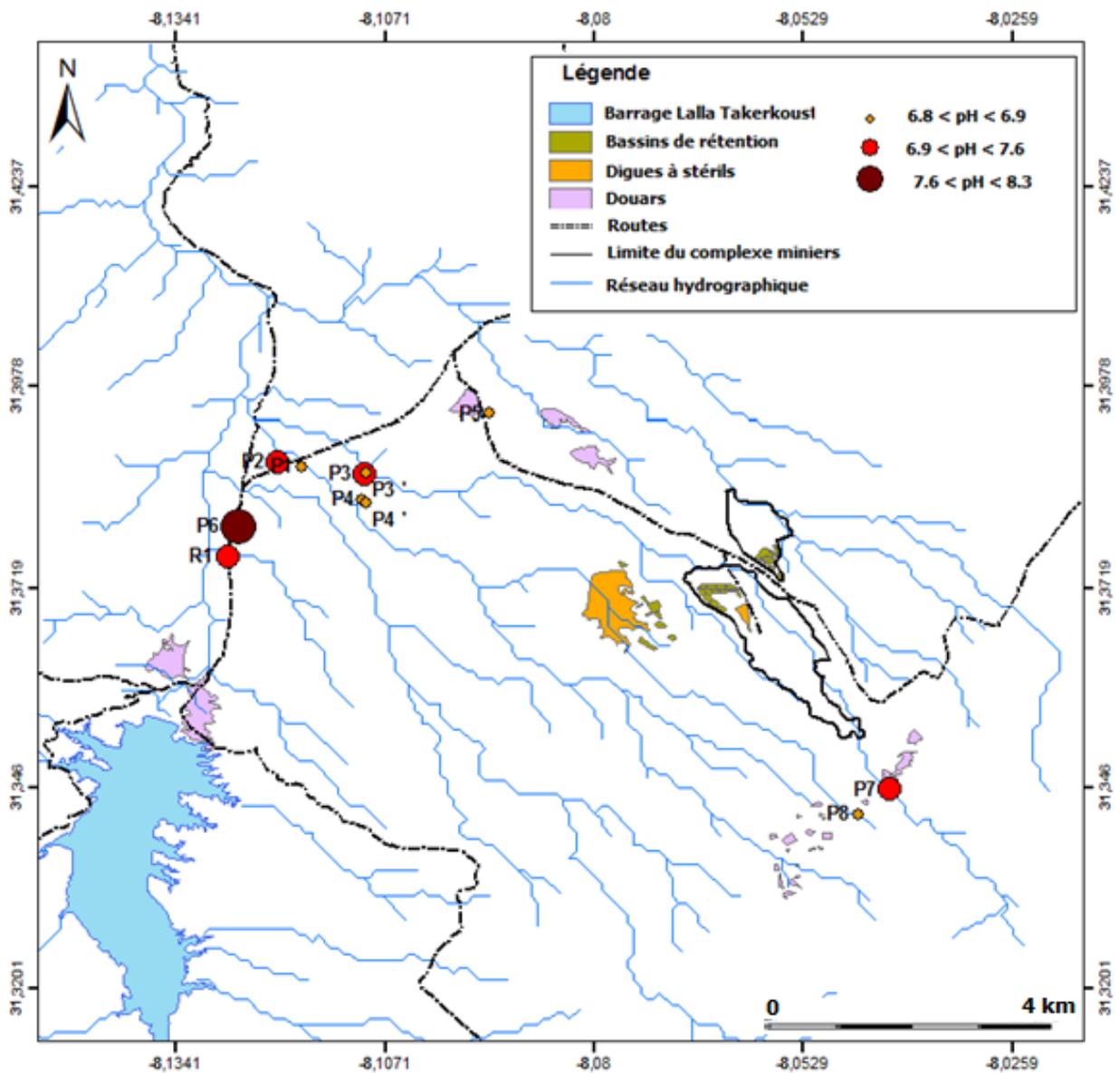


Figure 30 : Variations du pH pour les eaux souterraines.

- Conductivités des eaux

Les eaux de surface issues de l'affluent, présentent des valeurs de conductivité élevée (>2 mS/cm) par rapport aux eaux de l'Oued N'fis (de 0.87 à 1.37 mS/cm). Au niveau de ce dernier, les conductivités augmentent de l'amont (0.787 mS/cm) vers l'aval (1.371 mS/cm). A la confluence des affluents et de l'oued N'fis, les conductivités sont intermédiaires et témoignent d'un mélange d'eau (Figure 31).

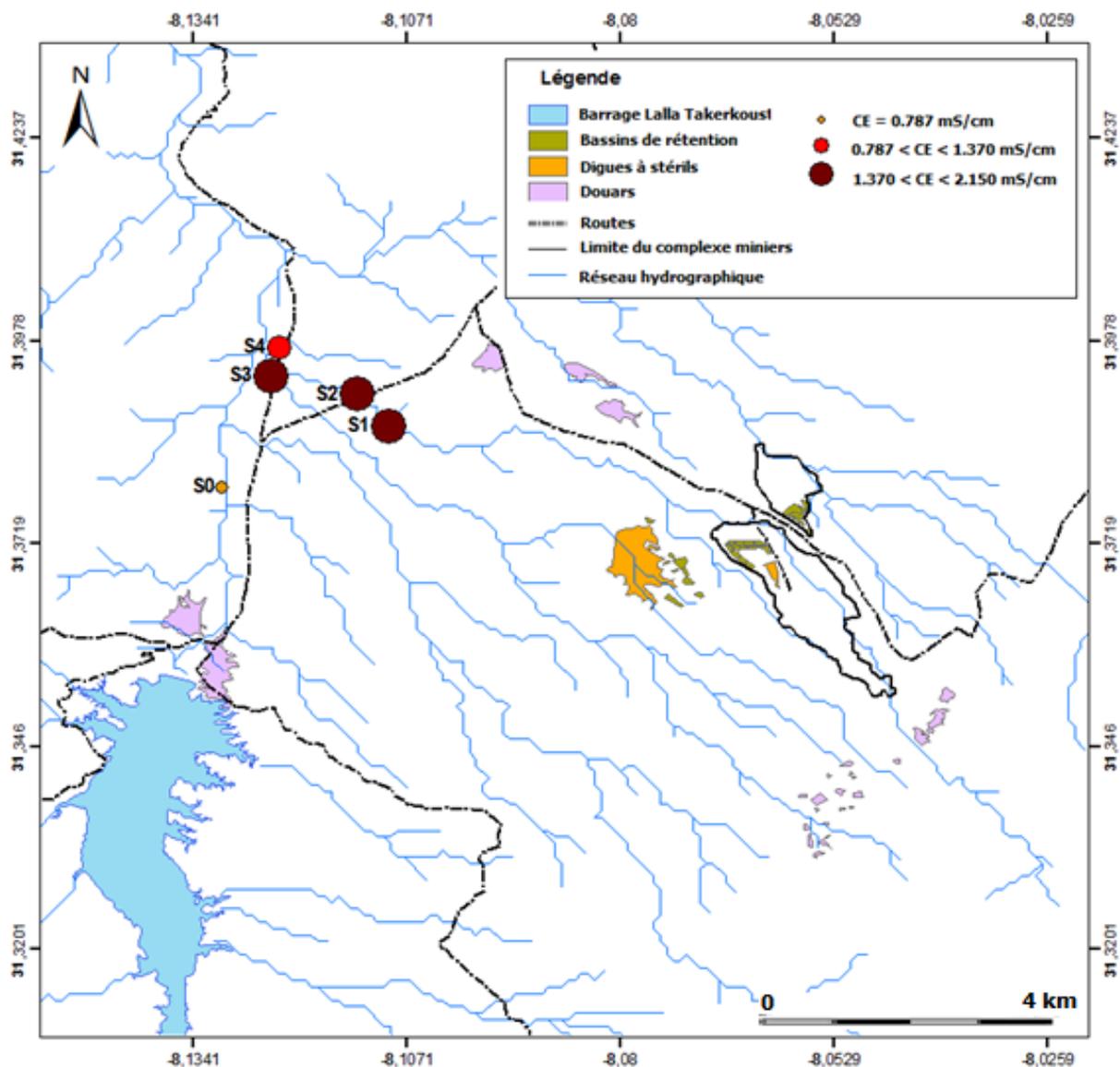


Figure 31 : Conductivités des eaux de surface au voisinage du site minier Guemassa.

Les conductivités des eaux souterraines sont plutôt élevées (Figure 32). Elles varient entre 0.628 et 4.080 mS/cm, avec une moyenne de 1.917 mS/cm. Les eaux issues des puits P6, P7 et P8 présentent les conductivités les plus faibles (respectivement 0.721, 0.678 et 0.937mS/cm). Par contre les eaux des puits P3' (4.080Sm/cm) et P4 (3.830mS/cm) présentent les eaux à fortes conductivités.

Les valeurs importantes de la conductivité, dépendent de plusieurs facteurs : la nature des formations géologiques drainées, le temps de séjours dans le réservoir, la mobilité des ions et la température.

Pour les eaux de l'affluent leur conductivité importante est due en plus de la percolation dans des terrains géologique constitués essentiellement par des dépôts sédimentaires (calcaire, grès conglomérats et argiles), à l'infiltration des eaux résiduelle de la mine qui affectent les eaux de cette affluent. Les eaux souterraines qui se situent tout près du Affluent à savoir les puits P3' et P4, montrent, également, de fortes conductivités. C'est probablement les infiltrations des eaux de l'affluent qui contribuent à ces fortes conductivités.

On remarque pour le puits P3 à une conductivité plutôt moyenne, cela est dû au mélange entre les eaux non affectées par la mine et les eaux contaminé infiltrées à partir de l'affluent.

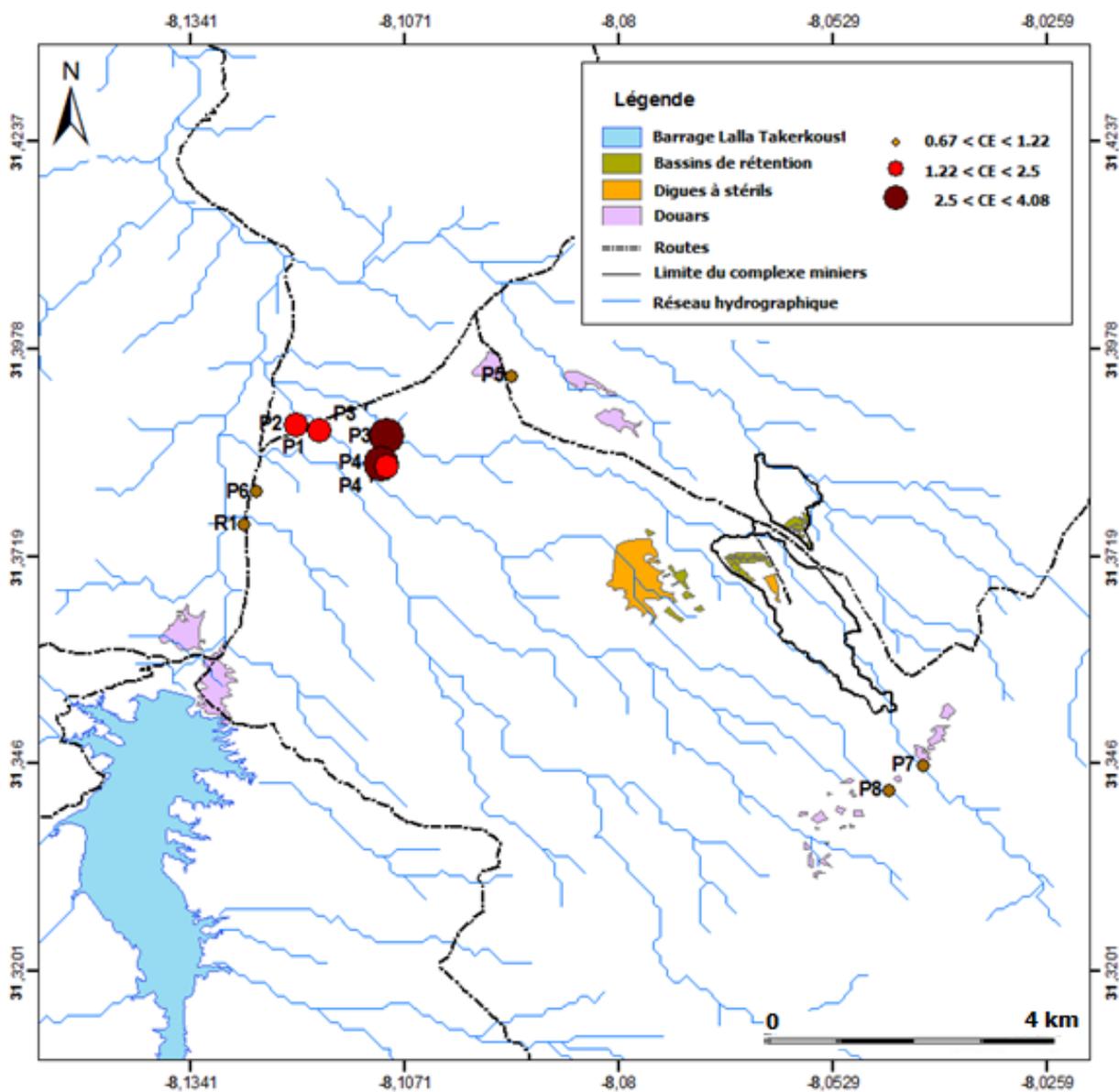


Figure 32 : Evolution des conductivités des eaux souterraines au voisinage du site minier de Guemassa.

- Potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

Les eaux de surfaces montrent des potentiels d'oxydo-réduction modérés (de 111.5 à 129.4 mV). Les faibles valeurs sont enregistrées au niveau de S2 et la plus forte est au niveau de S1.

Les valeurs du potentiel redox des eaux souterraines sont plutôt homogènes et supérieures à celles des eaux de surface. Elles sont comprise entre 167 et 190.9 mV, avec une moyenne de 173.6 mV. Par contre les eaux issues du puits P6 présentent la plus faible valeur par rapport aux autres puits (110.9 mV).

Les valeurs mesurées du Eh sur le site montrent des variations contradictoires avec le principe d'évolution du potentiel dans la nature. De ce fait les résultats trouvés ne seront pas pris en considération.

- Oxygène dissous

Les eaux de surface sont relativement oxygénées avec des valeurs de saturation de l'ordre de 58 % à 83.3 %. Le taux de saturation en O₂ augmente de l'amont vers l'aval (Figure 33). Cela est due au contact direct avec l'oxygène atmosphérique. Tout de même la présence de la matière organique et des êtres vivants, tel est le cas du S0 rend la saturation en O₂ plus faible.

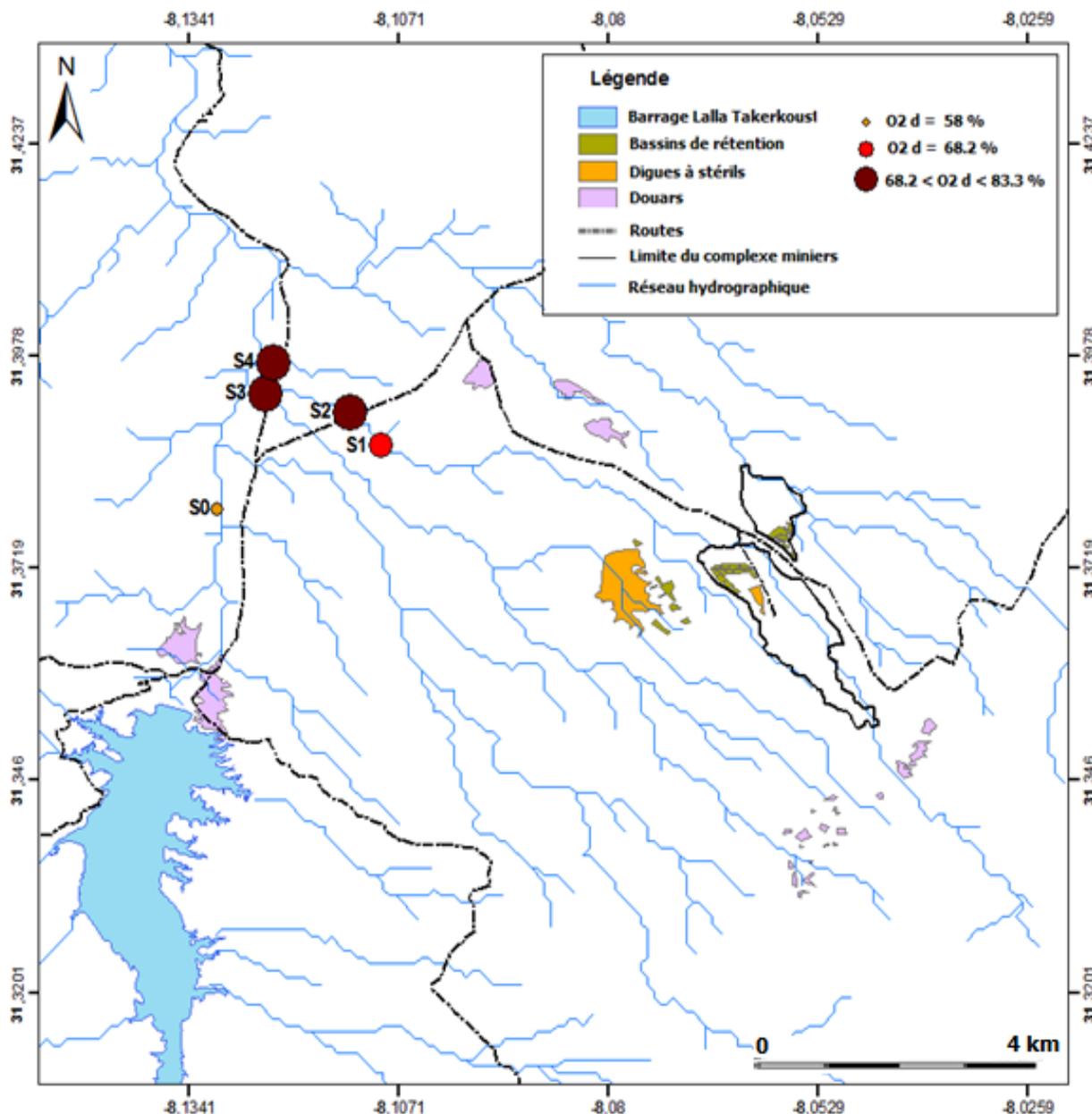


Figure 33 : Evolution de la saturation des eaux de surface en O₂ dissous au voisinage de la mine de Guemassa.

Les eaux souterraines (Figure 34) montrent un taux d'oxygénation plutôt faible que les eaux de surface. Ces eaux ont des pourcentage de saturation en O₂ allant de 32.3 % (P3) à 74.9 % (P6). La plus faible saturation a été enregistrée au niveau du P8 (8.6 %). Ce puits était fermé au moment de la mesure et donc peu influencé par l'oxygène atmosphérique. L'enrichissement des eaux des puits en O₂ est dû à l'aération du puits et la présence de la matière organique dans les eaux.

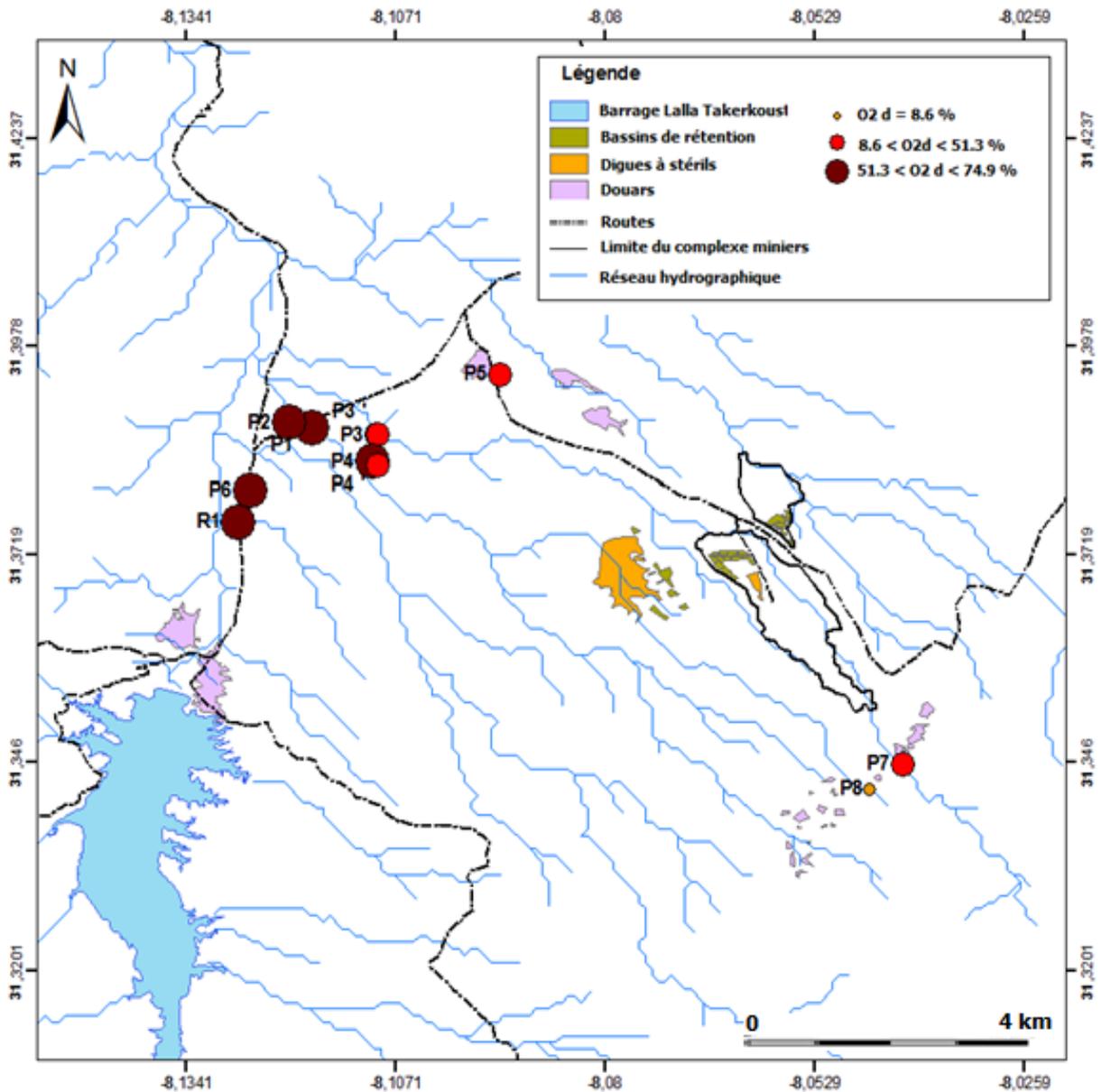


Figure 34 : Evolution de la saturation des eaux souterraines en O₂ dissous au voisinage de la mine de Guemassa.

b. Eléments chimiques majeurs

Afin de comprendre les faciès et le comportement chimique des eaux au voisinage de la mine de Guemassa, plusieurs projections ont été réalisées. Ces projections ont été faites à l'aide de logiciel DIAGRAMME (SMILER, 2004). Dans cette optique, les analyses ont été projetées sur des

diagrammes de STABLER (Figure 35 et 36). Ce dernier décrit en fonction des pourcentages la part que constitue chaque élément dans l'eau.

Les cations les plus abondants dans les eaux de surface sont le sodium (Na^+) et le calcium (Ca^{2+}). Leurs teneurs oscillent entre 34 et 266 mg/l pour le Na^+ , et 9 et 431 mg/l pour le Ca^{2+} . Viendront ensuite le magnésium (Mg^{2+}) et le potassium (K^+) avec des concentrations plutôt faibles, entre 3 et 12 mg/l pour le K^+ et 1 et 21 mg/l pour le Mg^{2+} .

On peut classer par ordre d'abondance croissante, les cations comme suit : potassium < magnésium < sodium < calcium pour presque la totalité des eaux.

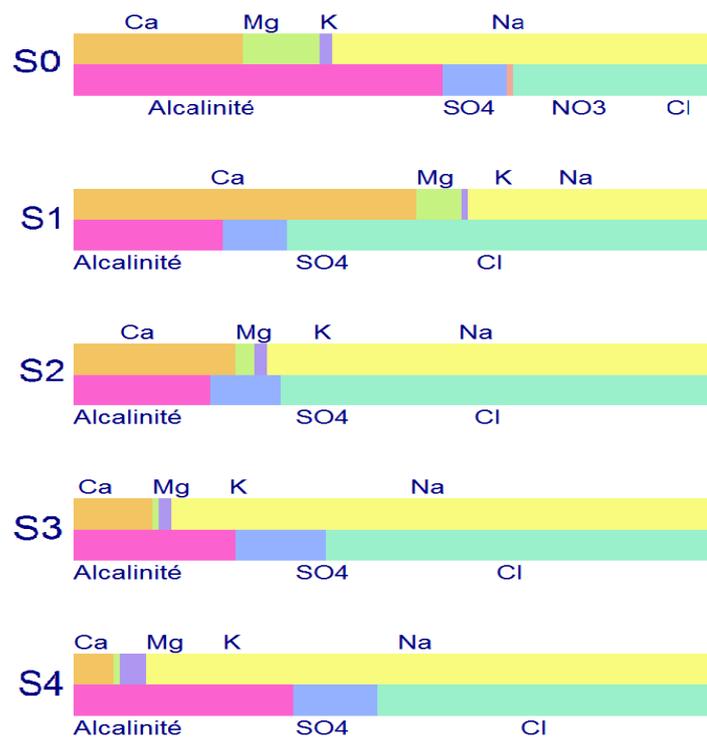


Figure 35 : Projection des résultats des analyses des eaux de surface sur le diagramme de STABLER.

A noter que les eaux souterraines (Figure 36) sont plus enrichies en cations que les eaux de surface, surtout en Ca^{2+} et en Na^+ (spécialement dans les eaux de P3' et P4), avec une abondance du Ca^{2+} sur le Na^+ . Par contre, le Na^+ est l'élément plus dominant que la Ca^{2+} dans les eaux de surface.

D'autre part, les anions les plus abondants dans les eaux de la zone d'étude, sont les chlorures (dans presque toutes les eaux). Les concentrations varient entre 85 et 1434 mg/l pour les chlorures, entre 219 et 488 mg/l pour les bicarbonates (HCO_3^-), entre 56 et 548 mg/l pour les sulfates (SO_4^{2-}) et entre 0 et 19 mg/l pour les nitrates (NO_3^-).

Les chlorures sont les anions prédominants surtout dans les eaux souterraines (les eaux des puits P3' et P4).

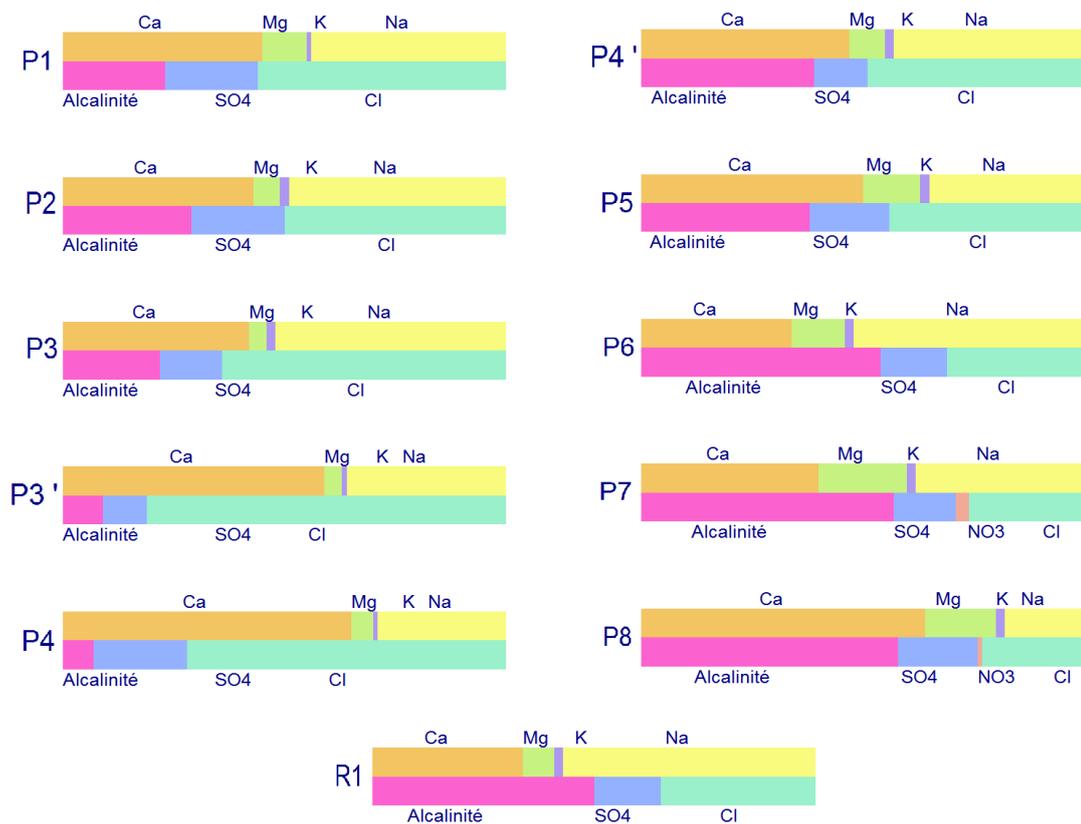


Figure 36 : Projection des résultats des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de STABLER.

c. Evolution des faciès chimiques des eaux

Selon la projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme SCHOELLER (Figure 37), les eaux ont une dominance apparente en élément chlorure, avec une légère évolution aperçu de l'amont vers l'aval. Les courbes montrent un parallélisme témoignant d'une certaine évolution graduelle de la chimie l'eau dans l'espace

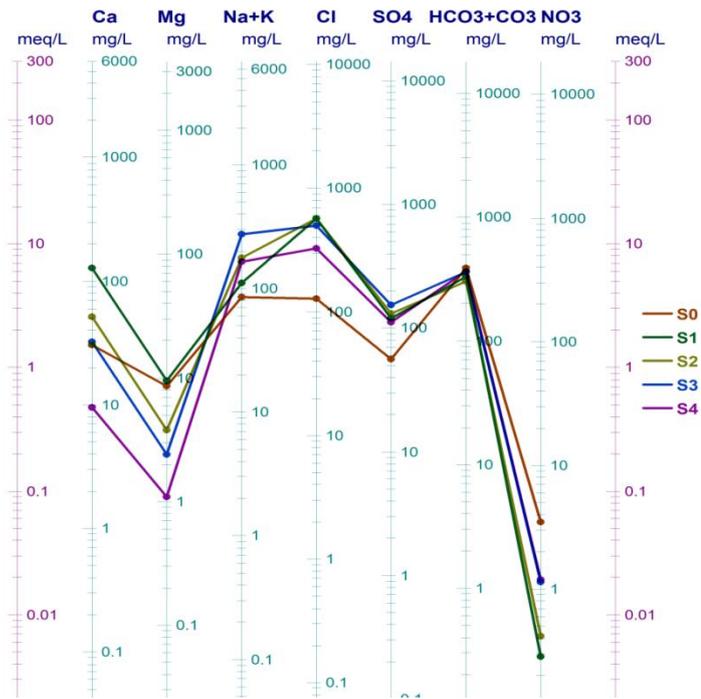


Figure 37 : Projection des résultats des analyses des eaux de surface sur le diagramme de SCHOELLER

Quant aux eaux souterraines, la projection des résultats sur le diagramme de SCHOELLER (Figure 38) confirme l'abondance dans ces eaux du chlorure et du calcium. Aussi pour ces eaux le parallélisme des courbes témoigne d'une certaine évolution allant de l'amont vers l'aval.

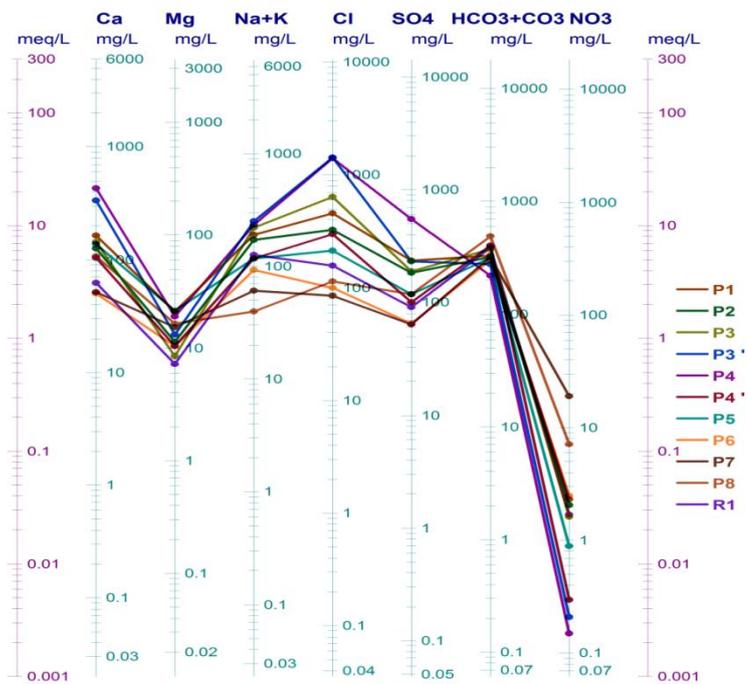


Figure 38 : Projection des résultats des analyses des eaux souterraines sur le diagramme de SCHOELLER

Selon la projection de Piper, les eaux de surface sont caractérisées par la présence de trois faciès d'eau qui montrent une évolution spatiale. Ces faciès sont de types:

- chlorurée et sulfato- calcique et magnésienne (S1 : amont affluent),
- chlorurée et sulfato-sodique (S2, S3 et S4),
- bicarbonaté sodique et potassique (S0 qui est la référence pour les eaux de surface).

Le chemin évolutif de ces eaux est en relation avec leur origine. Les eaux du Affluent s'enrichit davantage, en allant de l'amont vers l'aval, en chlorure et en sodium au dépend du calcium et du magnésium. Par contre, les eaux de l'oued N'fis montrent une évolution d'une eau riche en bicarbonate (S0) vers une eau riche en chlorure (S4). Cette évolution est le résultat de la rencontre entre les eaux de l'Oued N'fis et les eaux de l'affluent. L'eau S4 est donc un mélange des eaux de N'fis (faciès carbonaté) et les eaux de l'affluent avec un faciès franchement chloruré (Figure. 39).

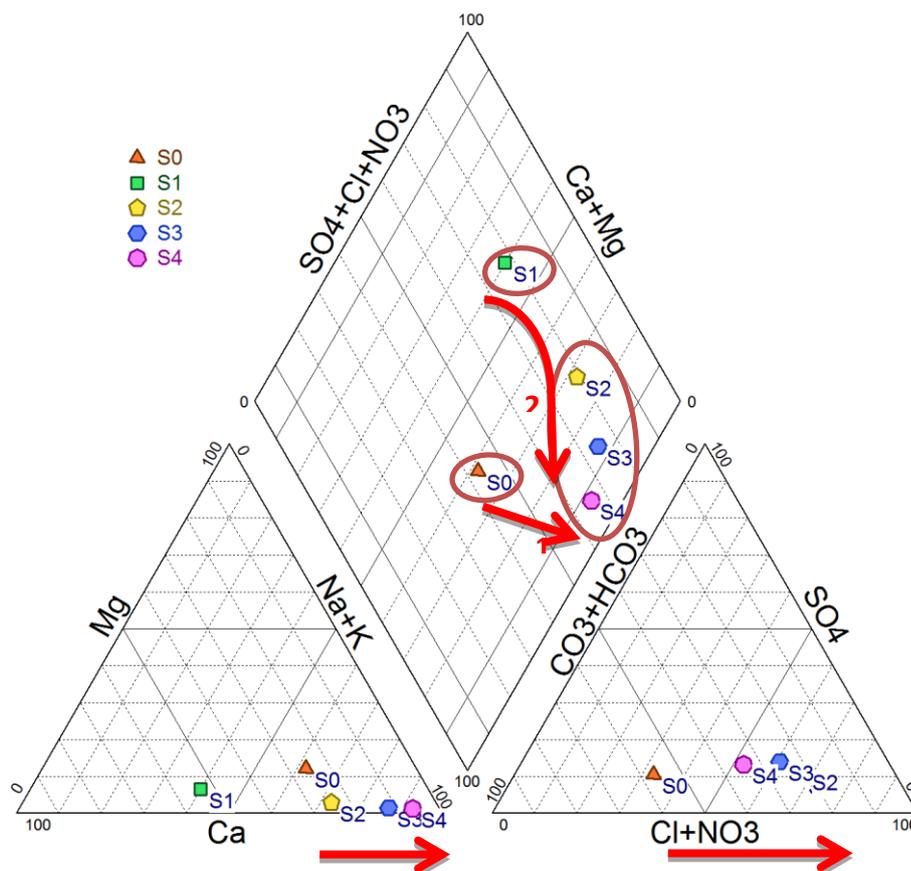


Figure 39 : Projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme de piper.

Les eaux souterraines présentent des faciès chimiques hétérogènes. La projection des analyses sur le diagramme de Piper révèle 4 types d'eau :

- eau des puits P3' et P4 avec faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien,
- eau des puits P1, P2, P3, P4' et P5 ont un faciès qui se situe à la limite entre chlorurée, sulfato-calcique et magnésienne et chlorurée sulfato-sodique.
- Eau des puits P7 et P8 avec un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.
- Eau des puits P6 et R1 dont le faciès est bicarbonaté sodique et potassique.

Sur la projection, les eaux montrent une évolution de l'amont vers aval (schématisée en flèche et en numéros 1, 2, 3). Les eaux des points P7 et P8 qui constituent les eaux de l'amont (non affecté par les ruissèlements de la mine), montrent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Ce faciès change en ruisselant vers l'aval. Cet enrichissement suit trois évolutions (Figure 40) :

La première évolution est vers l'ouest de la zone (n° 1). Les eaux représentées par P6 et R1 tendent à s'enrichir en sodium et potassium et s'appauvrissent en calcium et magnésium. L'enrichissement en sodium au dépend du calcium, est dû, probablement, à un échange cationique. Les eaux de l'amont riches en calcium (affecté par la dissolution des calcaires abondant dans l'encaissant), percolant vers l'aval dans la région ouest échange avec la formation quaternaire caractérisée par la présence des argiles et les grès. L'échange se fait, également, avec les faciès schisteux surtout, au voisinage du barrage.

La deuxième évolution concerne la partie avale de la zone d'étude (P1, P2, P3, P4'etP5). Les eaux de cette partie du bassin, montrent une évolution des eaux vers un enrichissement en sulfates et en chlorures (n°3) et un léger appauvrissement en bicarbonate. L'enrichissement en sulfates serait la conséquence de l'oxydation des sulfures présents en abondance dans la zone (formations carbonifères et haldes).

Vers la zone centrale (n°2) du site d'étude, les eaux des puits P4 et P3' montrent les faciès les plus évolués, avec un enrichissement en chlorures.

En conséquence, l'acquisition de la minéralisation est due, en grande partie, pour les eaux des zones aval et central à la dissolution des dépôts alluvionnaires (quaternaire). Cet effet rend les eaux de l'aval du site d'étude plus minéralisé que l'amont.

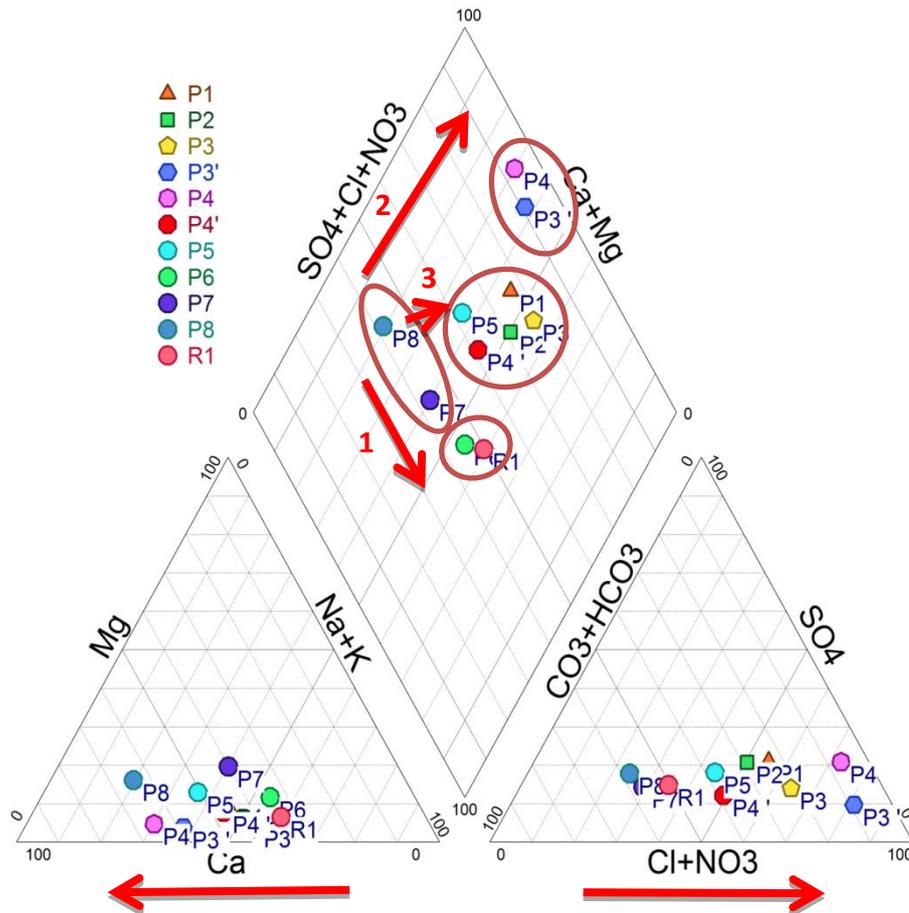


Figure 40 : Projection des analyses des eaux souterraines sur le diagramme de PIPER.

d. Analyse en composante principale

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse de données utilisées en statistique multivariée. Elle consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre les variables aléatoires quantitatives et les individus. Dans notre cas, la conductivité le pH et les éléments majeurs (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) constituent les variables alors que les points d'eau constituent les individus.

L'objectif de l'établissement de cette analyse est de faire une description des caractéristiques hydro-chimiques et de classer les eaux selon des groupes.

Sur la matrice de corrélation représentée par le tableau VII, on remarque que la valeur de Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et SO_4^{2-} sont fortement corrélable avec la conductivité (coefficients supérieurs à 0,6).

Tableau VII : Matrice de corrélation entre les variables.

Variables	pH	Conductivité	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
pH	1									
Conductivité	-0,399	1								
HCO ₃ ⁻	-0,035	-0,581	1							
Cl ⁻	-0,359	0,985	-0,629	1						
NO ₃ ⁻	0,073	-0,461	0,166	-0,410	1					
SO ₄ ²⁻	-0,481	0,795	-0,589	0,810	-0,305	1				
Na ⁺	-0,122	0,807	-0,486	0,740	-0,529	0,606	1			
K ⁺	-0,271	0,622	-0,240	0,562	-0,382	0,493	0,825	1		
Ca ²⁺ *	-0,668	0,835	-0,579	0,866	-0,266	0,876	0,463	0,390	1	0,565
Mg ²⁺	-0,698	0,121	-0,232	0,139	0,230	0,389	0,201	0,110	0,565	1

Sur l'ensemble des eaux, le diagramme de l'ACP (Figure 41) montre que le premier axe factoriel (F1) explique à lui seul 54,71 % de la dispersion des nuages des variables, c'est un axe de salinité qui associe les teneurs en Cl⁻, Ca²⁺, Na⁺, K⁺ et SO₄²⁻ à la conductivité dans le sens positif et HCO₃⁻ dans le sens négative. Le deuxième axe factoriel (F2) qui explique 20,69 % est lui associé Mg²⁺, NO₃⁻ dans le sens positive, et le pH dans le sens négative.

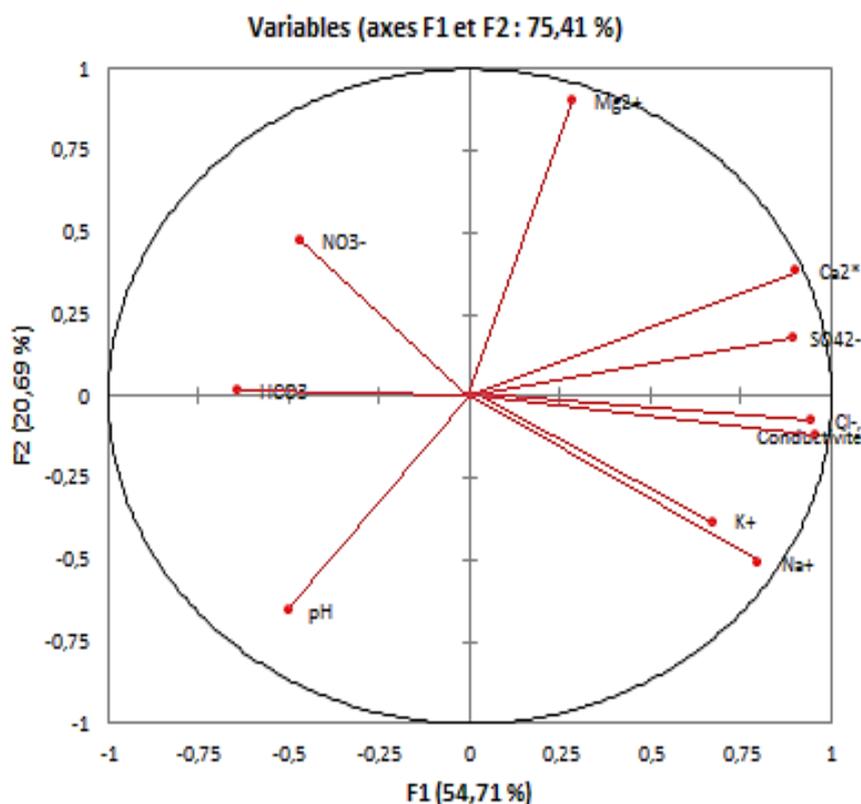


Figure 41 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 :75,41%).

Sur le diagramme des contributions des observations, on peut distinguer quatre familles d'eau qui se comportent différemment (Figure 42) :

- Groupe A : Les eaux de ce groupe sont liées positivement à l'axe F2. Elles sont constituées par les eaux référents (eau aval) de l'étude (P7 et P8). Ces eaux sont les moins minéralisées, avec des faibles valeurs de conductivités.
- Groupe B : constituer par les eaux riches en bicarbonates (P1, P2, P3, P4', P5, P6, R1, S0 et S1) et liées négativement à l'axe F1. Elles sont modérément minéralisées.
- Groupe C : constituer uniquement par les eaux de surface (S2, S3 et S4) qui sont positivement liées à l'axe F2. Ces eaux sont enrichies en sodium potassium avec des pH élevés.
- Groupe D : c'est le groupe d'eau le plus chargé en minéralisation et constituent une importante liaison avec la partie positive de l'axe F1. Les eaux de ce groupe représentés par P3' et P4 sont enrichies en Cl^- , SO_4^{2-} et en Ca^{2+} .

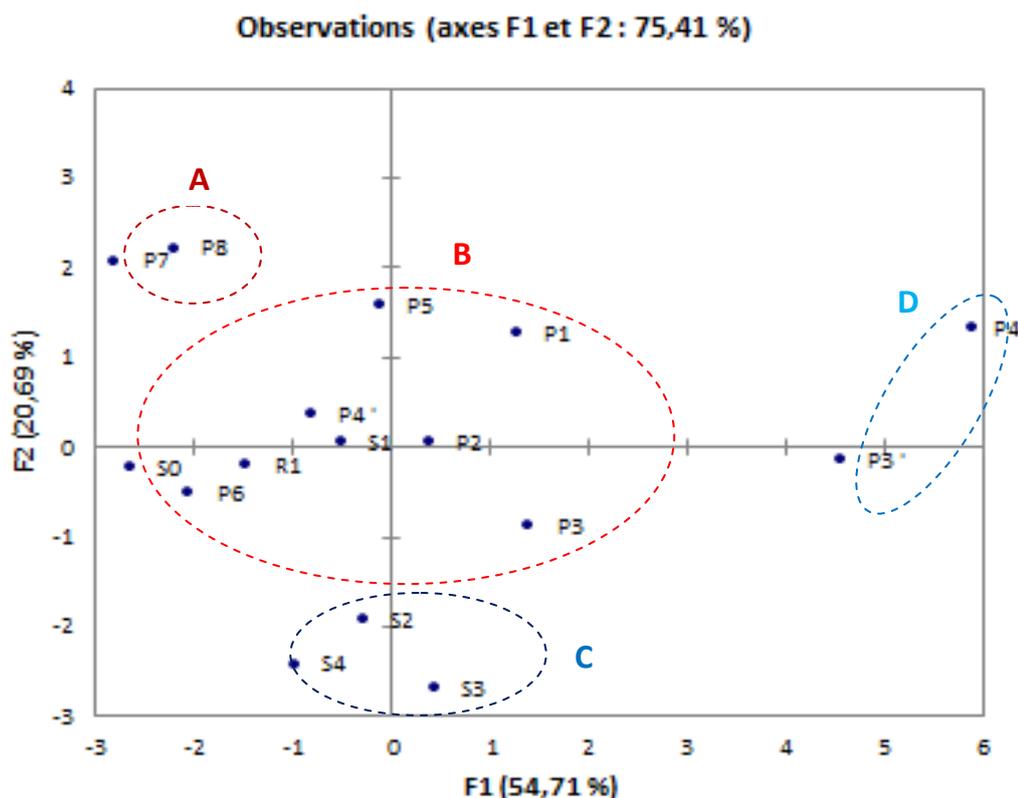


Figure 42 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 :75,41 %).

e. Indices de saturation.

La composition chimique globale d'une eau peut être influencée par certaines phases solides. Afin de visualiser le comportement d'une eau vis-à-vis de ces phases, le programme de calcul géochimique « PHREEQC » a été utilisé afin de calculer les indices de saturation.

Le programme utilise l'équation de DEBYE-HUCKEL, pour le calcul des coefficients d'activité ionique. Cette équation sert à visualiser la distribution de toutes les espèces en solution, et de calculer leurs saturations vis-à-vis d'un minéral donné.

Les valeurs d'IS égale à 0 indiquent un état d'équilibre entre l'eau et la phase minérale dissoute. Une valeur négative signifie une sous-saturation et une valeur positive montrent la sursaturation vis-à-vis de ce minéral. Quand une solution est sous-saturée, cela signifie que le minéral a tendance à la

dissolution la roche contenant ce minéral (on parle d'une eau agressive). Par contre une eau à saturation dépose l'excès de cet élément sur les roches (on parle d'une eau incrustante).

Pour les eaux qui concernent la présente étude, les indices de saturation (IS) simulé comportent uniquement les minéraux sédimentaires (Calcite, gypse, halite et dolomite).

Les eaux de surface (Figure 43) connaissent une sous saturation vis-à-vis de l'halite, et le gypse. La calcite est en sursaturation pour toutes les eaux, sauf pour les eaux issues de S4, où elle est en équilibre. La dolomite est en sursaturation pour S0, S1, et S3, les eaux de S3 sont en équilibre et les eaux issues en S4 sont en sous saturation vis-à-vis à cet élément.

A noter que la station de S2 connaît de forts encroutements calcaires.

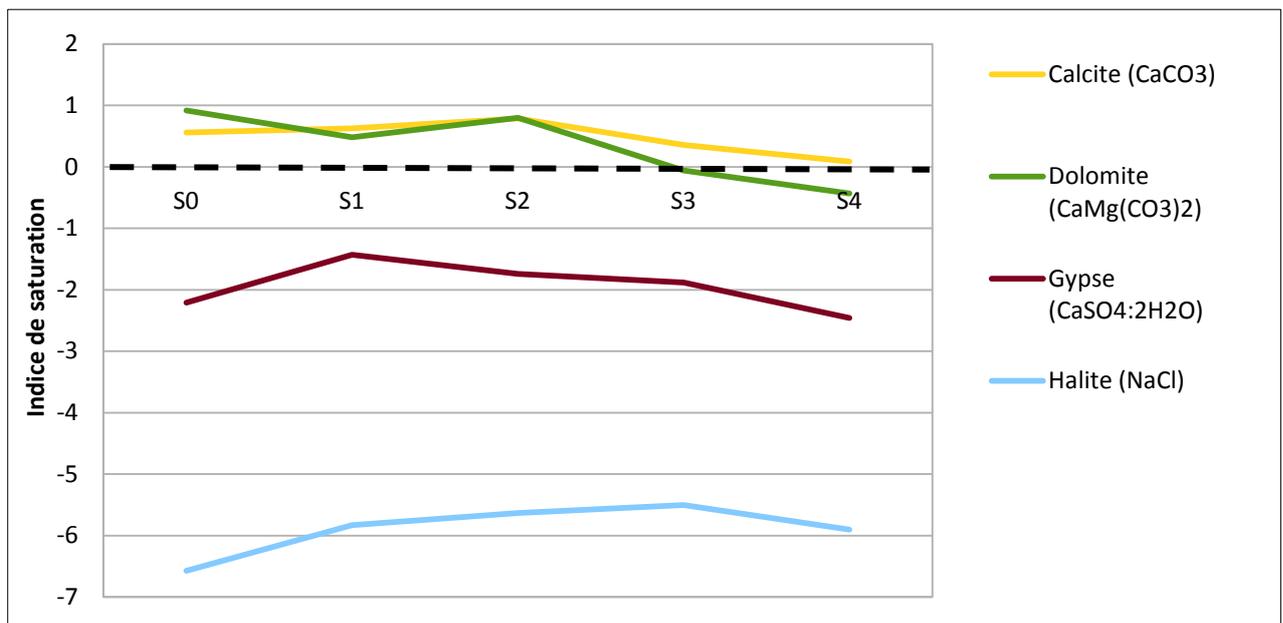


Figure 43 : Figure 43 : Indices de saturation par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite des eaux de surface.

Les eaux souterraines connaissent une sous saturation vis-à-vis l'halite, du gypse (Figure 44). Par contre celles montrent un certain équilibre pour la calcite sauf pour les eaux de P6, qui est en saturation. Les dolomites sont en sous saturation pour les eaux de P2, P3, P3', P4, P4', P5, P8 et R1 et en sursaturation pour les eaux de P6 et P7.

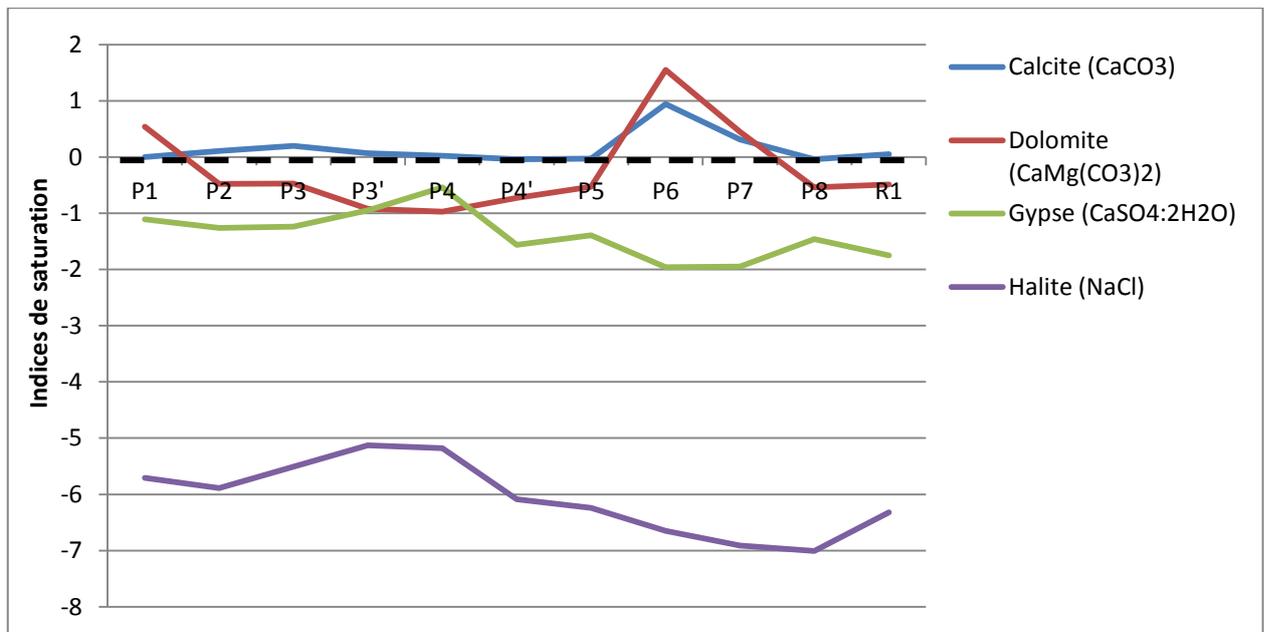


Figure 44 : Indices de saturation par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse, et l’halite des eaux souterraines.

De ce fait, les eaux de la zone d’étude semble agressives vis-à-vis des minéraux évaporitiques gypsifères et chlorurés (gypse et halite). Par contre l’incrustation des calcaires semble marquer les eaux de surface, et les eaux du point P6.

e. Origine de la minéralisation des eaux

Afin de conclure la partie hydrochimique de la présente étude, une hypothèse sur l’origine probable de la minéralisation sera avancée.

Le résultat obtenu en ACP a montré l’existence de fortes corrélations entre la conductivité d’une part et les sulfates, le calcium et les chlorures d’autre part (les autres éléments ne seront pas pris en compte à cause de leur faible contribution dans la minéralisation des eaux). Les fortes minéralisations des eaux sont donc, essentiellement, dues aux concentrations de ces éléments (surtout les eaux souterraines en aval de la mine).

L’origine des sulfates dans les eaux de la zone est diverse. Ils peuvent provenir de l’oxydation des sulfures notamment la pyrite et la pyrrotine (constituant la majeure partie des dépôts de la digue). Aussi, les sulfates peuvent avoir comme origine la dissolution d’éventuelles formations gypsifères. En effet, quelques traces de gypses sont trouvées au niveau des bords de l’oued N’fis. Les formations viséens profondes peuvent également contenir des quantités de soufre potentiellement oxydable (AIT LEMKADEME, 2010).

Les fortes concentrations en chlorures dans les eaux, surtout celles circulant en aval immédiat de la mine, seraient liées à l’effet de l’évaporation au niveau des bassins de rétentions, aux lessivages des dépôts mio-pliocène et quaternaire qui contiennent parfois quelques évaporites ainsi qu’à l’arrivée d’eau circulant en profondeur. Ces dernières peuvent contenir plusieurs dizaines de g/l de Cl⁻ et peuvent remonter à la surface par les activités de la mine.

Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ permet d'identifier la nature des carbonates dans l'eau (Tableau VIII). Le rapport des échantillons (Annexe IV) est largement supérieur à 2 (de 3,52 à 25,44). Ce qui prouve que l'origine de l'ion Ca^{2+} est liée à la fois à la présence de la calcite (CaCO_3) et du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Les concentrations en Ca^{2+} restent tous de mêmes plus affectées par la présence de dépôts carbonatés que par les formaterions contenant du gypse.

Tableau VIII : Critères d'identification de l'origine de la salinité (YELLE, 2003).

$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ $\text{Cl}^- / \text{Na}^+ = 18$	Marque de l'eau de mer (intrusion saline)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$	Présence de gypse (CaSO_4) ou de calcite (CaCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} = 1$	Présence de dolomie (CaMgCO_3)
$\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1$	Marque de l'eau de mer (intrusion saline) ou échange de bases
$\text{K}^+ / \text{Na}^+ = 1$	Terrain cristallin

Afin de justifier les différentes hypothèses avancées, une étude isotopique est nécessaire.

3. ETM dans les eaux au voisinage de la mine

Le cuivre et le zinc sont des éléments chimiques présents en abondance dans les rejets liquides et solides de la mine. La présente partie présentera les différents et se limitera uniquement au cuivre et au zinc.

- le cuivre (Cu)

Les eaux de surface sont enrichies en cuivre par rapport aux eaux souterraines (Figure 45). Les eaux de S0 montrent les plus faibles concentrations (1.5 mg/l). A l'opposé, les eaux de l'affluents et les eaux de l'aval de N^o fis présentent des concentrations relativement importantes allant de 7,5 et 14 mg/l. La plus forte concentration (14 mg/l) est enregistrée au niveau de la station S2.

Les fortes concentrations en cuivre seraient liées à la libération des eaux résiduelles qui pourraient contenir des fortes teneurs en cuivre. Ce cuivre est issu des procédés de traitement des sulfures de cuivre (chalcopryrite). Une étude des eaux résiduaires est fortement conseillée.

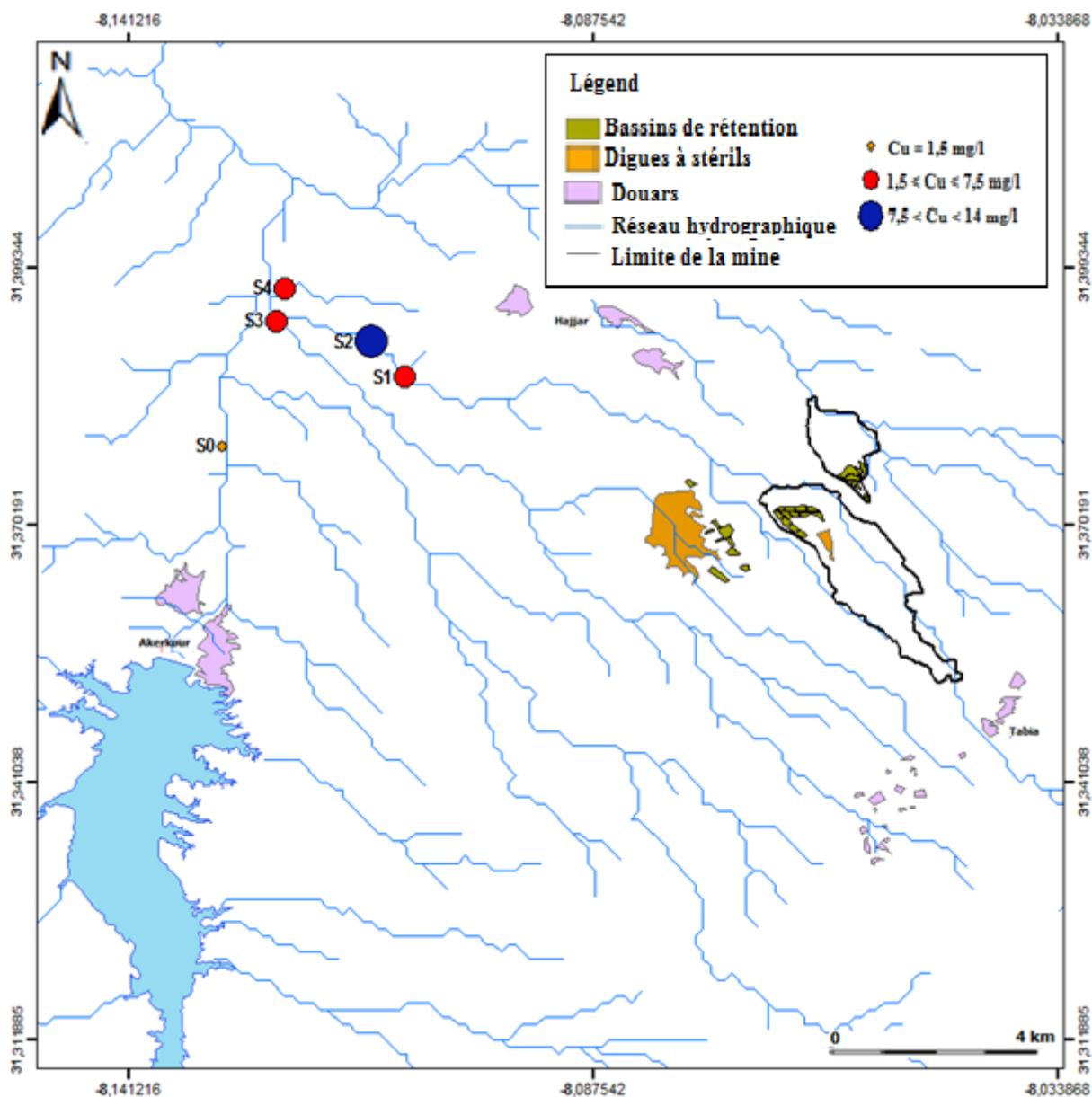


Figure 45 : Variations des concentrations en cuivre pour les eaux de surface.

Les eaux souterraines ont révélé des fortes valeurs en cuivre au voisinage de la mine. Les eaux de R1, P6 et P2 ont des valeurs inférieures à 2,5 mg/l. La plus forte concentration est enregistrée au niveau de P5. Les puits en aval de la mine ont des valeurs entre 2,5 et 5 mg/l.

La forte concentration au niveau du P5, qui se trouve relativement loin de la mine, serait liée à l'interaction entre l'encaissant et l'eau. En effet, le puits P5 est creusé en plein tufs d'Imarine. Cette zone du secteur est riche en soufre. La carte de l'indice de soufre (Figure 46) conforte cette hypothèse, puisque, c'est à ce niveau que commencent à apparaître indices de soufre les plus forts. Ces forts indices sont liés à la présence de pyrrhotite (probabilité de présence des incrustations de chalcopryrite dans la pyrrhotine).

Par contre, les puits en aval de la mine sont enrichis en cuivre probablement grâce à l'infiltration des eaux de ruissellement chargée en cuivre issu des digues (haldes).

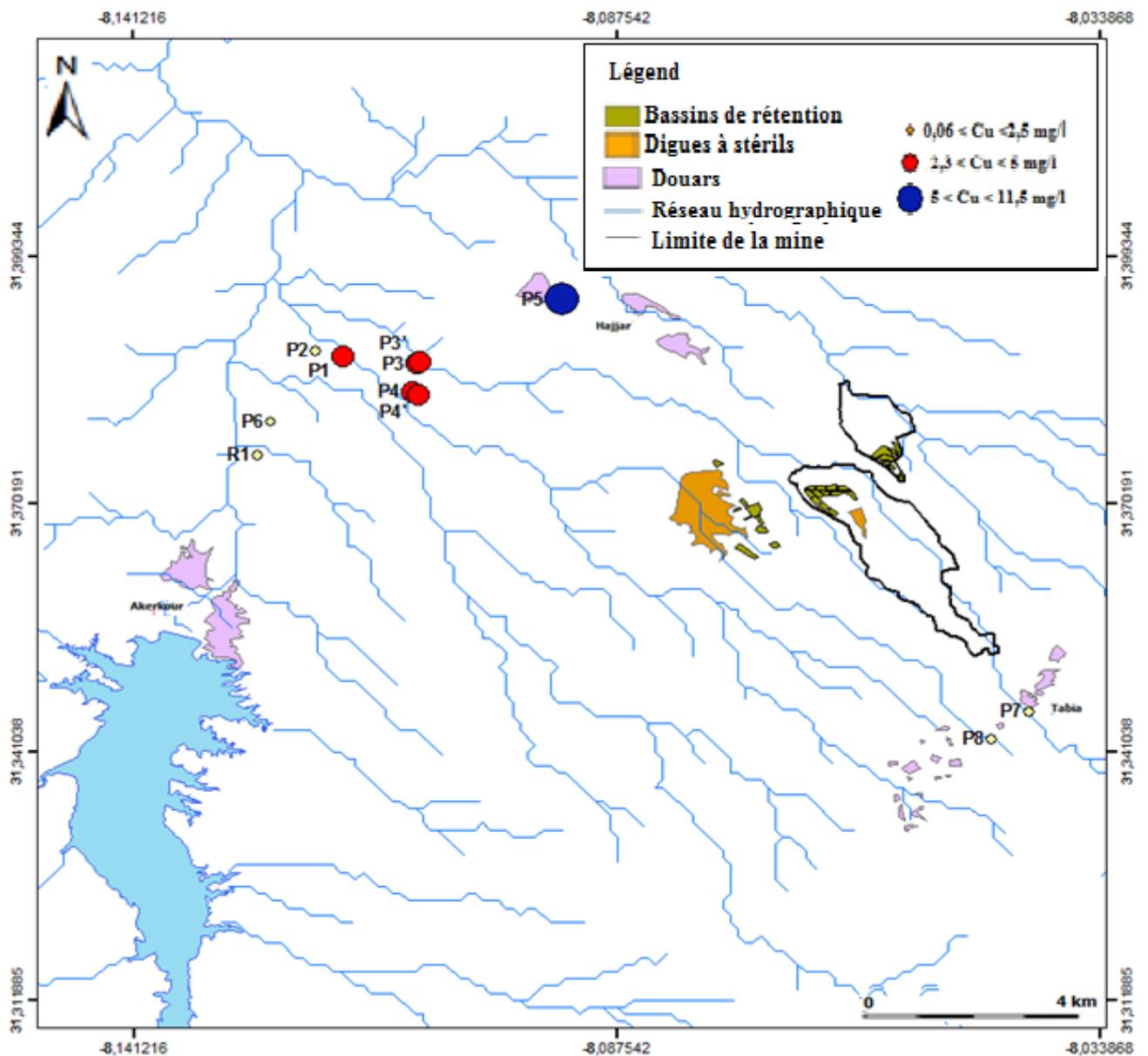


Figure 46 : Variations des concentrations en cuivre pour les eaux souterraines.

a. Zinc

Les eaux de surface (Figure 47) ont des valeurs de zinc aux alentours de 5 mg/l (entre 5 et 6 mg/l). La station S1 (situant directement en aval de la mine) est plus enrichit en zinc que la station S0 (station amont de N'fis). Cette valeur excessive est due probablement à une contamination entre les échantillons lors de l'étape de filtration.

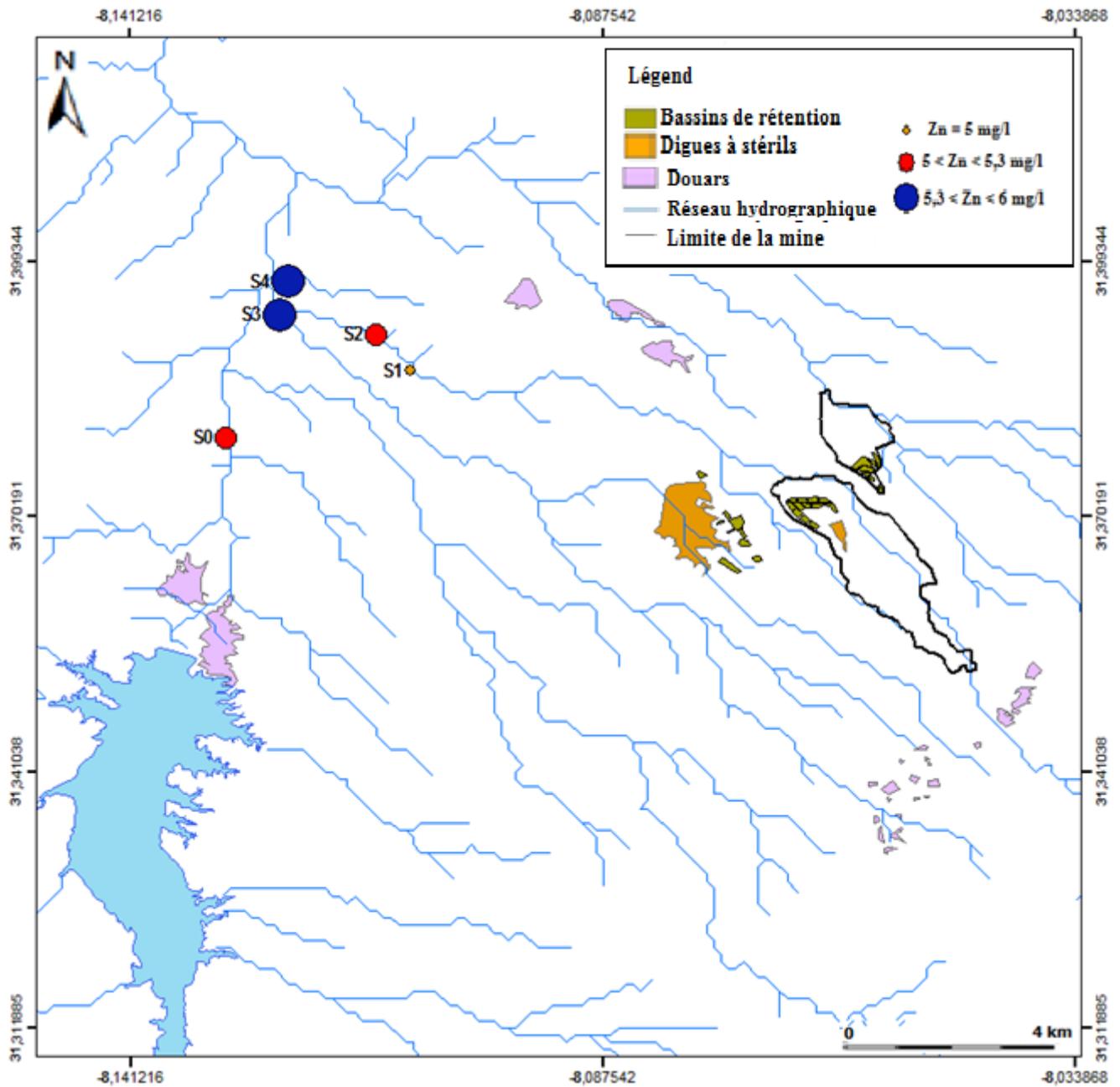


Figure 47 : Variations des concentrations de zinc pour les eaux de surface.

La teneur en zinc dans les eaux souterraines est importante (entre 3,5 et 9 mg/l) par apport à l'eau de surface. Les eaux issues de R1 et P7 ont des concentrations en zinc inférieure à 4,14 mg/l. Les points d'eau situés en aval immédiat de la mine et le point P7 (amont) ont des concentrations entre 4,14 et 6 mg/l. Les eaux situés un peu plus loin de la mine, ont des teneurs un peu élevée (entre 6,5 et 9).

Les valeurs enregistrées au niveau de l'aval direct de la mine sont probablement dues à l'infiltration des eaux des bassins de rétention. Par contre la teneur enregistré au niveau de P7, ne peut avoir comme origine que l'encaissant du réservoir.

Les fortes teneurs sont supposées être dues à l'accumulation des infiltrations des eaux résiduelles de la mine. Par contre la valeur enregistrée au niveau du puits P5, peut avoir comme origine l'encaissant (même remarque pour le même puits en cuivre et en zinc).

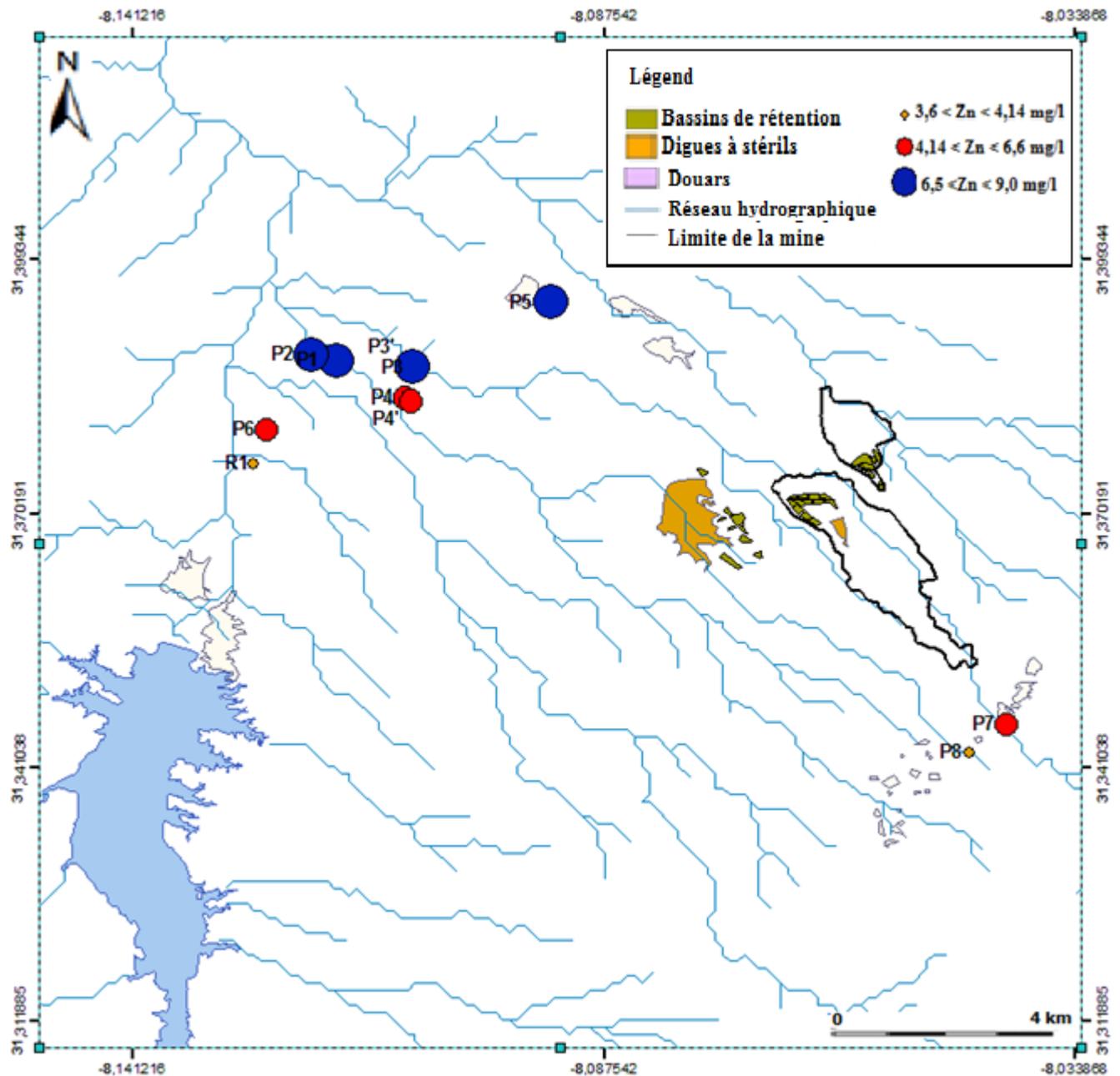


Figure 48 : Variations des concentrations de zinc pour les eaux souterraines.

Les résultats des analyses des ETM (Cu et Zn) dans les eaux indiquent une certaine contamination métallique. Cette contamination peut avoir deux origines probables. La première origine provient de la nature de l'encaissant (c'est le cas de P5). La deuxième origine est peut être dues à l'infiltration des eaux résiduelles de la mine vers les eaux souterraines.

Ni la première ni la deuxième origine ne peut être tenue car il faut tout d'abord connaître en détail la nature géochimique de l'encaissant. Aussi afin de confirmer l'infiltration des polluants depuis les

eaux résiduelles de la mine, il faut procéder à une étude détaillée de ces eaux. Tout de même l'étude de mécanisme d'infiltration en sous-sol reste impérativement importante avant de confirmer les résultats obtenus.

Pour conclure, l'étude hydrochimique des eaux de la mine, a montré existence de plusieurs éléments dissous en abondance au voisinage du site minier. Ces éléments sont essentiellement issues de la dissolution des carbonates et des remontés des circulations hydrothermaux profondes. En outre la présence du zinc et du cuivre dans les eaux peut avoir comme origine l'encaissant de la région et non forcément les rejets de la mine.

D- NORMES ET QUALITE DES EAUX DANS LA ZONE D'ETUDE

Selon l'OMS, pour être potable, une eau ne doit pas contenir des germes de maladies à transport hydrique, ni de substances toxiques, ni des quantités excessives de matières minérales et organiques. Elle doit par ailleurs être limpide, incolore et ne présenter aucun goût ou odeur désagréable. Les qualités requises sont d'ordre bactériologique et physico-chimique.

Pourtant les eaux destinés à l'irrigation doit avoir une faible dureté, une salinité modérée et pas trop concentré en polluant métallique.

Le présent chapitre classera les eaux de la zone d'étude selon les normes adaptés au Maroc (normes de potabilité et d'irrigation).

1. Notion de pollution et normes de qualité

La mauvaise qualité de l'eau peut être induite par des activités anthropiques ou par des phénomènes naturels. Dans la plupart des cas, la pollution s'entend comme un dépassement aux normes, définies en fonction des usages de l'eau. Cette définition est cependant restrictive car elle ne tient pas compte de la notion de flux polluants (quantité de pollution), ni des phénomènes non liés à un rejet mais qui créent un potentiel de pollution. Elle intègre ainsi toutes les actions directes ou indirectes susceptibles d'apporter une dégradation des paramètres caractéristiques de l'eau.

On distingue différentes natures de polluants : les polluants chimiques minéraux (tous les éléments solubles) ou organiques (matière organique, hydrocarbures, organochlorés...) et les polluants biologiques (bactéries, virus et champignons) et les polluants physiques (matières en suspension, la température, la radioactivité, etc.).

La pollution se définit également en fonction de sa répartition spatiale et temporelle. Elle peut être diffuse, c'est à dire de faible intensité mais qui concerne une grande surface (pollution d'une nappe peu profonde par des pesticides), ou à l'inverse localisée (pollution de l'eau d'un puits par un ETM). De plus, elle peut être chronique (apport de polluant en continue), occasionnelle ou cyclique (flux de pollutions au moment des pluies, par exemple).

2. Loi et législation sur les normes et la qualité des eaux

Au Maroc, la législation qui contrôle l'activité minière est représentée sous forme du dahir du 16 avril 1951 (9 Rejeb 1370). Cette loi relativement ancienne qui règle le secteur, été élaborée à un moment où la protection de l'environnement n'avait pas une importance prioritaire.

Actuellement, avec tous les dangers mis en évidence que présente cette activité, il est devenu une obligation de revoir le côté de protection de l'environnement dans ce dahir.

Malgré l'absence des décrets qui orientent l'activité minière vers une bonne réglementation qui tient compte de la protection de l'eau et de l'environnement, la législation Marocaine compte des lois récentes plus rigoureuses en matière de réglementation et de normes. Ces lois sont :

- La loi 10-95 sur l'eau.
- La loi 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination.
- La loi 11-03 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement.
- La loi 12-03 relative aux études d'impact sur l'environnement.
- Le décret n° 2-04-553 relatif aux déversements, écoulements, rejets dépôts directs ou indirects dans les eaux superficielles.
- Le décret n° 2-97-787 relatif aux normes de qualité des eaux et à l'inventaire du degré de pollution des eaux.
- Le décret n° 2-05-1326 relatif aux eaux à usage alimentaire.

La loi de l'eau décrit plusieurs grilles de normes des eaux selon les types de pollutions potentiels à atteindre l'eau. Ces grilles sont :

- Décret n° 2-97-787 du 4 février 1998 : relatif aux normes de qualité des eaux.
- Arrêtés du 17 octobre 2002, n° 1275-01 : grille de qualité des eaux de surface.
- Norme n° 1276-01 : normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation.
- Norme n° 1277-01 : normes de qualité des eaux superficielles utilisées pour la production de l'eau potable.

Les normes de qualité Marocaine vis-à-vis l'eau et la protection de l'environnement sont fixées par les arrêtés conjoints des ministres chargés de l'eau et de l'Environnement après avis du ministre de la Santé et du ministre dont relève le secteur concerné par les normes à fixer. Elles sont révisées tous les dix ans ou chaque fois que les besoins les demandent (art. 2 du décret n° 2-97-787). Les sources de références pour ces normes ont été adaptées auprès des normes et les recommandations de l'organisation mondiale de la santé (OMS), les normes de la Communauté Economique Européenne (C.E.E) ainsi que les normes américaines.

Les agences des bassins Hydrauliques sont perçues comme étant des organismes mis par le législateur à la disposition des usagers de l'eau et de l'ensemble des intervenants dans le secteur de l'eau. Aussi leur rôle se focalise sur le contrôle, la gestion et l'exécution dans les cas d'une détection de pollution ou de contamination. Ce pouvoir est présenté sous forme de la « Police de l'eau ». Mais le rôle de ces agences reste trop restreints en matière de contrôle et d'exécution des réglementations.

4. Qualité des eaux au voisinage de la mine

a. Par rapport à la potabilité

A l'évidence les habitants des villages Imarine, Tawerda, Tiwli, Lahjar, Lamrah, Toukhriben, Akhlij, et Tabia n'ont pas une autre source d'eau à consommer que les eaux des sources et les eaux souterraines disponibles en absence de toute liaison avec le réseau d'eau potable. Déjà en effectuant les prélèvements des eaux, les villageois plaignent de la dureté de l'eau et sa rareté en période de sécheresse.

Cette partie du mémoire comparera les résultats des eaux souterraines et des eaux de sources avec la grille de normes. Cette comparaison est effectuée pour les éléments ou la norme est décrite dans la grille de qualité.

Les grilles de qualité des eaux utilisées sont les normes de potabilité et les normes d'irrigation (annexe II, III et IV). La comparaison entre les eaux et les normes sont remporté dans le tableau IX.

La classification des eaux été effectuer comme suite :

- Excellente qualité : couleur bleu (+ +).
- Bonne qualité : couleur verte (+).
- Moyenne qualité : couleur jaune (0).
- Mauvaise qualité : couleur violet (--).
- Très mauvaise qualité : couleur rouge (---).

La qualité des différents points eaux au voisinage de la mine se présente comme suit :

- La température, le pH et les nitrates dans tous les échantillons répondent aux normes de potabilité (bonne à excellente qualité).
- Les échantillons S1, S2, S3, S4, P1, P2, P3 et P4' ont une conductivité classé selon les normes de potabilité de moyenne qualité. Les échantillons P3' et P4 sont hors normes. Pour le reste des eaux, ils répondent aux normes de potabilité.
- L'oxygène dissous est hors norme en P3 et P8, en normes moyenne dans les échantillons P3, P3', P4', P5 et P7., et en normes pour le reste des échantillons.
- Les chlorures sont supérieurs aux normes dans la plupart des échantillons, sauf pour S0, R1, P4' et P5 (dans les normes).
- Les sulfates sont dans les normes sauf pour P1, P3' et P4.
- Les ETM dans les eaux dépassent largement des normes pour la totalité des échantillons.

Tableau IX : Grille de classification des eaux selon les normes de potabilité.

Echantillons Paramètres	Eaux de surface					Eaux souterraine										Eau de source	
	S0	S1	S2	S3	S4	P1	P2	P3	P3'	P4	P4'	P5	P6	P7	P8	R1	
Physico-chimiques																	
T°	++	++	+	+	+	+	+	++	+	+	+	+	++	++	+	+	
pH	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Conductivité	+	0	0	0	0	0	0	0	--	--	0	+	++	++	+	+	
O2 dissous	+	+	+	++	++	0	+	---	0	+	0	0	+	0	--	+	
Cl-	++	0	0	0	0	0	0	0	--	--	+	+	--	--	--	+	
SO42-	++	+	+	+	+	0	+	+	0	--	++	+	++	++	+	+	
Substances indésirables																	
NO3-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+
Zn	---	---	---	---	---	---	0	---	---	---	---	---	---	---	0	0	0
Cu	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0	---	---

Globalement, on peut dire que la qualité des eaux au voisinage de la mine s'avère bonne à moyenne pour les paramètres physico chimiques. Mais par rapport aux ETM, toutes les eaux sont considérées de mauvaise qualité.

b. Par apport à l'irrigation

L'eau destinée à l'irrigation doit obligatoirement répondre à la norme relative à l'irrigation (annexe IV). Ces normes sont limitées uniquement aux paramètres bactériologiques, parasitologiques et toxiques. La comparaison de nos eaux avec ses normes est ajustable, faute de manque de ces analyses.

Pour cette raison, la recherche d'autres méthodes de classification de la qualité des eaux pour des fins agricole, est obligatoire.

Souvent la qualité des eaux destinées à l'irrigation, s'évalue par rapport à la concentration des sels dissous dans l'eau (surtout en zone aride). C'est pour cette raison l'évaluation de la qualité des eaux destinée à l'irrigation sera évaluée par rapport au taux de salinité qu'elle contient.

Les sels contenus dans l'eau et dans le sol réduisent la disponibilité de l'eau pour les plantes aux points de nuire à leurs développements et par la suite leurs rendements.

Afin d'estimer l'impact des eaux sur l'irrigation, le RAS (ratio d'absorption en sodium) sera calculé, selon la relation décrite en RIEU, (1981) :

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})^{1/2}$$

Le risque lié à la salinité des eaux sera évalué selon le tableau suivant :

Tableau X : Gille de classification des eaux d'irrigation selon leur RAS.

RAS	Risque sur les plantes
0 à 10	Faible
10 à 18	Moyen
18 à 26	Elevé
> 26	Très élevé

A noter qu'une eau avec un SAR très élevé présente des concentrations importantes en Na^+ échangeable. Ce dernier peut se substituer aux ions alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}), des argiles entraînant ainsi l'obturation des pores et par suite une imperméabilisation des sols.

Les ratios calculés pour nos eaux ont été reportés sur le diagramme de Wilcox (Figure 49). Ce dernier montre des ratios inférieurs à 8, sauf pour les eaux issues de S3 et S4 (< 14). Le premier groupe d'eau (A) sont classés parmi les eaux à faible ratio, et donc convient à l'irrigation (pour les plantes à légère tolérance aux sels). Le deuxième groupe d'eau (B), ont un ratio moyen et convient aussi à l'irrigation mais cette fois à des plantes qui tolèrent certaine salinité des eaux.

Donc les eaux au voisinage de la mine ne représentent aucun risque pour les plantations agricoles.

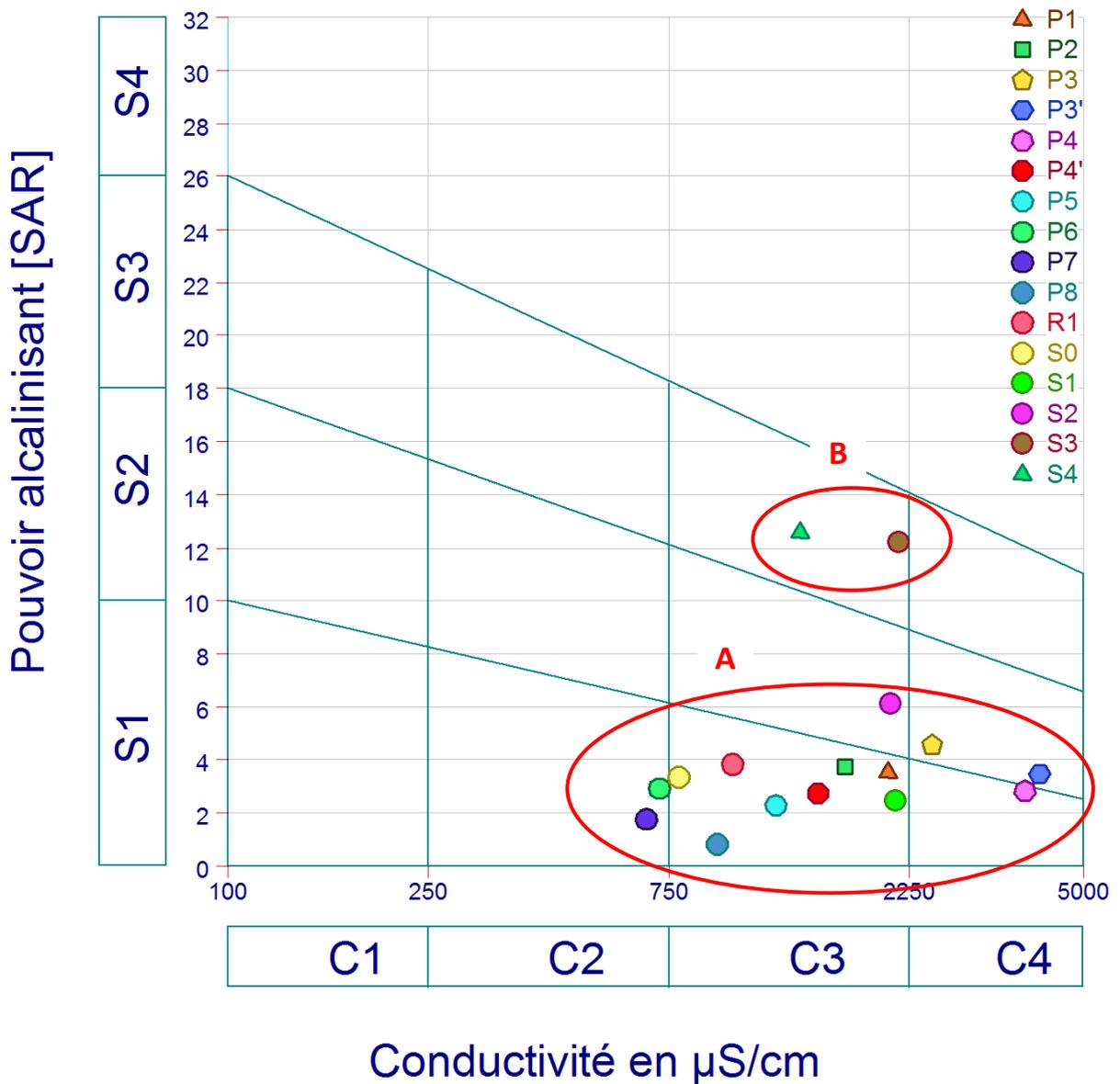


Figure 49 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation au voisinage de la mine de Hajjar.

Les eaux au voisinage de Guemassa peuvent être considérées comme eaux dans les normes des eaux destinées à l'irrigation. Mais pour confirmer cela, davantage d'analyses surtout l'analyse de qualité biologique et métallique est nécessaire.

Conclusion générale

La mine de Hajjar est un pôle minier d'une grande importance économique. La zone au voisinage de la mine est formée essentiellement de roches sédimentaire d'âge mio-pliocène et du quaternaire. Le climat de la région est aride. L'oued N'fis et ses affluents avals en plus de quelques puits et sources, constituent les seuls ressources en eau pour plusieurs village de la zone.

Par le biais d'une approche conjuguée des techniques (analyses chimique, analyses des données et télédétection), nous avons pu extraire plusieurs informations. Et ça dans le but de comprendre l'origine de la minéralisation des eaux en plus de l'estimation de sa qualité chimique.

L'extraction des indices et de la carte des linéaments a permis l'identification des zones enrichies en sulfure et connaissent une fragilité dans sa structuration. C'est l'exemple du puits P5 situé tout près des tufs d'Imarine.

L'étude du comportement hydrochimique au voisinage de la mine de Hajjar a montré l'existence de plusieurs phénomènes et interaction entre les eaux et l'encaissant.

L'analyse hydrochimique a montré l'existence des différents faciès chimiques dans les eaux. Cela a permis d'identifier les principales réactions responsables du chimisme des eaux. L'interprétation des analyses chimiques montre que l'origine des fortes minéralisations est due à la dissolution des carbonates et à la remonté des eaux profondes.

L'identification de quelque ETM avait pour but la visualisation probable des infiltrations des rejets miniers qui doivent être justifiés. Tout de même, l'encaissant de la région (formation d'âge viséen qui connait la présence de trace de sulfures) connait des enrichissements en métaux lourds.

L'évaluation de la qualité chimique des eaux dans la zone, s'est avérée être bonne, moyenne et mauvaise selon les paramètres identifiés. Le degré de contamination doit être confirmé par d'autres analyses chimiques et biologiques.

Finalement, le but de cette étude étant d'identifier le comportement chimique des eaux, les perspectives qui s'inscrivent au sein de cette démarche, sont :

- Réaliser une étude plus détaillée par télédétection, afin d'extraire le maximum d'information possible sur les minéralisations dominantes sur le site.
- Réaliser une étude de toxicité des ETM, tout en décrivant tous les états chimiques de ces éléments dans l'écosystème.
- Recensé plus de point d'eau, et faire un suivi temporelle de l'évolution de la chimie.
- Identifier les phases métalliques et leurs formes chimiques au niveau des rejets de la mine.

Annexes

Annexe n° I : Grille des résultats des analyses chimiques des eaux.

		Eau souterraine										Eau de surface					Eau de source	
Stations		P1	P2	P3	P3'	P4	P4'	P5	P6	P7	P8	S0	S1	S2	S3	S4	R1	
Paramètres physique (mesure <i>in situ</i>)	Température eau (°C)	22,5	22,5	19,2	21,6	22,9	25,0	22,9	19,8	19,4	21,6	18,5	19,7	23,7	22,1	21,6	18,7	
	pH	6,9	7,1	7,1	6,8	6,8	6,9	6,9	8,3	7,6	6,8	8,0	7,6	8,2	7,9	8,1	7,2	
	Conductivité (mS/cm)	2,040	1,678	2,500	4,080	3,830	1,486	1,220	0,721	0,678	0,937	0,787	2,110	2,070	2,150	1,371	1,003	
	Eh (mV)	167,0	160,9	161,3	176,8	173,8	168,5	168,0	97,7	154,0	177,9	112,6	133,4	98,5	116,4	109,0	154,0	
	O2 dissous	mg/l	4,67	5,06	2,96	3,72	5,25	3,55	4,40	6,96	4,61	0,82	5,47	6,23	6,69	7,14	7,35	5,31
%		54,4	58,6	32,3	42,3	61,0	43,9	51,3	74,9	51,0	8,6	58,0	68,2	78,0	81,6	83,3	56,9	
Paramètres chimiques	Anions (mg/l)	HCO3-	332	322	376	278	220	405	315	303	322	488	390	329	305	359	368	390
		Cl-	454	327	639	1434	1406	298	213	99	85	114	128	568	568	497	327	156
		NO3-	2	2	2	0	0	0	1	3	19	7	4	0	0	1	1	2
		SO42-	235	182	188	232	548	100	119	65	64	118	56	120	130	154	111	91
	Cations (mg/l)	Na+	181	164	209	240	223	110	109	87	56	34	81	108	169	266	154	120
		K+	9	9	12	12	10	7	8	6	5	6	5	3	7	11	11	7
		Ca2+	164	127	144	337	431	104	138	50	51	107	30	128	51	32	10	63
	Mg2+	21	11	9	13	19	10	21	10	15	16	9	9	4	2	1	7	
Métaux lourds	Zn (mg/l)	8	9	4	9	6	7	9	5	5	4	5	5	5	6	6	4	
	Cu (mg/l)	3	2	3	3	5	5	11	1	0	1	1	7	14	8	7	1	

Coordonnées des points d'échantillonnage :

Stations	Longitude	Latitude									
P1	-8,1179	31,3876	P4	-8,1101	31,3834	P7	-8,0417	31,3458	S1	-8,1093	31,3868
P2	-8,1209	31,3882	P4'	-8,1095	31,3830	P8	-8,0459	31,3426	S2	-8,1132	31,3909
P3	-8,1096	31,3867	P5	-8,0936	31,3943	R1	-8,1274	31,3759	S3	-8,1241	31,3932
P3'	-8,1094	31,3868	P6	-8,1259	31,3798	S0	-8,1303	31,3791	S4	-8,1232	31,3970

Annexe n° II :

Grille de qualité des eaux de surface définie par l'Arrêté conjoint du Ministre de l'Équipement et du Ministre chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement n°1275-01 du 10 chaabane 1423/ 17 octobre 2002.

Paramètres	Unités	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
		Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise
Physico-chimiques						
Température	° C	<20	20-25	25-30	30-35	>35
pH	--	6.5-8.5	6.5-8.5	6.5-9.2	<6.5 ou >9.2	<6.5 ou >9.2
Conductivité à 20 °C	µS/cm	<750	750-1300	1300-2700	2700-3000	>3000
Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	<200	200-300	300-750	750-1000	>1000
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/l	<100	100-200	200-250	250-400	>400
MES	mg/l	<50	50-200	200-1000	1000-2000	>2000
O ₂ dissous	mg/l	>7	7-5	5-3	3-1	<1
DBO ₅	mg/l	<3	3-5	5-10	10-25	>25
DCO	mg/l	<30	30-35	35-40	40-80	>80
Oxydabilité KMnO ₄	mg/l	=2	2-5	5-10	>10	--
Substances indésirables						
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/l	=10	10-25	25-50	>50	--
NTK	mgN/l	=1	1-2	2-3	>3	--
Ammonium	mgNH ₄ /l	=0.1	0.1-0.5	0.5-2	2-8	>8
Baryum	mg/l	=0.1	0.1-0.7	0.7-1	>1	--
Phosphates (PO ₄ ²⁻)	mg/l	=0.2	0.2-0.5	0.5-1	1-5	>5
P total (Pt)	mg/l	=0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-3	>3
Fer total (Fe)	mg/l	=0.5	0.5-1	1-2	2-5	>5
Cuivre (Cu)	mg/l	=0.02	0.02-0.05	0.05-1	>1	--
Zinc (Zn)	mg/l	<0.5	0.5-1	1-5	>5	--
Manganèse (Mn)	mg/l	=0.1	0.1-0.5	0.5-1	>1	--
Fluorure (F ⁻)	mg/l	=0.7	0.7-1	1-1.7	>1.7	--
Hydrocarbures	mg/l	=0.05	0.05-0.2	0.2-1	>1	--
Phénols	mg/l	=0.001	0.001-0.005	0.005-0.01	>0.01	--
Détergents anioniques	mg/l	=0.2	=0.2	0.2-0.5	0.5-5	>5
Substances toxiques						
Arsenic (As)	µg/l	=10	=10	10-50	>50	--
Cadmium (Cd)	µg/l	=3	=3	3-5	>5	--
Cyanures (CN ⁻)	µg/l	=10	=10	10-50	>50	--
Chrome total (Cr)	µg/l	=50	=50	=50	>50	--
Plomb (Pb)	µg/l	=10	=10	10-50	>50	--
Mercure (Hg)	µg/l	=1	=1	<1	>1	--
Nickel (Ni)	µg/l	=20	=20	20-50	>50	--
Sélénium (Se)	µg/l	=10	=10	=10	>10	--
Pesticides par subst.	µg/l	=0.1	=0.1	=0.1	>0.1	--
Pesticides totaux	µg/l	=0.5	=0.5	=0.5	>0.5	--
H.P.A. totaux	µg/l	=0.2	=0.2	=0.2	>0.2	--
Bactériologique						
Coliformes fécaux	/100 ml	=20	20-2000	2000-20000	>20000	--

Coliformes totaux	/100 ml	=50	50-5000	5000-50000	>50000	--
Streptocoque fécaux	/100 ml	=20	20-1000	1000-10000	>10000	--
Biologique						
Chlorophylle a	µg/l	<2.5	2.5-10	10-30	30-110	>110
Organoleptiques						
Couleur (échelle Pt)	Mg Pt/l	<20	20-50	50-100	100-200	>200
Odeur (dilu à 25 °C)	--	<3	3-10	10-20	>20	--

Annexe n° III :

Grille de qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable (normes marocaines) (b.o n° 5062 du 5.12.2002).

Catégorie		A1		A2		A3		
		G	I	G	I	G	I	
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES								
1	Couleur	mg pt/l	10	20	50	100	50	200
2	Odeur à 25°C		3	-	10	-	20	-
PARAMETRES PHYSICOCHIMIQUES								
3	Température	°C	20	30	20	30	20	30
4	pH	pH	6,5-8,5	-	6,5-9,2	-	6,5-9,2	-
5	Conductivité à 20°C	µs / cm	1300	2700	1300	2700	1300	2700
6	Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	300	750	300	750	300	750
7	Sulfates (SO ₄)	mg/l	200	-	200	-	200	-
8	MES	mg/l	50	-	1000	-	2000	-
9	O ₂ dissous	mg/l	7(90%)	-	5(70%)	-	3(50%)	-
10	DBO ₅	mg/l	3	-	7	-	10	-
11	DCO	mg/l	-	-	25	-	40	-
12	Oxydabilité KmnO ₄	mg/l	2	-	5	-	10	-
SUBSTANCES INDESIRABLES								
13	Bore	mg/l	-	1	-	1	-	1
14	Ammonium	mgNH ₄ /l	0,05	0,5	1	1,5	2	4
15	NTK	mgN/l	1	-	2	-	3	-
16	Nitrates (NO ₃)	mg/l	-	50	-	50	-	50
17	Phosphores	mgP ₂ O ₅ /l	0,4	-	0,7	-	0,7	-
18	Baryum	mg/l	-	1	-	1	-	1
19	Cuivre (Cu)	mg/l	-	1	-	1	-	1
20	Zinc (Zn)	mg/l	-	5	-	5	-	5
21	Manganèse	mg/l	-	0,1	0,1	0,1	1	-
22	Fer dissous (Fe)	mg/l	-	0,3	1	2	1	3
23	Fluorures (F)	mg/l	0,7	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5
24	Hydrocarbures dissous	mg/l	-	0,05	-	0,2	0,5	1
25	Phénols	mg/l	-	0,001	-	0,005	-	0,01
26	Détergents anioniques	mg/l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
SUBSTANCES TOXIQUES								
27	Arsenic (As)	µg /l	-	50	-	50	-	100
28	Cadmium (Cd)	µg /l	1	5	1	5	1	5
29	Chrome total (Cr)	µg /l	-	50	-	50	-	50
30	Plomb (Pb)	µg /l	-	50	-	50	-	50
31	Mercurure	µg /l	-	1	-	1	-	1
32	Sélénium (Se)	µg /l	-	10	-	10	-	10
33	Nickel (Ni)	µg /l	-	50	-	50	-	50
34	Cyanures (CN ⁻)	µg /l	-	50	-	50	-	50
35	Pesticides par subst.	µg /l	-	0,1	-	0,1	-	0,1
36	Pesticides au total	µg /l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
37	HPA	µg /l	-	0,2	-	0,2	-	0,2
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES								
38	Coliformes fécaux	/100ml	20	-	2000	-	20000	-
39	Coliformes totaux	/100ml	50	-	5000	-	50000	-
40	Streptocoques fécaux	/100ml	20	-	1000	-	10000	-

Annexe n° IV:

Tableau des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation (Normes marocaines) (B.O N° 5062 du 5.12.2002).

	Paramètres	Valeurs limites
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES		
1	Coliformes fécaux	5000/100 ml *
2	Salmonelle	Absence dans 51
3	Vibrien Cholérique	Absence dans 450 ml
PARAMETRES PARASITOLOGIQUES		
4	Parasites pathogènes	Absence
5	Œufs, Kystes de parasites	Absence
6	Larves d'Ankylostomides	Absence
7	Fluococercaires de Schistosoma hoematobium	Absence
PARAMETRES TOXIQUES		
8	Mercure (Hg) en mg/l	0,001
9	Cadmium (Cd) en mg/l	0,01
10	Arsenic (As)) en mg/l	0,1
11	Chrome total en mg/l	0,1
12	Plomb (Pb) en mg/l	5
13	Cuivre (Cu) en mg/l	0,2
14	Zinc (Zn) en mg/l	2
15	Sélénium (Se) en mg/l	0,02
16	Fluor (F) en mg/l	1
17	Cyanures (Cn) en mg/l	1
18	Phénols en mg/l	3
19	Aluminium (Al) en mg/l	5
20	Barilyum (Be) en mg/l	0,1
21	Cobalt (Co) en mg/l	0,05
22	Fer (Fe) en mg/l	5
23	Lithium en mg/l	2,5
24	Manganèse (Mn) en mg/l	0,2
25	Molybdène (Mo) en mg/l	0,01
26	Nickel (Ni) en mg/l	0,2
27	Vanadium (V) en mg/l	0,1

- 1.000 CF/100 ml pour les cultures consommées crues.

Annexe n° V :

Tableau des résultats de calcul du rapport Ca/ Mg (rapport sans unité):

Echantillons	Ca ²⁺ /Mg ²⁺
P1	7,76
P2	11,20
P3	16,96
P3 '	25,44
P4	22,88

P4'	10,08
P5	6,48
P6	4,80
P7	3,36
P8	6,56
S0	3,52
S1	13,52
S2	13,60
S3	13,36
S4	8,88
R1	8,64

Annexe n° VI :

Indices de saturation des échantillons vis-à-vis la calcite, dolomite, gypse et halite.

Echantillons	Calcite (CaCO ₃)	Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	Gypse (CaSO ₄ :2H ₂ O)	Halite (NaCl)
P1	0	0,54	-1,11	-5,71
P2	0,11	-0,48	-1,26	-5,89
P3	0,2	-0,47	-1,24	-5,51
P3'	0,07	-0,92	-0,95	-5,13
P4	0,02	-0,97	-0,54	-5,18
P4'	-0,04	-0,73	-1,56	-6,09
P5	-0,03	-0,53	-1,39	-6,24
P6	0,94	1,55	-1,96	-6,65
P7	0,31	0,45	-1,95	-6,91
P8	-0,04	-0,54	-1,46	-7,01
R1	0,05	-0,49	-1,75	-6,32
S0	0,56	0,92	-2,21	-6,57
S1	0,63	0,48	-1,43	-5,83
S2	0,79	0,8	-1,74	-5,63
S3	0,36	-0,06	-1,88	-5,5
S4	0,09	-0,43	-2,46	-5,9

Références bibliographiques

- ABARRO A., BOCHTA A. & BAROUDI E. B. (1998).** – L'activité minière au Maroc. Chroniques de la recherche. Minière, 531-532, 3-8 pp..
- ABOURIDA A. (2007)** - Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Université Cadi Ayyad Faculté des sciences Semlalia. Marrakech. 146p..
- ADRIANO D. C. (2001)** – Trace elements in terrestrial environments : biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. 2nd Editions Springer- verlag, New York, Berlin, Heidelberg.
- AIT LEMKADEME A. (2010)** – Origine de la salinité des eaux dans les schistes profonds dans la région de Haouz. Thèse de doctorat. Université Paris Sud 11. 120 p..
- AMRANI A. (2007)** - Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM + de Landsat 7 et modèle numérique de terrain appliqués à l'étude morphogénétique de la haute et moyenne Moulouya (Maroc). Université Mohammed V. Agdal Faculté des sciences Rabat. 215p..
- BAKER A. J. M. et WALKER P. L. (1990)** – Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In Shaw A. J. (Ed.) Heavy Metal Tolerance in plants : Evolutionary aspects. CRC Press, Boca Raton, Florida, 155-172 pp..
- BENKHADRA A. et EL ABRAOUI A. (2006)** – Ressources minérales. Rapport thématique. 72 p..
- BILLON G., MAGNIER A., LOURINO-CABANA B., BAEYENS W., FISHER J.C., et OUDDANE B. (2010)** - Mise en place d'un suivi en continu d'éléments traces métalliques dans la colonne d'eau du canal de la Deûle. Rapport Scientifique. Université Lille 1. 50 p..
- BOUDHAR A. (2009)** – Teledetction du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech. Université Cadi Ayyad Faculté des sciences et techniques. Marrakech. 232 p..
- B.R.G.M. (1999).** Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Techniques de l'industrie minière 3 : 3^{ème} Trimestre, pp : 77-110.
- CMG. (2003)** - Compagnie minière des Guemassa : note d'information abrégée. 69 p..
- CURIE F. (2006)** - Rétention des nitrates dans les zones humides riveraines : Rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi échelle dans le bassin de la Seine. Thèse de doctorat. Université Paris VI-Pierre et Marie Curie. 227 p..
- DAROUSSIN, J. L., PFIFFELMANN, J. P. & RUHLMANN, F. (1998).** -Réaménagement des sites miniers : l'exemple du site d'extraction de minerai d'uranium de l'Écaprière (COGEMA, France). Chronique de la recherche minière, 533 : 31-41 pp..
- EDDEBI A., SAQUAQUE, A., KERSIT M. et CHBIHI A. (1998)** - L'amas sulfuré de Hajjar (Guemassa, Maroc). Chronique de la Recherche Minière, n° 531-532, pp. 45-54.

EL ADNANI, M. (2008). – Evaluation du comportement à long terme des résidus des mines de Hajjar et de Draa Sfar (Marrakech, Maroc) et de leurs impacts sur les écosystèmes avoisinants. Thèse de doctorat. Université Cadi Ayyad, Marrakech. 219 p..

EL HACHIMI M. L. (2006). - les districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, abandonnés dans la haute Moulouya (Maroc): potentiel de pollution et impact sur l'environnement. Thèse de doctorat. Université Ibn Tofail Kenitra, 201p..

EL HAMIANI O. (2011) – Qualité des sols de jardin au voisinage de 3 sites miniers dans le sud du Maroc : Ecotoxicologie et risques sanitaire. Université Cadi Ayyad Faculté des sciences et techniques. Marrakech. 163p..

EL-HARTI A. (2005) - Apport de la Télédétection et de la topographie numérique a l'étude géodynamique et à l'exploration minière : Exemple des Jebilet Centrales (Maroc). Université Cadi Ayyad Faculté des sciences Semlalia. Marrakech. 173p..

ER-RAKI S. (2007) – Estimation des besoins en eau des agricultures dans la région de Tensift El Haouz : Modélisation, expérimentation et télédétection. Université Cadi Ayyad Faculté des sciences Semlalia. Marrakech. 128 p..

FREEZE R. A. et CHERRY J. A. (1979) - Groundwater. Englewood cliffs, NJ, 604 pp.

HAIMEUR, J. (1988)- Contribution à l'étude de l'environnement volcano-sédimentaire du minerais de Douar Lahjar (Guemassa, Maroc), lithologie, paléo-volcanisme, géochimie, métallogénie. Thèse 3^{ème} cycle, ENSG, Nancy, 151 p..

HAIMEUR, J. (1998)- Litho-stratigraphie, géochimie et métallogénie de l'environnement volcano-sédimentaire de l'amas sulfuré de Douar Lahjar (Guemassa, Maroc). Bull. Inst. Sci, Rabat, n°21 (1997-1998), pp. 15-30.

HATHOUTI, M. (1990) –Etude gravimétrique et magnétique des amas sulfurés viséens de la région de Marrakech (Maroc). Centre géologique et géophysique de Montpellier. 221p..

HIBTI M. (1993) - L'amas sulfuré de Hajjar : Contexte géologique de mise en place et déformations superposées (Haouz de Marrakech, Meseta Sud-occidentale, Maroc). Thèse de 3^{ème} cycle. Université Cadi Ayyad Marrakech, 197 p..

HIBTI M. (2001) - Les amas sulfurés des Guemassa et des Jebilet (Meseta Sud-occidentale, Maroc) : Témoins de l'hydrothermalisme précoce dans le bassin Mesetien. Thèse de doctorat Es- Sciences. Université de Marrakech, 318 p..

HUVELIN P. et SNOEP J.P. (1965) - Prospection des filons à pyrrhotine dans les Jebilet centrales (Maroc). Mines et géologie, Rabat, n° 23, pp. 21-33.

IZART A., (1990) - Les bassins carbonifères de la meseta marocaine, étude sédimentologique et approche du contexte structurale. Part de la tectonique et de l'eustatisme. Géologie méditerranéenne, 17, pp. 61-72.

- JACKSON R.D., (1983)** - Spectral indices in N-space, *Remote Sensing of Environment*, 14: 409- 421
- KARRAKCHOU S. (2012)** - Évaluation des impacts des activités minières sur l'environnement et la santé au niveau de trois unités pilotes : Mine de Hajjar, Mine fermée de Bleida, Mine d'Oued El Heimer. Atelier sur les impacts environnementaux des activités minières dans les pays arabes. 22 au 24 Février 2012.
- MICHARD A. (1976)** - Elément de géologie marocaine. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 252, 408 p..
- MOUTTAQI A., RJIMATI E. C., MAACHA L., MICHARD A., SOULAIMANI A., & IBOUH H. (2011)** - les principales mines du Maroc. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 564, 374 p..
- NICOLINI P. (1990)** - Géologie et exploration minière. Editions Lavoisier, Paris.
- PIQUE A. et MICHARD A. (1981)** - Les zones structurales du Maroc hercynien *Sci. Géol. Bull.*, Vol. 34, Strasbourg. pp. 135-146.
- POUCHIN T. (2001)** - Elaboration d'un observatoire paysager – Application à l'Estuaire de Seine. Thèse de Doctorat, Université du Havre, UMR 6063 du CNRS, 316 p.
- PUN T. (1982)** – Simplification automatique de scènes par traitement numérique d'image en vue d'une restitution tactile pour handicapés de la vue. Thèse de doctorat, Lausanne, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 157 p.
- RAQIQ H., BOUABDELLI M., ED DEBBI A., SAQUAQUE A., et OUADJOU A. (1996)** - Sédimentations et environnements sédimentaires du Carbonifère inférieur des affleurements de N'Fis (Guemassa orientale, Maroc). 13^{ème} colloque des bassins sédimentaires marocains, Marrakech.
- RAQIQ H. (1997)** - Le bassin Carbonifère des Guemassa (Méseata Sud-Occidentale, Maroc) : litho-stratigraphie, sédimentologie et évolution structurale. Thèse 3^{ème} cycle, Université Cadi Ayyad Marrakech, 202 p..
- RIEU M. (1981)** - Sodium Adsorption Ratio et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux. Cahier O.R.S.T.O.M., sh. Ptfdol., volume XVIII, n° 2. 123-128 pp..
- RODIER J., LEGUBE B., MERLET N. et coll., (2009)** - L'analyse de l'eau. Paris, Dunod 9^{ème} édition, 1579 p..
- ROGER, L. (1996)** - Géographie du cycle de l'eau. Presses universitaires de Mirail. 350 p.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W., HARLAN J.C. (1974)** - Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt MD: 1-371.
- SMILER R. (2004)** - Diagramme computer program. Version 2.00. Avignon (France) : Laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.
- SOULAIMANI A. (1991)** - L'évolution structurale des affleurements paléozoïques du Haouz de Marrakech (Guemassa-N'Fis, Maroc). Thèse 3^{ème} cycle. Université Cadi Ayyad Marrakech, 150 p..

ABHT, 2010 :

http://www.eau-tensift.net/site-web.html?tx_mininews_pi1%5BshowUid%5D=2&cHash=eaf1c9750a

Groupe MANAGEM, 2012 (Maroc) :

<http://www.managemgroup.com/Activites/Operations/Mines-polymetalliques-de-Hajar-Draa-Sfar-et-Tighardine>

Portrait du département d'eau, 2013 (Maroc). :

http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&Id=80&ID_PAGE=193

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des mines marocaines les plus importantes, classées selon leur état d'exploitation.	14
Figure 2 : Images satellites montrant la situation géographique de la mine de Guemassa.	15
Figure 3 : Image satellitaire de la mine de Guemassa (A : Vue d'ensemble B: vue des aménagements de la CMG).	17
Figure 4 : Procédés d'extraction et de traitement du minerai sulfuré de Hajjar.	20
Figure 5. : Photos des deux parcs à résidus de la mine de Hajjar, prises le 29/04/2013 (A : ancien parc. B : récent parc).	21
Figure 6. : Localisation de la zone d'étude.	24
Figure 7. : Carte géologique simplifiée des Guemassa.	27
Figure 8. : Carte géologique détaillée de la zone d'étude	28
Figure 9. : Situation de la mine de Hajjar sur Oued N'fis et les limites des affluents qui la jalonnent.	30
Figure 10. : Température et précipitations mensuelles de la station Lalla Takerkoust.	31
Figure 11. : Vitesse moyenne mensuelle du vent dans la station de Lalla Takerkoust.	32
Figure 12. : Routes et villages qui jalonnent la mine de Guemassa.	33
Figure 13. : Schéma expliquant les étapes de la télédétection.	35
Figure 14. : Spectre électromagnétique et domaine du visible.	38
Figure 15. : Capture de l'image TM et de la zone d'étude.	39
Figure 16. : Capture de l'image ASTER et de la zone d'étude.	40
Figure 17. : Résultat de l'application de NDVI en niveau de gris (a : Barrage Lalla Takerkoust, b : complexe industriel de Guemassa, c : Tufs d'Imarine).	42
Figure 18. : Cartographie de l'indice de végétation NDVI sur la carte de la zone.	43
Figure 19. : Différentes familles des linéaments de la zone d'étude.	44
Figure 20. : Rosace directionnelle des différentes familles de linéaments de la zone d'étude.	45
Figure 21. : Résultat de l'application de l'indice de soufre (a : Barrage Lalla Takerkoust, b : complexe industriel de Guemassa, c : Tufs d'Imarine, 1,2, 3 et 4 minéralisation en soufre).	46
Figure 22. : Digitalisation de l'indice de soufre sur la carte de la zone.	47
Figure 23. : Superposition des linéaments sur la carte de l'indice de soufre.	48
Figure 24. : Répartition des points d'échantillonnage des eaux de surface.	50
Figure 25. : Répartition des sites d'échantillonnage des eaux souterraines (puits et sources).	51
Figure 26. : Carte piézométrique probable de la zone d'étude, établie durant la campagne du 25/04/2013.	56
Figure 27. : Logs stratigraphiques synthétique des forages exploités dans la zone d'étude.	57
Figure 28. : Variations du pH pour les eaux de surface.	62
Figure 29. : Photo des encroutements au niveau de la station S2.	63
Figure 30. : Variations du pH pour les eaux souterraines.	64
Figure 31. : Conductivités des eaux de surface au voisinage du site minier Guemassa.	65
Figure 32. : Evolution des conductivités des eaux souterraines au voisinage du site minier de Guemassa.	66
Figure 33. : Evolution de la saturation des eaux de surface en O ₂ dissous au voisinage de la mine de Guemassa.	67
Figure 34. : Evolution de la saturation des eaux souterraines en O ₂ dissous au voisinage de la mine de Guemassa.	68
Figure 35. : Projection des résultats des analyses des eaux de surface sur le diagramme de STABLER.	69
Figure 36. : Projection des résultats des analyses des eaux souterraines selon le diagramme de STABLER.	70
Figure 37. : Projection des résultats des analyses des eaux de surface sur le diagramme de SCHOELLER.	71

Figure 38 : Projection des résultats des analyses des eaux souterraines sur le diagramme de SCHOELLER.....	71
Figure 39 : Projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme de piper.	72
Figure 40 : Projection des analyses des eaux souterraine sur le diagramme de PIPER.	74
Figure 41 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 :75,41%).....	75
Figure 42 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 :75,41 %).....	76
Figure 43 : Figure 43 : Indices de saturation par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite des eaux de surface.	77
Figure 44 : Indices de saturation par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse, et l'halite des eaux souterraines.	78
Figure 45 : Variations des concentrations en cuivre pour les eaux de surface.....	80
Figure 46 : Variations des concentrations en cuivre pour les eaux souterraines.....	81
Figure 47 : Variations des concentrations de zinc pour les eaux de surface.	82
Figure 48 : Variations des concentrations de zinc pour les eaux souterraines.	83
Figure 49 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation au voisinage de la mine de Hajjar.	89

Liste des tableaux

Tableau I : Minéralisation des résidus solides de la mine de Hajjar.....	22
Tableau II : Caractéristiques des bandes du capteur TM et leur application.	36
Tableau III : Différentes composantes des bandes du capteur ASTER.	37
Tableau IV : Représentation des résultats des mesures et des analyses chimiques.	58
Tableau V : Résultats des calculs des balances ioniques des éléments majeurs.	59
Tableau VI : Comparaison des balances ioniques.	60
Tableau VII : Matrice de corrélation entre les variables.....	75
Tableau VIII : Critères d'identification de l'origine de la salinité.....	79
Tableau IX : Grille de classification des eaux selon les normes de potabilité.	87
Tableau X : Gille de classification des eaux d'irrigation selon leur RAS.	88