

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohammed Seddik Benyahia- de Jijel  
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

جيجل – جامعة محمد الصديق بن يحي  
كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم علوم الارض و الكون

## Thèse

Présentée par

**Foughalia Amal**

En vue de l'obtention du **Doctorat 3ème Cycle LMD**

**Filière : Géologie**

**Spécialité : Ressources Minérales, Géomatériaux et Environnement**

## Thème

*Etude d'impact sur l'environnement de l'exploitation des carrières  
d'agrégats : cas de Chekfa (Jijel) et du piton d'Akbou (Béjaia) dans  
le Nord-Est algérien*

Soutenu publiquement le 11 Juin, devant le jury composé de :

|              |                            |     |                                     |
|--------------|----------------------------|-----|-------------------------------------|
| Président :  | <b>BOUZENOUNE Azzedine</b> | Pr. | Univ.Mohamed Seddik Benyahia- Jijel |
| Rapporteur : | <b>KESSASRA Farès</b>      | Pr. | Univ.Mohamed Seddik Benyahia- Jijel |
| Examineurs : | <b>BOUREFIS Ahcène</b>     | Pr. | Univ.Frères Mentouri- Constantine 1 |
|              | <b>BENHAMICHE Nadir</b>    | MCA | Univ.Abderrahmane Mira-Béjaia       |
|              | <b>KRIKA Abderrezzak</b>   | Pr. | Univ.Mohamed Seddik Benyahia- Jijel |

# *Dédicace*

*À mes chers parents, dont l'amour inconditionnel et les sacrifices ont tracé la  
voie vers cette réalisation.*

*À mon frère et mes sœurs, complices de mes joies et de mes défis, qui ont  
partagé chaque étape de ce voyage intellectuel. Et à mon mari, source  
inépuisable de soutien et de réconfort.*

*Cette thèse est dédiée à vous, pour votre soutien indéfectible et votre amour sans  
bornes.*

*AMAL*

# *Remerciement*

*‘Je suis reconnaissante envers Dieu pour ce que je suis et ce que j'ai.’*

C'est avec une grande joie, une immense fierté et un bonheur intense que je partage avec vous le fruit de nombreuses années de travail, à la fois exigeant et captivant.

Je souhaite exprimer ma gratitude la plus sincère à mon directeur de thèse, le Professeur **Farès Kessasra**, pour son rôle déterminant dans ma formation et son accompagnement tout au long de cette thèse. Je lui adresse tout mon respect et ma reconnaissance pour sa confiance, sa patience, sa disponibilité, ses conseils précieux et son soutien qui ont été essentiels pour mener à bien ce travail de recherche au sein du laboratoire de recherche en Génie Géologique (LGG). Cher Professeur, c'est un immense privilège et un honneur que vous m'avez accordé en me confiant cette mission. Je suis fier d'avoir eu l'opportunité d'apprendre à vos côtés et je vous serai éternellement reconnaissante. Ce travail vous est dédié en signe de gratitude pour votre aide et les efforts considérables que vous avez déployés pour sa réalisation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur **Bouzenoune Azzedine** pour avoir accepté de présider et de juger le présent travail de thèse. À Messieurs **Bourefis Ahcène**, **Benhamiche Nadir** et **Krika Abderrezzak**, j'adresse également mes sincères remerciements pour leur précieuse contribution en tant que membres du jury. Leur dévouement, leurs conseils et leur évaluation ont joué un rôle essentiel dans la réussite de mon travail. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toute l'équipe enseignante et aux doctorants du LGG, ainsi qu'au département des Sciences de la Terre et de l'Univers. Je souhaite également adresser mes sincères remerciements au Professeur **Sifour Mohammed**, Vice doyen chargé de la post graduation et de la recherche scientifique à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et aux ingénieurs de la Faculté des Sciences Exactes pour leur aide inestimable.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance au Professeur **Bollot Nicolas** ainsi qu'aux membres du laboratoire de Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Anthropisés (GEGENA) de l'Université de Reims, en France. Leur accueil chaleureux, leur soutien moral et leurs conseils avisés ont été d'une valeur inestimable pour moi. Leur expertise et leur bienveillance ont grandement enrichi mon parcours de recherche, et je suis

reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de bénéficier de leur accompagnement précieux. Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers le Professeur **Ousalti Walid**, ainsi qu'au Professeur **Aloui Taher** et aux membres du laboratoire des ressources minérales de l'Université d'El Manar à Tunis. Leur accueil chaleureux et leur soutien indéfectible ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours de recherche. Leurs conseils éclairés et leur expertise ont été d'une valeur inestimable, contribuant ainsi à enrichir mes travaux. Je suis profondément reconnaissante d'avoir eu la chance de bénéficier de leur accompagnement précieux.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Kamel Djeridi**, Ingénieur Principal au sein de la société de routes et de bâtiments (SOROUBAT), pour son accueil chaleureux et bienveillant lors de mon stage. C'est grâce à son encadrement attentif et à son soutien constant que j'ai pu vivre une expérience professionnelle enrichissante au sein de cette entreprise.

*Il est impossible de minimiser l'importance de tous mes collègues du laboratoire LGG. La dynamique d'entraide qui règne au sein du groupe rend les journées bien plus agréables. Ce fut un véritable plaisir de partager ces années en leur compagnie, ces futurs docteurs avec lesquels j'ai échangé les connaissances, les difficultés et les moments de joie.*

## الملخص

الدراسات المتعلقة بتأثير النشاطات التعدينية واستخراج الركام على البيئة في الجزائر محدودة للغاية . تهدف هذه الاطروحة إلى دراسة موقعين متميزين بشكل كاف وذو أهمية إقليمية، وهما محجرة المصيف في بلدية الشقفة (شمال شرق جيجل)، الواقعة في بيئة طبيعية محمية ضمن مستجمع نهر النيل، ومحاجر ومقالع الرمال بجبل آقبو (جنوب غرب بجاية)، المميّزة بتنوع الصناعات الاستخراجية في بيئة متأثرة بشدة بالأنشطة البشرية في قلب مدينة آقبو وتدرج ضمن مستجمع نهر الصومام. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم التأثير البيئي لصناعات الاستخراجية الغير معدنية، وذلك من خلال التركيز على تقييم الجودة الفيزيو-كيميائية وتراكم عناصر المعادن (الحديد والرصاص والزنك والنحاس والكاديوم) في المياه السطحية والمياه الجوفية ورواسب الأودية والتربة المحيطة، حيث تم إجراء ثلاث حملات لأخذ العينات بين عامي 2019 و 2021. كذلك استخدام مؤشرات التلوث لتقييم مستوى الملوثات السامة وتحديد المصادر المحتملة للتلوث من خلال تحليل البيئة الاجتماعية والاقتصادية وربطها بالتحاليل البتروغرافية والجيوكيميائية التي تم إجراؤها على الصخور المستخرجة من المحاجر المستخدمة. تكشف نتائج تراكيز عناصر المعادن في المياه المأخوذة من محجرة الشقفة عن ارتفاع في تراكيز الزنك والرصاص والكاديوم حيث يتجاوز المعايير الجزائرية وتوصيات منظمة الصحة العالمية. ونفس الشيء ينطبق على التراكيز في الرواسب والتربة المأخوذة على أطراف المحجرة التي تظهر أن تراكيز الزنك والرصاص والنحاس والكاديوم تتجاوز بشكل كبير القيم المرجعية المطلوبة. ويشير ذلك إلى تلوث متنوع للمياه والرواسب والتربة بالمعادن الثقيلة. الظروف الجيولوجية والمناخية والبشرية المحلية في هذه المحجرة التي تعمل منذ عشرين عامًا يزيد من حدة هذا التلوث. أما بالنسبة لموقع آقبو، الذي توقفت فيه عمليات الاستخراج والتجوير منذ حوالي سبع سنوات، فإن تراكيز عناصر المعادن في أودية الساحل، بوسلام وصومام ومياه جوفية تكشف عن تراكيز مرتفعة بما فيه الكفاية من الزنك والرصاص والكاديوم في مياه السطح وآبار الاستغلال، تتجاوز المعايير المذكورة سابقاً. وبالإضافة إلى ذلك، تظهر تحاليل عناصر المعادن في الرواسب والتربة تراكيز متوسطة من الزنك والنحاس والكاديوم تتجاوز القيم المرجعية. نتيجة لتداخل عوامل تلوث بشرية المنشأ وبيولوجية متعددة من الصعب تحديد كل مصدر للتلوث وتقييم تأثير الصناعات الاستخراجية على مستوى آقبو.

**الكلمات المفتاحية:** صناعة استخراجية، محاجر، دراسة تأثير البيئة، العناصر المعدنية، المصيف، آقبو، الجزائر

## **Abstract**

Environmental impact studies of mining and aggregate extraction activities in Algeria, in their scientific and exploratory dimension, are quite limited. This thesis examines two industrial sites that are quite distinct and of regional importance, namely the El M'cif quarry in Chekfa (Northeast of Jijel), located in a preserved natural environment of the Nile watershed, and the quarries, gravel pits, and sand pits of Piton d'Akbou (Southwest of Béjaia), characterized by a diversity of extractive industries in a heavily anthropized environment in the heart of the city of Akbou and part of the Soummam Valley watershed. This study aims to evaluate the environmental impact of non-metallic mining operations by focusing on the assessment of physicochemical quality and concentrations of trace metal elements (Fe, Pb, Zn, Cu, and Cd) in surface water, groundwater, wadi sediments, and surrounding soils. Three sampling campaigns were conducted between 2019 and 2021. By using pollution indices to assess the level of toxic pollutants, identifying potential sources of contamination by analyzing the socio-economic environment and correlating them with petrographic and geochemical analyses performed on rocks extracted from the quarries, the study aims to shed light on environmental impacts. The results of trace metal concentrations in water samples taken from the Chekfa quarry reveal elevated levels of zinc, lead, and cadmium exceeding Algerian and World Health Organisation recommended standards. The same applies to sediment and soil concentrations sampled around the quarry, showing that zinc, lead, copper, and cadmium concentrations far exceed required reference values. This indicates widespread contamination of water, sediment, and soil by heavy metals, exacerbated by local geological, climatic, and anthropogenic conditions in this quarry operating for twenty years. As for the Piton d'Akbou site, where quarrying activities have been halted for ten years, trace metal concentrations in the Sahel Boussellam, Soummam wadis, and groundwater reveal quite high levels of zinc, lead, and cadmium in surface waters and exploited wells, exceeding the aforementioned standards. Furthermore, analyses of trace metals in sediments and soils show average concentrations of zinc, copper, and cadmium exceeding reference values. The Soummam Valley is heavily influenced by human activities, resulting from a superposition of multiple anthropogenic and geogenic pollution factors. It is difficult to identify each source of pollution and evaluate the impact of extractive industries at the Piton d'Akbou level.

Keywords : Extractive industry, Aggregate quarries, Environmental Impact Study, MTE, El M'cif, Piton d'Akbou, Algeria.

## Résumé

Les études d'impact sur l'environnement dédiées aux activités minières et d'extraction d'agrégat en Algérie sont bien limitées. Cette thèse s'intéresse à deux sites industriels bien distincts et d'importance régionale. Il s'agit de la carrière d'El M'cif à Chekfa (Nord-est de Jijel), située dans un environnement naturel et préservé du bassin versant du Nil, et les carrières, gravières et sablières du Piton d'Akbou (Sud-Ouest de Béjaia), caractérisées par une multiplicité d'industries extractives dans un environnement anthropisé et faisant partie du bassin versant de la Soummam. Cette étude vise à évaluer donc l'impact environnemental de l'exploitation minière des matériaux non-métalliques en se focalisant sur l'évaluation de la qualité physico-chimique et les concentrations en éléments traces métalliques (Fe, Pb, Zn, Cu et Cd) des eaux de surface, des eaux souterraines, des sédiments d'oueds et des sols environnants. Trois campagnes d'échantillonnage ont été entreprises entre 2019 et 2021. Nous avons utilisé l'indice de pollution pour évaluer le niveau des polluants toxiques, identifier les sources potentielles de contamination en analysant l'environnement socio-économique et en les corrélant aux analyses pétrographiques et géochimiques effectuées sur les roches extraites des carrières. Les résultats des concentrations en éléments traces métalliques dans les eaux prélevées à la carrière de Chekfa révèlent une surélévation des teneurs en zinc, plomb et cadmium dépassant les normes algériennes et celles recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé. Il en est de même pour les concentrations dans les sédiments et les sols prélevés aux abords de la carrière qui montrent que les concentrations de zinc, de plomb, de cuivre et de cadmium excèdent largement les valeurs de référence requises. Il en ressort que cette carrière, en activité depuis vingt ans, est sujette à une contamination des eaux, des sédiments et des sols par des métaux lourds et aggravée par les conditions géologiques, climatiques et anthropiques locales. Quant au site du Piton d'Akbou, dont l'exploitation des carrières est à l'arrêt depuis dix ans, les concentrations en ETM dans les Oueds Sahel, Boussellam, Soummam et les eaux souterraines révèlent des teneurs assez élevées de zinc, de plomb et de cadmium dans les eaux de surface et les forages exploités, dépassant les normes précitées. De plus, les analyses des ETM dans les sédiments et les sols montrent des concentrations moyennes de zinc, de cuivre et de cadmium dépassant les valeurs de référence. La vallée de la Soummam est fortement influencée par les activités humaines, résultant d'une superposition de multiples facteurs de pollution anthropique et géogénique. Il est difficile d'identifier chaque source de pollution et d'évaluer l'impact des industries extractives au niveau du piton d'Akbou.

Mots clés : Industrie extractive, Carrières d'agrégat, Etude d'impact sur l'environnement, ETM , El m'cif, piton d'akbou, Algérie

## *Table de matière*

|   |    |
|---|----|
| Dédicace.....   | I  |
| Remerciement.....   | II |
| الملخص.....   | IV |
| Abstract.....   | V  |
| Résumé.....   | VI |
| Liste des tableaux.....   | X  |
| Liste des figures.....  | XI |
| <i>Introduction générale</i> .....  | 1  |
| <b>Chapitre I : Cadre physique et environnement géologique de la carrière d’El M’cif</b> .....          | 6  |
| I.1. Introduction .....   | 7  |
| I.2. Situation géographique.....  | 7  |
| I.3. Relief.....  | 8  |
| I.4. Réseau hydrographique.....   | 8  |
| I.5. Végétation.....  | 10 |
| I.6. Population.....  | 10 |
| I.7. Industries extractives.....  | 10 |
| I.8. Climatologie locale.....   | 12 |
| I.9. Vents .....  | 12 |
| I.10. Géologie du site d’étude.....   | 12 |
| I.10.1 Caractérisation pétrographique de l’ensemble gneissique.....                                     | 13 |
| I.11. Conclusion.....   | 15 |
| <b>Chapitre II : Cadre physique et environnement géologique de l’industrie extractive d’Akbou</b> ..... | 16 |
| II .1. Introduction .....   | 17 |
| II.2. Situation géographique.....   | 17 |
| II.3. Reliefs.....  | 18 |
| II.4. Réseau hydrographique.....  | 18 |



|  |           |
|--|-----------|
| II.5. Végétation.....  | 19        |
| II.6. Population.....  | 20        |
| II.7. Activités industrielles.....   | 20        |
| II.8. Conditions climatiques.....  | 21        |
| II.9. Géologie du site d'étude.....  | 23        |
| II.10. Conclusion.....   | 25        |
| <b>Chapitre III : Matériels et méthodes.....</b>   | <b>26</b> |
| III.1. Introduction.....   | 27        |
| III.2. Campagnes d'échantillonnage d'eaux .....  | 27        |
| III.3. Echantillonnage des sédiments et des sols .....   | 32        |
| III.4. Techniques géochimiques et pétrographiques sur les roches.....  | 38        |
| III.5. Evaluation des vibrations des tirs.....   | 40        |
| III.6. Les indices d'évaluation écologique.....  | 40        |
| III.6.1. Indice de géo-accumulation (Igeo).....  | 40        |
| III.6.2. Indice de pollution (IP+IPI).....   | 41        |
| III.6.3. L'indice de risque écologique (RI).....   | 41        |
| III.7. Normes appliquées .....   | 42        |
| III .8. Conclusion.....  | 44        |
| <b>Chapitre IV : Etude d'impact sur l'environnement de l'exploitation de la carrière d'El M'cif (Chekfa, Jijel).....</b> | <b>45</b> |
| IV.1. Introduction.....  | 46        |
| IV.2. Variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et métaux lourds.....                                 | 46        |
| IV.2.1. Paramètres physiques dans l' eau.....  | 46        |
| IV.2.2. Paramètres chimiques des eaux .....  | 47        |
| IV. 3. Effet saisonnier sur les teneurs .....  | 50        |
| IV.4. Eléments Traces Métalliques (ETM).....   | 54        |

|  |           |
|--|-----------|
| IV.4. 1. Variation spatiale et saisonnière des métaux lourds dans l'eau.....   | 54        |
| IV.5. Caractéristiques physicochimiques des sédiments .....  | 61        |
| IV.5.1 Concentrations des ETM dans les sédiments.....  | 61        |
| IV.6. Caractéristiques physicochimiques des sols.....  | 62        |
| IV.6.1. Concentrations des ETM dans le sol.....  | 62        |
| IV.7. Evaluation du degré de contamination des sédiments par les ETM.....  | 65        |
| IV.7.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo).....  | 65        |
| IV.7.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI).....   | 65        |
| IV.7.3 L'indice de risque potentiel (RI).....  | 66        |
| IV.8. Evaluation du degré de contamination des sols par les ETM.....   | 67        |
| IV.8.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo).....  | 67        |
| IV.8.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI).....   | 67        |
| IV.8.3. L'indice de risque potentiel (RI) .....  | 68        |
| IV.9. Caractérisation géochimique et minéralogique des roches de la carrière.....  | 69        |
| IV.9.1. Roche carbonatée.....  | 69        |
| IV.9.2. Gneiss et pegmatite.....   | 70        |
| IV.9.3. Echantillon X .....  | 70        |
| IV.9.4. Echantillon Y .....  | 71        |
| IV.10. Caractérisation pétrographique des roches exploitées.....   | 71        |
| IV.11 Evaluation des vibrations lors des tirs d'abattage.....  | 77        |
| IV.12 Identification des sources et origine des ETM.....   | 79        |
| IV.13 Conclusion.....  | 85        |
| <b>Chapitre V : Etude d'impact sur l'environnement de l'exploitation des carrières et l'industrie extractive au piton d'Akbou.....</b> | <b>86</b> |
| V.1. Introduction.....   | 87        |
| V.2. Variation spatio-temporelle des conditions physico-chimiques et métaux lourds dans les eaux.....                                  | 87        |

|   |            |
|---|------------|
| V.2.1 Paramètres physiques des eaux .....   | 87         |
| V.2.2 Paramètres chimiques des eaux.....  | 88         |
| V.3. Eléments Traces Métalliques.....   | 96         |
| V.3.1. Variation spatiale et saisonnière des métaux lourds.....                       | 96         |
| V.4. Effet saisonnier sur les teneurs en ETM dans le piton d'Akbou.....               | 100        |
| V.5. Caractéristiques physicochimiques des sédiments.....                             | 102        |
| V.5.1. Concentrations des ETM dans les sédiments .....                                | 102        |
| V.6. Caractéristiques physicochimiques des sols.....                                  | 102        |
| V.6.1 Les concentrations des ETM dans le sol.....                                     | 103        |
| V.7. Evaluation du degré de contamination des sédiments par les ETM.....              | 105        |
| V.7.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo).....                                      | 105        |
| V.7.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI).....           | 105        |
| V.7.3. L'indice de risque potentiel (RI).....   | 106        |
| V.8. Evaluation du degré de contamination des sols par les ETM.....                   | 107        |
| V.8.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo).....                                      | 107        |
| V.8.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI).....           | 107        |
| V.8.3. L'indice de risque potentiel (RI) .....  | 108        |
| V.9. Identification de l'origine des ETM et évaluation globale de l'impact.....       | 109        |
| V.10. Conclusion .....  | 113        |
| <b>Chapitre VI : Plan d'atténuation des impacts.....</b>                              | <b>115</b> |
| VI.1. Introduction.....   | 115        |
| VI.2. Mesures d'atténuation pour la protection des ressources en eau.....             | 115        |
| VI.3. Mesures d'atténuation des impacts sur le sol.....                               | 118        |
| VI.4. Mesures d'atténuation de la pollution de l'air.....                             | 119        |
| VI.5. Le réaménagement et la réhabilitation des carrières et mines à ciel ouvert..... | 120        |
| VI.5.1. La réhabilitation intégrée et systématique.....                               | 120        |
| VI.5.2 L'utilisation du sol de couverture.....  | 120        |

|   |            |
|---|------------|
| VI.5.3. Une alternative au sol de couverture.....                               | 121        |
| VI.5.4. La décompaction du substrat.....  | 121        |
| VI.5.5. L'amendement et la fertilisation.....                                   | 121        |
| VI.5.6. L'adaptation de toxicité.....   | 122        |
| VI.6. Remise en état de l'ancienne carrière de calcaire de Djebel Feriana ..... | 122        |
| VI.7. Un exemple de revégétalisation au Kenya : la carrière Bamburi.....        | 126        |
| VI.8. Conclusion.....   | 126        |
| <b>Conclusion Générale.....</b>   | <b>127</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>  | <b>132</b> |

## *Liste des figures*

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (La carrière d'El M'cif) .....   | 7  |
| Figure 2 : Les sous bassins versants d'oued Nil (Bouakkaz &Zentout, 2020). .....  | 9  |
| Figure 3 : Réseau hydrographique au niveau du sous bassin versant d'oued Saayoud .....                                  | 9  |
| Figure 4 : Diagramme Ombro-thermique de la station d'Achouat (1988-2015). .....   | 11 |
| Figure 5 : Rose des vents au niveau du site d'implantation de la carrière d'El M'cif (Salhi et al., 2020).....          | 12 |
| Figure 6 : Carte géologique de la région de Jijel-Chekfa.....   | 14 |
| Figure 7 : Localisation de la zone d'étude (les industries extractives et carrières du piton d'Akbou). .....            | 17 |
| Figure 8 : Les sous bassins versants de la Soummam (Kessasra, 2015).....  | 19 |
| Figure 9 : Zones climatiques du bassin versant de la Soummam (Kessasra, 2006).....                                      | 22 |
| Figure 10 : Diagramme Ombro-thermique de la station de Tazmalt (1996-2019). .....                                       | 22 |
| Figure 11 : Schéma géologique de l'unité de Bou-Hamza autour de la Moyenne vallée de la Soummam , au 1/50 000 ème ..... | 24 |
| Figure12 : Echantillonnage de l'eau au niveau d'Oued Aftis (chekfa).....  | 29 |
| Figure 13 : Echantillonnage de l'eau au niveau d'Oued Soummam.....  | 29 |
| Figure 14 : Inventaire des points d'échantillonnage de l'eau au niveau de la carrière d'El M'cif .....                  | 30 |
| Figure 15 : Inventaire des points d'échantillonnage de l'eau au niveau du site d'Akbou .....                            | 31 |
| Figure 16 : Equipements utilisés dans l'opération de dosage des éléments majeurs au laboratoire (LGG). .....            | 32 |
| Figure 17 : Inventaire des points d'échantillonnage des sédiments de la carrière d'El M'cif ..                          | 34 |
| Figure 18 : Inventaire des points d'échantillonnage du sol au niveau de la carrière d'El M'cif. ....                    | 35 |
| Figure 19 : Inventaire des points d'échantillonnage des sédiments au niveau du site d'Akbou. ....                       | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 20 : Inventaire des points d'échantillonnage du sol au niveau du site d'Akbou .....   | 37 |
| Figure 21 : (A): échantillon de la roche carbonatée à pyrite récolté au niveau du site, (B) : lames minces de la roche carbonatée à pyrite.....                | 38 |
| Figure 22 : Diffractomètre à rayons X (PANalyticalX'Pert PRO) au laboratoire de ressources minérales à l'université El Manar de Tunis. ....                    | 39 |
| Figure 23 : Analyse d'ETM sur les roches par la SAA au laboratoire de ressources minérales à l'université El Manar de Tunis.....                               | 40 |
| Figure 24 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif.....  | 51 |
| Figure 25 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif .....   | 52 |
| Figure 26 : Concentrations des métaux lourds dans les eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif.....                                 | 59 |
| Figure 27 : Variation spatiotemporelle de la moyenne des concentrations des ETM par station dans les eaux de surface au niveau de la carrière d'El M'cif. .... | 60 |
| Figure 28 : Variation de l'indice de géo accumulation dans les sédiments d'oued Aftis. ....  | 65 |
| Figure 29 : Variation de l'indice de pollution dans les sédiments d'oued Aftis. ....   | 66 |
| Figure 30 : Variation de L'indice de risque potentiel (RI) dans les sédiments d'oued Aftis..   | 66 |
| Figure 31 : Variation de l'indice de géo accumulation dans le sol de la carrière d'El M'cif. .   | 67 |
| Figure 32 : Variation de l'indice IP-IPI dans le sol de la carrière d'El M'cif .....   | 68 |
| Figure 33 : Variation de l'indice de risque potentiel (RI) dans le sol de la carrière d'El M'cif..   | 68 |
| .....  |    |
| Figure 34 : Spectre DRX de l'échantillon de la roche carbonatée analysé.....   | 72 |
| Figure 35 : Spectre DRX de l'échantillon de pegmatite analysé. ....  | 73 |
| Figure 36 : Spectre DRX de l'échantillon X analysé.....  | 73 |
| Figure 37 : Spectres DRX d'échantillon Y analysé .....   | 74 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 38 : Caractéristiques macroscopiques des roches carbonatées et des textures de pyrite associées : (A) texture en brèche, (B) texture massive,(C) grains de pyrite disséminés dans la roche, (D) remplissage des fissures par la pyrite..   | 76  |
| Figure 39 : Observations réalisées au microscope sur des échantillons récoltés au niveau de la carrière : (A) et (B) en lumière transmise polarisée analysée (LPA), (C) et (D) en lumière réfléchie au niveau des sulfures. (Calc : Calcite, Py : Pyrite)   | 77  |
| Figure 40 : Rayons d'influence des ondes sismiques pour des charges instantanées de 175 kg(Salhi et al., 2020).   | 78  |
| Figure 41 : Zones de risques pour des charges instantanées de 175 kg(Salhi et al., 2020).   | 76  |
| Figure 42 : Prises de vue des différents sites de carrière considérés dans cette étude : (A) cavité karstique dans le calcaire de la carrière, (B) enlèvement d'un bloc rocheux, (C) pollution ponctuelle provenant des usines de bitume et d'asphalte, (D) hydrocarbures et les lubrifiants utilisés dans la carrière, (E) la poussière générée par les machines et l'usine de traitement, (F) un immense nuage de poussière généré par une explosion minière. | 84  |
| Figure 43: Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines dans les carrières et l'industrie extractive du Piton d'Akbou (Béjaïa).  | 93  |
| Figure 44 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines dans les carrières et l'industrie extractive du Piton d'Akbou (Béjaïa).   | 94  |
| Figure 45 : Teneurs en métaux lourds en ( $\mu\text{g/L}$ ) dans les eaux de surfaces et souterraines au niveau des carrières et l'industrie extractive au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa)   | 101 |
| Figure 46 : Variation de l'indice de géo accumulation dans les sédiments.   | 105 |
| Figure 47 : Variation de l'indice de pollution dans les sédiments.  | 106 |
| Figure 48 : Variation de L'indice de risque potentiel (RI) dans les sédiments.  | 106 |
| Figure 49 : Variation de l'indice de géo accumulation dans le sol.  | 107 |
| Figure 50 : Variation de l'indice de pollution dans le sol  | 108 |
| Figure 51 : Variation de L'indice de risque potentiel (RI) dans le sol.   | 108 |
| Figure 52 : Localisation des activités anthropiques de la vallée de la soummam (Benhamiche et al. ;2016).   | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 53 : Prises de vue des différents sites au voisinage du piton d'Akbou considérés dans cette étude : (A) station de concassage, (B)deux types d'industrie(extractive et alimentaire) au pied du piton, (C) chenalisation de la Soummam suite à l'exploitation des sables et gravier à Akbou, (D)le lit de l'oued Soummam se rétrécit en raison du dépôt aléatoire des tas de gravier ,(E) et(F) l'extraction des matériaux gravières contribue à la dégradation de notre l'environnement.. | 112 |
| Figure 54 : Installation des caniveaux dans un site minier (le secteur minier fer de lance du Katanga, la république démocratique du Congo) (source : <a href="#">RDC: Le secteur minier, fer de lance du Katanga – Africotelegraph – Toute l'actualité africaine</a> ).   | 117 |
| Figure 55 : La nécessité de reboisement pour restaurer les écosystèmes dégradés, de la carrière d'El M'cif à Chekfa.....   | 119 |
| Figure 56: Vue aérienne de djebel Feriana et les deux carrières de sable et de calcaire (Aloui,1999).....  | 123 |
| Figure 57 : Réhabilitation de l'ancienne verse (Aloui, 1999).....  | 124 |
| Figure 58 : Options de réaménagement paysager pour les Sites en Exploitation(Aloui, 1999) .....  | 125 |



## *Liste des tableaux*

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1. Critères de classification de l'indice de risque écologique potentiel .....  | 41  |
| Tableau 2 : Normes requises pour les eaux de surface et les eaux souterraines .....   | 43  |
| Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines au niveau de la carrière d'El M'cif (Jijel) .....  | 53  |
| Tableau 4 : Concentration des ETM dans les eaux de l'Oued Aftis . .....   | 54  |
| Tableau 5 : Paramètres physicochimiques et concentrations des ETM dans les sédiments et les sols au niveau de la carrière d'El M'cif.. .....                                  | 64  |
| Tableau 6 : Teneurs en éléments chimiques obtenues par spectrométrie de la Fluorescence X sur les échantillons récoltés de la carrière d'El M'cif. LE : éléments légers ..... | 75  |
| Tableau 7 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surfaces et souterrains au niveau des industries extractives au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa) .....                   | 95  |
| Tableau 8: Éléments traces métalliques dans les eaux de surface et les eaux souterraines des carrières et l'industrie extractive au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa). .....   | 104 |
| Tableau 9 : Paramètres physicochimiques et concentrations des ETM dans les sédiments et les sols.....   | 104 |

# *Introduction générale*

## ***Introduction générale***

L'industrie minière est une composante essentielle dans le développement moderne et une source majeure de matières premières, elle englobe diverses activités telles que l'extraction, le traitement et l'enrichissement de minerais, visant à extraire des composants précieux et utiles à partir de matériaux, de roches et de ressources énergétiques (Lottermoser, 2010). L'extraction minière, le traitement et l'enrichissement du minerai, l'exploitation de carrières et l'extraction de matériaux et de roches ne sont pas, du moins, sans effet sur l'environnement. En effet, cette industrie toute particulière et bien surveillée de près, elle représente l'une des premières et des plus significatives activités humaines, exerçant un impact substantiel sur la santé et la sécurité environnementales (Angelova et al., 2020; Jamal et al., 2019; Parise, 2010)

Durant le développement d'une mine ou d'une carrière, plusieurs impacts sur l'environnement sont observés. Ces impacts comprennent notamment les eaux de drainage acide provenant des mines contaminées, qui peuvent entraîner l'altération irréversible des écosystèmes aquatiques et des terres agricoles. De plus, la réduction de la superficie des bassins-versants et la destruction des cours d'eau peuvent entraîner une diminution des ressources en eau. Les émissions fugitives de poussières et les émanations aériennes des équipements de concassage peuvent également avoir des répercussions sur la faune et la flore environnantes. Pendant la phase opérationnelle, des impacts supplémentaires liés à la pollution de l'air et de l'eau peuvent survenir en raison de la décharge et du dépôt de déchets et d'autres activités minières intensives (Goix, 2013).

Dans ce contexte industriel, l'exploitation des carrières de granulats à ciel ouvert génère de multiples effets, jugés néfastes, sur l'environnement, notamment l'érosion des sols et de la végétation, la pollution, la dispersion de la poussière, le bruit, les vibrations, la perturbation des systèmes géologiques et géomorphologiques, ainsi que l'altération des écosystèmes (Byizigiro et al., 2020; Dentoni et al., 2020). Il convient de noter cependant que très peu d'études détaillées a été menée pour évaluer de manière exhaustive l'impact des carrières de granulats sur l'environnement.

En Algérie, la littérature scientifique est prolifique en études d'impact sur l'environnement liées à l'exploitation des mines ou des mines abandonnées mais aucune n'a encore été consacrée à l'impact des carrières de granulats. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre thèse, elle vient étudier l'exploitation des carrières de granulats et leur impact sur les principaux écosystèmes environnants. Deux régions cibles ont été sélectionnées dans ce travail, en l'occurrence les régions de Jijel et de Béjaia. Ces deux régions ont été témoins d'une multiplication de chantiers liés aux activités minières et englobant diverses exploitations telles

que les carrières, les gravières, les sablières, ainsi que les mines à ciel ouvert, qu'elles soient en exploitation active ou abandonnées. Il a été relevé que les exploitations abandonnées n'ont pas été suivies d'un plan de réhabilitation adéquat du site industriel, d'où le risque de contamination irréversible de l'environnement adjacent et à grande échelle.

Cette Thèse s'inscrit donc dans une démarche scientifique pluridisciplinaire, reliant le contexte géologique, l'étude du bassin-versant et les activités socio-économiques qui s'y déroulent aux différentes formes de contamination et de pollution des eaux et des sols qu'on peut observer. Elle s'appuie également sur les corrélations accomplies entre nos analyses hydrogéochimiques et les analyses effectuées sur les roches extraites et réalisées à l'aide de différentes techniques géochimiques adaptées aux études d'impact sur l'environnement. Elle a été complétée ensuite par l'étude des vibrations dues aux explosions dans les carrières étudiées, par l'interprétation des essais sismiques entreprises en septembre 2020. Elle vise à examiner et mettre en lumière de manière approfondie les impacts et effets environnementaux de ces activités minières en tenant compte donc des caractéristiques géologiques et socio-économiques locales de chaque site d'étude.

A cet égard, nous avons sélectionné la carrière en activité d'El M'cif à Chekfa (Jijel) comme exemple représentatif d'une carrière active, relativement récente, reconnue pour la haute qualité géomécanique de ses granulats. Elle est située dans un environnement naturel vierge et préservé, faisant partie du bassin versant du Nil. Ce site est traversé par l'Oued Aftis, un affluent de l'Oued Saayoud, lui-même affluent du Nil. Notre choix se justifie par notre objectif d'identifier l'origine des concentrations élevées en métaux lourds observées dans plusieurs zones du bassin versant du Nil, comme le confirment des études antérieures (Belli et al., 2010; Belli & Leghouchi, 2018; Krika & Krika, 2017). Après vingt ans d'exploitation, cette démarche vise à déterminer si l'activité minière est responsable des anomalies géochimiques constatées, en particulier les teneurs problématiques en métaux lourds ou si ces concentrations résultent tout simplement d'une configuration géologique et géochimique tout à fait naturelle et propre à la région d'étude.

Le Piton d'Akbou au Sud-Ouest de Béjaia est notre second cas d'étude. Ce site industriel d'importance économique majeure dans la région englobe une diversité d'industries extractives. Elles se déclinent en carrières, gravières et sablières. En effet, les carrières sont actuellement à l'arrêt depuis une dizaine d'années, quant aux sablières et gravières situées tout au long du cours de la Soummam sont encore opérationnelles. A la différence du premier site étudié, les carrières du piton d'Akbou appartiennent à un environnement fortement anthropisé qu'est le bassin

versant de la Soummam. Ce site constitue le point de convergence de trois oueds, en l'occurrence, oued Sahel, Oued Boussellam et oued Soummam.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer l'impact environnemental de l'exploitation minière de matériaux non métalliques en adoptant une approche pluridisciplinaire. Cette approche comprend plusieurs volets : premièrement, une analyse de la qualité physico-chimique et une évaluation de la concentration en éléments traces métalliques (Fe, Pb, Zn, Cu et Cd) dans les eaux de surface, les eaux souterraines, les sédiments des oueds traversant les sites industriels et les sols environnants. Ces analyses ont été effectuées lors de trois campagnes d'échantillonnage menées entre 2019 et 2021. Deuxièmement, l'étude vise à évaluer le niveau de concentration des divers polluants toxiques dans l'environnement en utilisant des méthodes d'indices de pollution statistique, notamment l'indice de géo-accumulation (I-Geo), l'indice de pollution (PI+PI) et l'évaluation des risques écologiques (ER). Enfin, un troisième volet consiste à identifier les sources potentielles de contamination à travers une analyse approfondie englobant l'environnement physique, le contexte socio-économique, et corrélés aux analyses pétrographiques et géochimiques des roches extraites dans les carrières.

Ainsi, cette approche permettra une évaluation complète et exhaustive de l'impact environnemental de l'exploitation minière de matériaux non métalliques, en examinant à la fois les aspects physico-chimiques et écologiques, ainsi que les facteurs socio-économiques et géologiques qui pourraient influencer la contamination de l'environnement.

Les résultats de cette étude fourniront un premier aperçu sur les effets de l'activité des carrières de granulats en Algérie. Des issues scientifiques utiles qui pourraient servir à mener la réflexion sur une meilleure mise en place des mesures de gestion environnementale afin de contribuer à atténuer des impacts négatifs associés à cette activité extractive. Les mesures d'atténuation sont étudiées et proposées en tenant en compte des spécificités de chaque site industriel et des risques potentiels qui y sont associés. L'objectif principal de ces mesures est de réduire les risques d'incidents ou d'accidents, ainsi que les impacts sur l'environnement et la santé publique.

Ce manuscrit est structuré en cinq grandes parties afin de répondre aux objectifs définis au début et au cours de la thèse. Chaque partie est conçue pour explorer et analyser les différents aspects de la problématique de recherche, permettant ainsi une approche holistique de la question étudiée. Sa structure se présente comme suit :

- L'étude du milieu physique et du contexte géologique de la carrière d'El M'cif à Chekfa, ainsi que le bassin versant auquel elle appartient. Cette analyse permettra de mieux comprendre

les caractéristiques géologiques et les processus environnementaux à l'œuvre dans ce premier site industriel.

- Une étude similaire, mais cette fois-ci centrée sur l'industrie extractive à Akbou et son bassin versant associé. L'objectif est d'évaluer les particularités géologiques et environnementales de cette zone, ainsi que les interactions avec les activités minières.

- Au cœur de notre problématique, aborde spécifiquement les impacts environnementaux résultant de l'exploitation de ces deux carrières. Elle examine les données recueillies et discute des résultats obtenus, en les interprétant à la lumière des connaissances existantes et des objectifs de recherche définis au préalable. Plusieurs superpositions et croisements d'informations et de données ont été accomplies, entre les données analytiques retrouvées dans l'eau, les sédiments et les sols et les analyses géochimiques faites sur les roches extraites afin de déterminer l'origine des métaux lourds, offrant à cette démarche pluridisciplinaire une dimension exploratrice.

- La proposition des mesures d'atténuation des impacts environnementaux identifiés. Ces mesures visent à protéger les ressources en eau, à minimiser les impacts sur le sol et à réduire la pollution de l'air. De plus, des stratégies de réhabilitation des sites miniers sont discutées pour restaurer les zones affectées.

On termine avec une conclusion de l'étude qui souligne les implications des découvertes faites et propose des pistes de recherche futures pour approfondir la compréhension et la gestion des impacts environnementaux des activités extractives en particulier les carrières de granulats en Algérie.

# *Chapitre I*

## *Cadre physique et environnement géologique de la carrière d'El M'cif*

## Chapitre I : Cadre physique et environnement géologique de la carrière d'El M'cif

### I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu sur sur l'environnement naturel et humain de notre première zone d'étude. Nous commencerons par une présentation de la région d'un point de vue administratif et géographique. Ensuite, nous décrirons les aspects hydrographiques, climatologiques et géologiques du site.

### I.2. Situation géographique

La commune de Chekfa est située 23 km au sud-est de la ville de Jijel (Fig .1), elle est délimitée au Nord par la plaine côtière Jijélienne, au Sud par les communes de Chahna et d'Ouled Askeur, à l'Est par les communes d'El Kennar et de Bordj Thar, et à l'ouest par la commune de Taher. La carrière d'El M'cif, faisant partie du bassin versant d'Oued Nil, est positionnée à environ 4 km au Nord-Est de la ville de Chekfa et au Sud-Est de la ville Jijel. Ses limites territoriales s'étendent au Sud jusqu'à l'Oued Aftis, à l'Ouest jusqu'à Mechta El Massiat, à l'Est jusqu'à Mechta El Adjarda, et au Nord jusqu'à Dechra Tousna. Cette exploitation a été initiée en 2005, l'étendue des exploitations industrielles couvre une superficie de 12 hectares. La carrière a été mise en exploitation en 2005, l'entreprise sarl nostrap est spécialisée dans l'extraction de substances minérales non métalliques, ce qui la soumet au régime minier. Ses activités principales incluent l'abattage, l'extraction, le suivi des opérations de concassage, de broyage et de criblage, ainsi que la production d'enrobé et leur commercialisation.

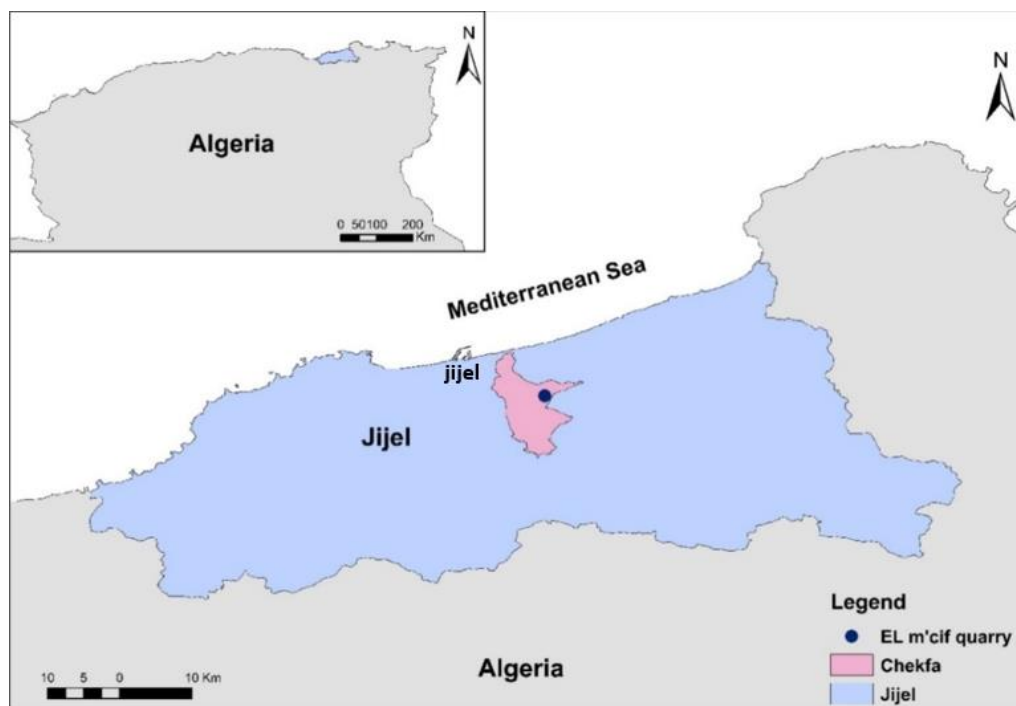


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (la carrière d'El M'cif)



### **I.3. Relief**

Le bassin versant de l'oued Nil se caractérise par une topographie bipartite, comprenant deux unités distinctes. En aval, la plaine alluviale présente une topographie quasi-plane, avec des pentes relativement faibles. Cette configuration géographique est contrastée par les zones montagneuses plus ou moins élevées qui prédominent le long des marges du bassin. Parmi ces reliefs, on recense des sommets assez connus dans la région tels que Sadet (956 m), Touzlant (921 m), Tazamt (851 m), Echla'la (843 m), El Medayene (791 m) et Djebel El kel'A (311 m). Cette diversité topographique influe sur la dynamique hydrologique et les processus géomorphologiques au sein du bassin versant, créant ainsi un environnement complexe et varié. Localement près de Chekfa, les zones montagneuses dominent en couvrant 70% du territoire, tandis que les plaines occupent 30% restants. Les reliefs de la région présentent une diversité, avec des altitudes fluctuantes entre 10 et 1000 m, où Djbel Seddat atteint 956 mètres et Djbel Aghbala 812 mètres.

### **I.4. Réseau hydrographique**

Le réseau hydrographique peut être défini comme la totalité des cours d'eau naturels, permanents ou temporaires, qui servent de voies d'écoulement aux eaux de ruissellement, convergent vers un point unique de vidange du bassin versant, également désigné comme exutoire (Moniod, 1983). Le bassin versant de l'oued Nil (Fig .2) s'étend sur une superficie de 303,24 km<sup>2</sup>. Son réseau hydrographique, caractérisé par une forte densité, englobe quatre sous-bassins versants assez distincts, à savoir : l'oued Nil, l'oued Saayoud, l'oued Boukraa et l'oued Tassift. L'écoulement annuel à l'embouchure de l'oued Nil atteint environ 230 Mm<sup>3</sup>, faisant de cet oued une entité hydrographique de grande importance dans la région de Jijel (Lehtihet, 1983). La zone d'étude est située dans le sous-bassin versant d'Oued Saayoud (Fig .3), couvrant une superficie de 50,5 km<sup>2</sup> et bénéficiant d'un taux de précipitation annuel assez substantiel, oscillant entre 1200 et 1400 mm. Son réseau hydrographique dense est alimenté par plusieurs affluents, contribuant à des débits significatifs pendant la saison des pluies. L'Oued Aftis traverse le site minier étudié, alimentant Oued Chekfa et demeurant l'un des cours d'eau les plus importants de la région. Le site minier est approvisionné par une source avec un débit considérable.

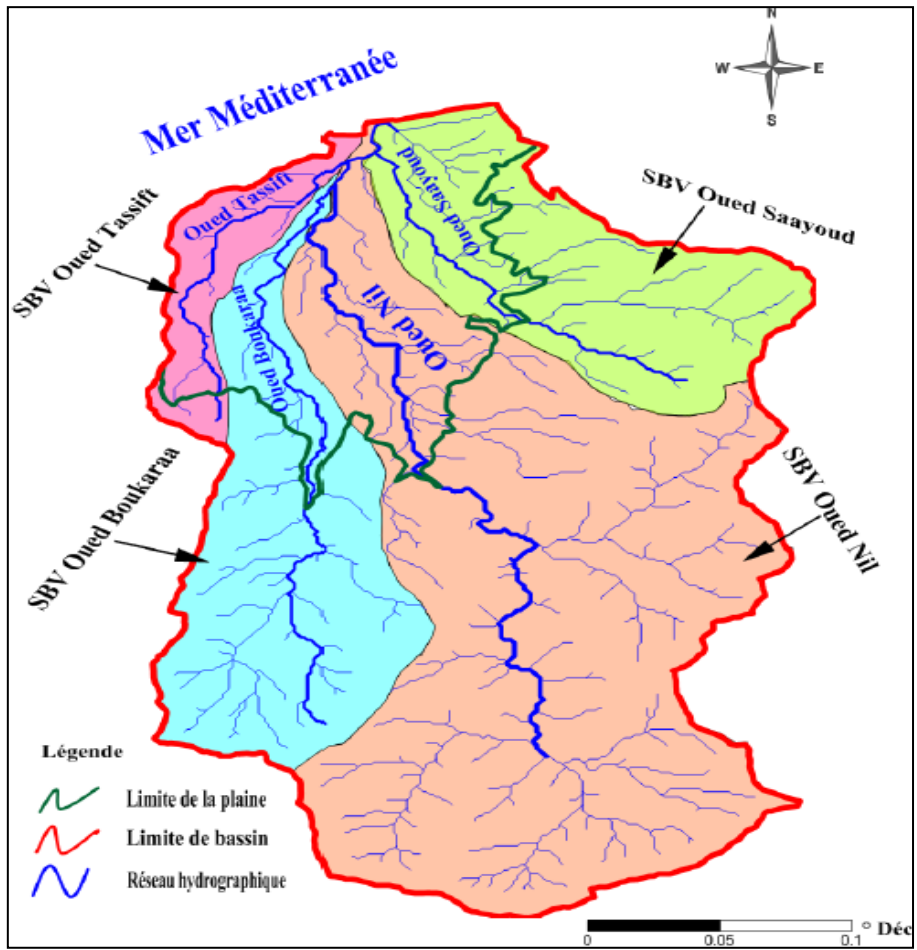


Figure 2 : Les sous bassins versants d'oued Nil (Bouakkaz & Zentout, 2020).

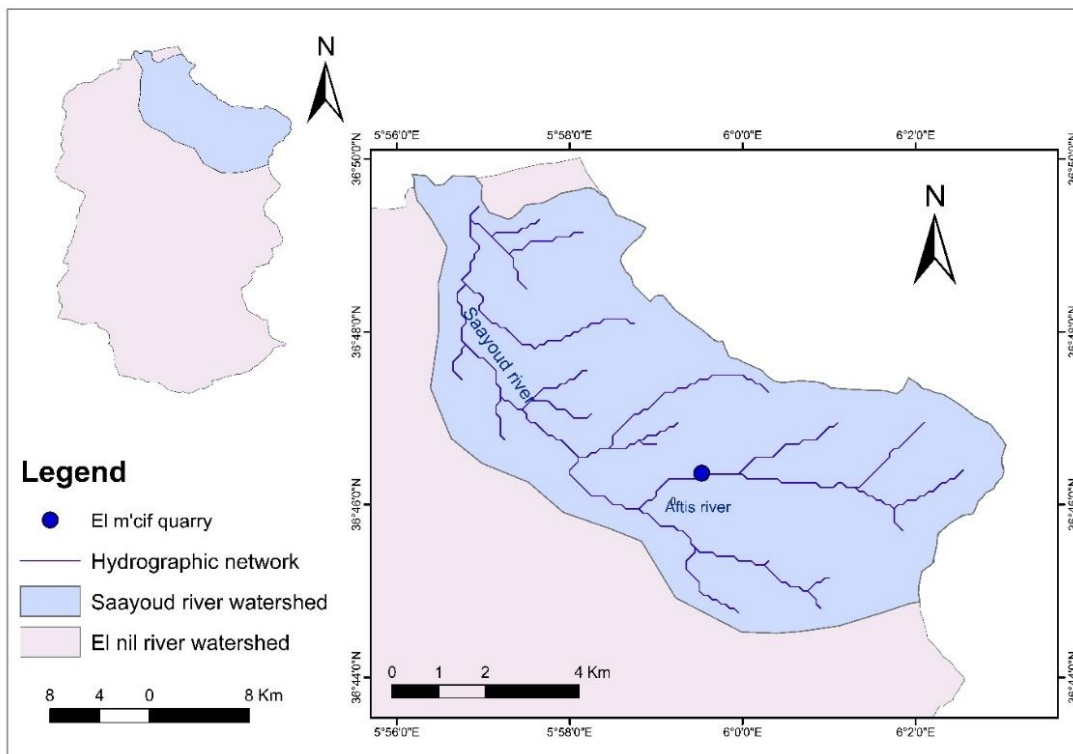


Figure 3 : Réseau hydrographique au niveau de sous bassin versant d'oued Saayoud.

## **I.5. Végétation**

Dans une étude d'impact sur l'environnement, la végétation est d'intérêt crucial. En effet, la végétation présente dans le bassin versant de l'oued Nil se caractérise par une couverture forestière substantiellement dense, située principalement dans les zones montagneuses en amont. Ces massifs forestiers s'étendent sur les piémonts, où les oliviers, les chênes et les frênes coexistent. Cette configuration forestière est particulièrement prédominante dans certaines municipalités du bassin versant de l'oued Nil, telles que les montagnes Chahna, Bordj Thar, Oudjana.

Dans notre zone d'étude, la biodiversité végétale s'étend à des conifères tels que les pins, des spécimens de chênes lièges et de chênes Zen, des oliviers, ainsi qu'une diversité d'arbres comprenant notamment des acacias et du myrte. En outre, la présence notable de buissons et de plantations arboricoles caractérise le paysage environnant (Rouikha, 2008; Salhi et al., 2020). Les exploitations agricoles se trouvent dans la vallée de l'oued Saayoud, où poussent abondamment des légumes, des pastèques et des oliviers. Ces cultures prospèrent grâce à des conditions climatiques idéales et à la richesse du sol.

## **I.6. Population**

Le bassin versant de l'oued Nil se distingue par une distribution démographique inégale. Au dernier recensement général de la population datant de 2018 entrepris par la direction de la programmation et du suivi budgétaires (DPSB), la population de la commune de Chekfa est estimée à 31899 habitants (ANIREF, 2018). La concentration démographique est particulièrement notable dans des centres urbains d'importance socio-économiques tels que les communes de Taher, Chekfa et Jimar. Par ailleurs, cette répartition démographique a engendré un développement rapide d'activités agricoles et industrielles. Toutefois, cette croissance démographique a eu des répercussions directes sur l'environnement en raison de l'accroissement des rejets d'eaux usées.

## **I.7. Industries extractives**

L'aire industrielle de notre zone d'étude se caractérise principalement par une activité extractive minière. Chekfa abrite des gisements de production de granulats provenant de carrières exploitant des granulats dérivés de roches carbonatées épi-métamorphiques. On citera les carrières El M'cif, Boughaba et El Wafa. En outre, des gisements distincts, tels que celui de kaolin à El Ajarda et le gisement de feldspath à Ouled H'bili, sont identifiés, le dernier devant être le sujet d'un investissement futur de la société sarl nostrap.

## I.8. Climatologie locale

Les données climatiques analysées issues de la station météorologique de Jijel Aéroport-Achouat, localisée dans la partie aval du bassin versant de l'oued Nil, se réfèrent à la période allant de 1988 à 2015. Au cours du mois de novembre, les précipitations atteignent un cumul maximal de 180,4 mm, le qualifiant du mois le plus pluvieux. En revanche, le mois de juillet enregistre la valeur minimale de 1,4 mm, le qualifiant comme le mois le plus sec (Fig .4).

En ce qui concerne les variations mensuelles des températures à la station d'Achouat, on révèle que la température minimale, enregistrée en janvier, atteint 12 °C, faisant de ce mois le plus froid. En revanche, le mois d'août voit sa température atteindre une valeur maximale de 26,5 °C, le caractérisant comme un mois particulièrement chaud. Selon l'analyse de la courbe pluviothermique, on déduit que le climat en question présente des caractéristiques typiques de la région méditerranéenne.

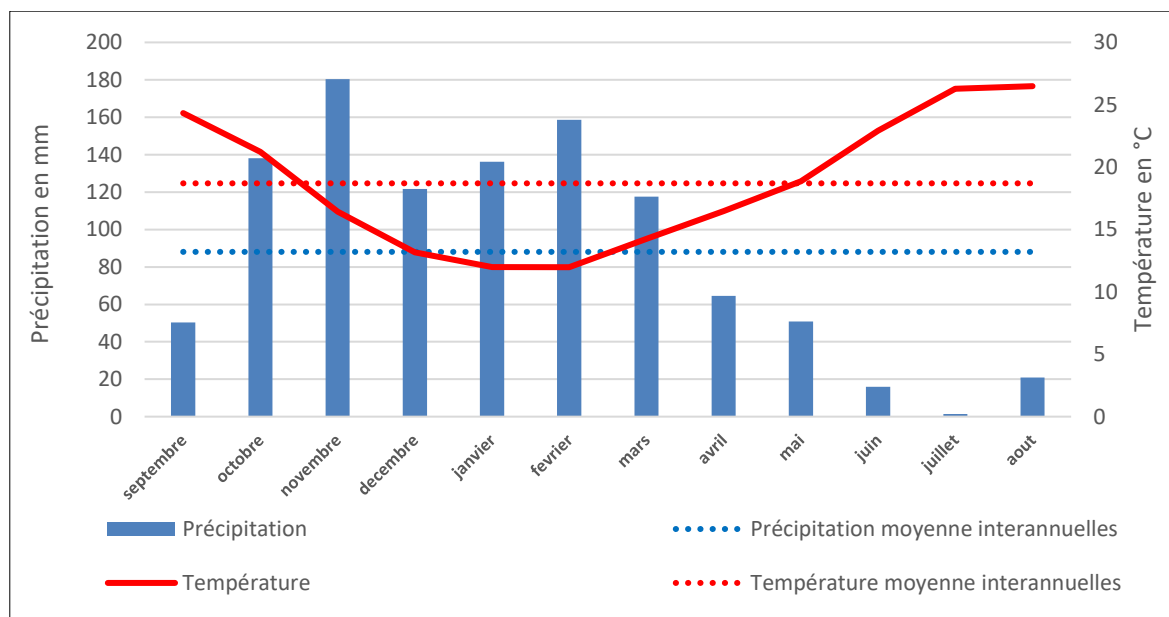


Figure 4 : Digramme Ombro-thermique de la station d'Achouat (1988-2015).

## I.9. Vents

Les vents dominants proviennent généralement de la mer vers le continent, se dirigeant donc du Nord-Ouest vers le Sud-Est (Fig .5). Leur force est généralement comprise entre 2,5 et 4,2 sur l'échelle de Beaufort (Salhi et al., 2020).

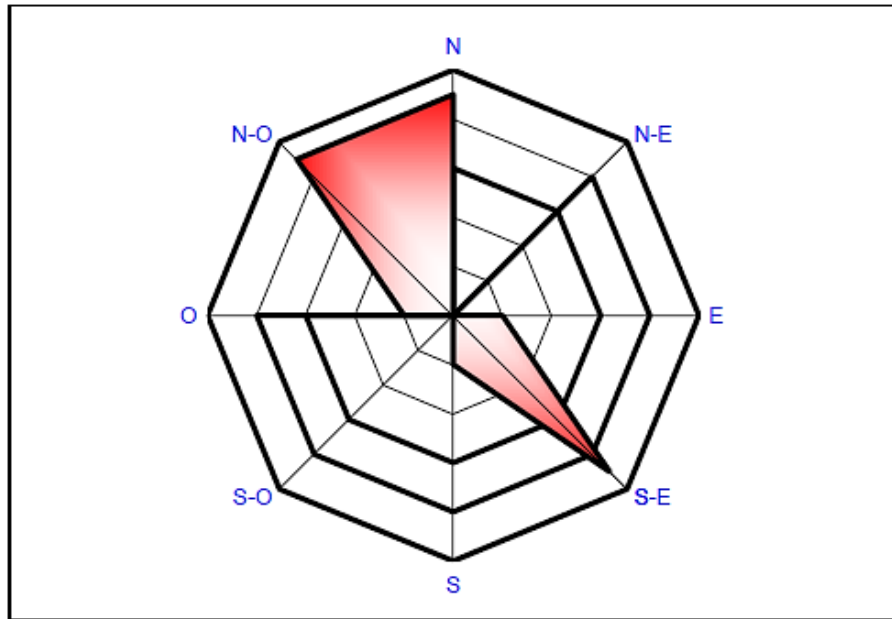


Figure 5 : Rose des vents au niveau du site d'implantation de la carrière d'El M'cif (Salhi et al., 2020)

#### I.10. Géologie du site d'étude

Le domaine interne, dont fait partie le socle kabyle, est représenté par les massifs cristallophylliens métamorphiques et leur couverture sédimentaire. La partie occidentale du socle de petite Kabylie dans lequel se trouve notre secteur d'étude, se compose de deux ensembles lithologiques (Durand Delga, 1955 ; Bouillin et al.,1977 ; Djellit, 1987 ; Afalfiz, 1990):

- Un ensemble inférieur gneissique d'âge paléozoïque, avec des intercalations de marbre et d'amphibolites, avec des intrusions de roches granitoïdes et ayant cristallisé dans le faciès des granulites.
- Un ensemble supérieur schisteux formé de micaschistes intercalés avec des niveaux de marbre et de calcschiste, de quartzite et de porphyroïdes et des schistes satinés faiblement métamorphisé vers le haut.

La carrière d'El M'cif à Chekfa, notre site d'étude, est située au sein de l'ensemble supérieur du socle de petite Kabylie occidentale. Le gisement de roches carbonatées exploité se manifeste en affleurement sous forme de bandes irrégulières et d'amas lenticulaires de roches carbonatées cristallines, blanches, grises ou bleuâtres, micacées, et contenant des sulfures de fer (pyrite) disséminés et en remplissage des fissures. Ces roches sont encaissées dans des schistes micacés et des micaschistes à l'ouest de Chekfa, Rhar Menachou, les monts de Seddat et El Anser à Douar Mechat, ainsi que dans des gneiss ocellés et très kaolinisés à Douar Mechat.

### I.10.1 Caractérisation pétrographique de l'ensemble gneissique

Macroscopiquement les gneiss a deux micas montrent des lits quartzo-feldspathiques séparés par des feuillets de micas. A l'échelle microscopique ces roches contiennent du quartz ( $\text{SiO}_2$ ), oligoclase  $((\text{Na,Ca})(\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8))$ , biotite  $(\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2)$  et muscovite  $(\text{KAl}_2(\text{Al Si}_3\text{O}_{10})(\text{F,OH})_2)$ . Apatite  $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH}))$ , zircon  $(\text{ZrSiO}_4)$ , tourmaline  $((\text{Ca,K,Na})(\text{Al,Fe,Li,Mg,Mn})_3(\text{Al,Cr,Fe,V})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si,Al,B})_6\text{O}_{18}(\text{OH,F})_4)$ , sphène  $(\text{CaTiSiO}_5)$  et rutile  $(\text{TiO}_2)$  comme minéraux accessoires. Les gneiss ocellés montre des yeux centimétriques de feldspath potassique  $((\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ , des phénoblastes de microcline  $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$ , quartz, muscovite et biotite. Les roches carbonatées sont formées principalement de calcites et peuvent contenir du quartz, de phlogopite  $(\text{K Mg}_3 \text{Al Si}_3\text{O}_{10} (\text{OH,F,Cl})_2)$ , rutile, mica et l'épidote  $(\text{Ca}_2 (\text{Fe,Al}) \text{Al}_2 (\text{SiO}_4) (\text{Si}_2\text{O}_7) \text{O} (\text{OH}))$  (Afalfiz,1990).

Les para-amphibolites constitue essentiellement de l'amphibole, contient souvent du diopside  $(\text{Ca Mg Si}_2\text{O}_6)$ , phlogopite, calcite  $(\text{CaCO}_3)$ , épidote  $(\text{Ca}_2 (\text{Fe,Al}) \text{Al}_2 (\text{SiO}_4) (\text{Si}_2\text{O}_7) \text{O} (\text{OH}))$  et sphène  $(\text{CaTi} (\text{SiO}_4)\text{O})$ .

Les ortho-amphibolites formées de l'amphibole associée d'augite  $(((\text{Si,Al})_2 \text{O}_6) (\text{Ca,Mg,Fe,Ti,Al})_2)$ , ilménite  $(\text{Fe TiO}_3)$  et l'apatite .(Bouillin et al.,1977; Djellit, 1987 ; Afalfiz, 1990) .

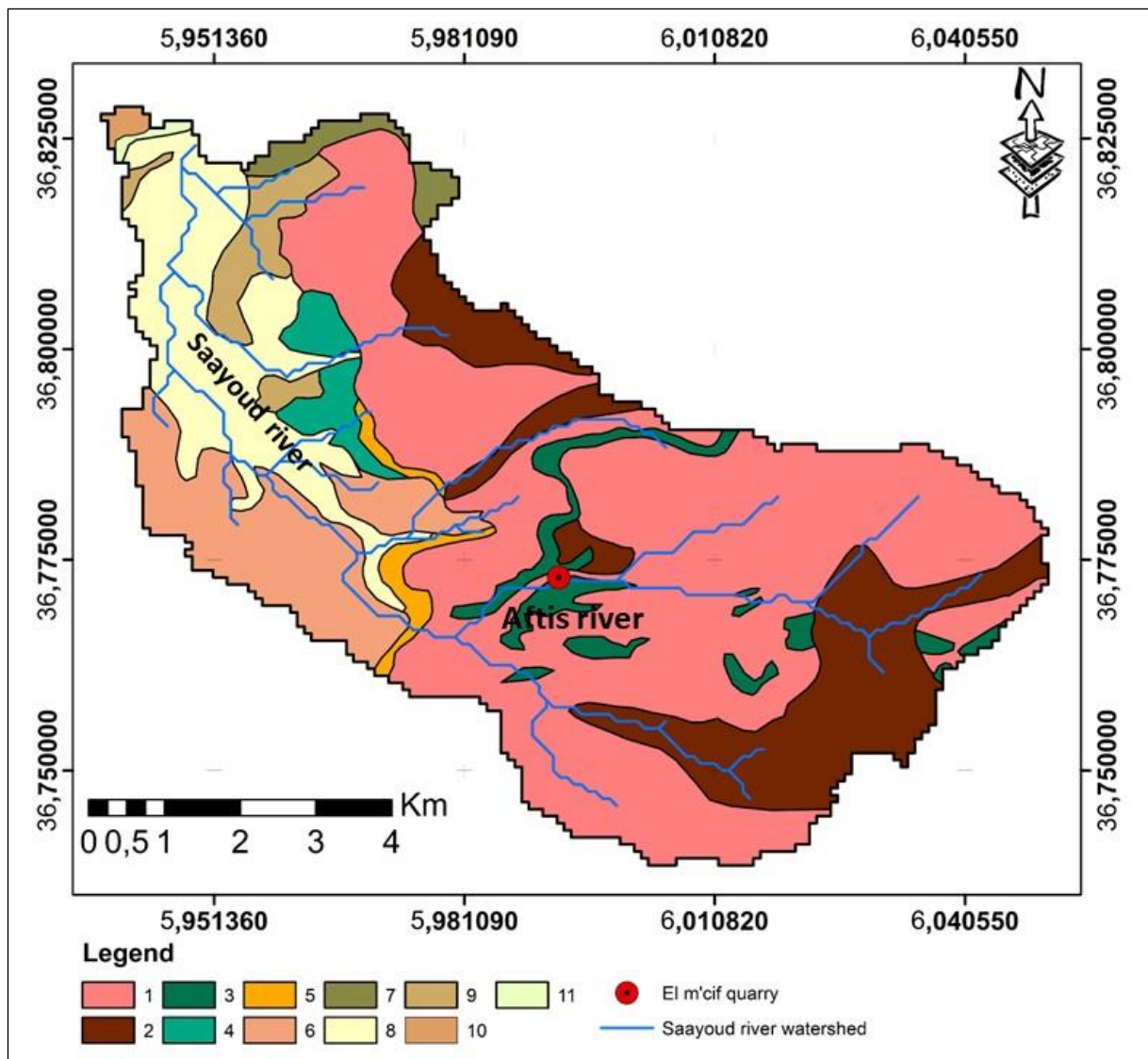


Figure 6 : Carte géologique de la région de Jijel-Chekfa. Extrait de carte géologique d'El Milia 1/50 000. (Dussert&Brives, 1928); 1 : Schistes granulitisés et micaschistes granulitisés (gneiss) , 2 : Schiste micacés, micaschistes, 3 : Calcaires cristallins, 4 : Schistes et phyllades, 5 : Conglomérats et poudingues (Eocène sup), 6 : Marnes sahéliennes, 7: Alluvions détritiques et dunes anciennes, 8:Alluvions récentes, 9:Alluvions marécageuses, 10 :Dunes actuelles Plages, 11:Dunes anciennes consolidées.

## **I.11. Conclusion**

La région de Chekfa, faisant partie du bassin versant de l'Oued El Nil, se distingue par un réseau hydrographique et une végétation forestière assez denses, caractéristiques de la région méditerranéenne. Les roches carbonatées à Chekfa, observées sous forme d'amas dans les encaissements schisto-phylladiques, sont également intrudées par des filons de pegmatite. La compréhension approfondie du cadre physique et géologique du site s'est avérée cruciale pour interpréter l'impact des industries extractives.



# *Chapitre II*

*Cadre physique et environnement  
géologique de l'industrie extractive  
d'Akbou*

## Chapitre II : Cadre physique et environnement géologique de l'industrie extractive d'Akbou

### II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail l'environnement de notre deuxième zone d'étude. Nous commencerons par une description de la région, en abordant ses aspects administratifs et géographiques, les caractéristiques hydrographiques, climatologiques et géologiques du site.

### II.2. Situation géographique

Bejaia, appartenant à la région de la Grande Kabylie au nord de l'Algérie, se trouve à environ 230 km à l'est d'Alger. Cette région montagneuse est enclavée entre les massifs du Djurdjura, des Babors et des Bibans. Elle partage ses frontières à l'ouest avec Tizi-Ouzou, au sud avec Bordj Bou-Arredj, au sud-ouest avec Bouira, à l'est avec Jijel, au sud-est avec Sétif, et au nord bordée par la mer Méditerranée, (Fig .7). Les carrières d'agrégats au niveau du piton d'Akbou et les industries extractives associées sont localisées dans la commune d'Akbou, à environ 70 km au sud-ouest de la ville de Bejaia. Cette région fortement industrialisée et anthropisée, appartenant au bassin versant de la Soummam, se situe sur le versant sud du massif du Djurdjura, précisément sur les terrasses alluviales adjacentes aux rives de la vallée de la moyenne Soummam. Cette partie de la vallée est géographiquement comprise entre Tazmalt et Sidi Aich(Fig .8).



Figure 7 : Localisation de la zone d'étude (les industries extractives et carrières du piton d'Akbou)

### **II.3. Reliefs**

Le bassin versant de l'oued Soummam se distingue par une topographie remarquablement accidentée, délimité par d'imposants sommets montagneux. Le massif du Djurdjura, dont le sommet de Lalla Khedidja culmine à 2308 m, prédomine dans la région, tandis que la partie extrême ouest des Babors est caractérisée par la présence du Djebel Takoucht, dont l'altitude atteint 1890 m. Dans la région d'Akfadou, les altitudes s'élèvent à 1600 m, tandis que l'Aghbalou (Djemâa N'techeriat) atteint une élévation de 1313 m. Les Bibans au Sud affichent des altitudes avoisinant 1100 m, et le Mont Gouraya, également connu sous le nom de Pic de la Dent, s'élève à 672 m (Ramasar, 2008).

A contrario, la plaine adjacente qui se nomme la plaine de la vallée de la Soummam se caractérise par une élévation assez modérée, variant entre le niveau de la mer au Nord-Est et environ 170 ms à Akbou au Sud-Ouest, située en amont du sous-bassin-versant de la Soummam. Les reliefs intermédiaires qui surplombent la plaine présentent localement des altitudes atteignant par endroits 400 à 500 m. Cette variation altitudinale confère à la région une diversité géomorphologique significative, contribuant à son caractère unique du point de vue géographique et géologique.

### **II.4. Réseau hydrographique**

Le bassin-versant de la Soummam s'étend dans la partie orientale de l'Algérois, situé à une distance de 100Km au sud-est d'Alger. Couvrant une superficie de 9125 km<sup>2</sup>, cette zone représente 19 % de l'étendue totale du vaste bassin Algérois-Hodna-Soummam (AHS). Les frontières du bassin sont délimitées par les massifs montagneux du Djurdjura et ses contreforts, qui s'étendent jusqu'à la mer au nord, les contreforts du mont du Hodna au sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'est, ainsi que le plateau de Bouira à l'ouest (Boulguerager, 2014). Cette région se compose de 10 sous-bassins regroupés en trois entités majeures, à savoir les sous-bassins-versants du Boussellem, du Sahel, et de la Soummam (Kessasra, 2015).

Le réseau hydrographique principal du bassin versant de la Soummam est structuré autour de trois cours d'eau prédominants. À l'ouest, l'oued Sahel et ses affluents occupent une position significative, tandis qu'à l'est, l'oued Boussellem et ses affluents jouent un rôle crucial dans le système de drainage. Ces deux cours d'eau convergent aux environs d'Akbou, formant ainsi l'oued Soummam qui, après un trajet d'environ 80 km, atteint son embouchure à Béjaïa et déversant dans la mer Méditerranée (Fig .8).

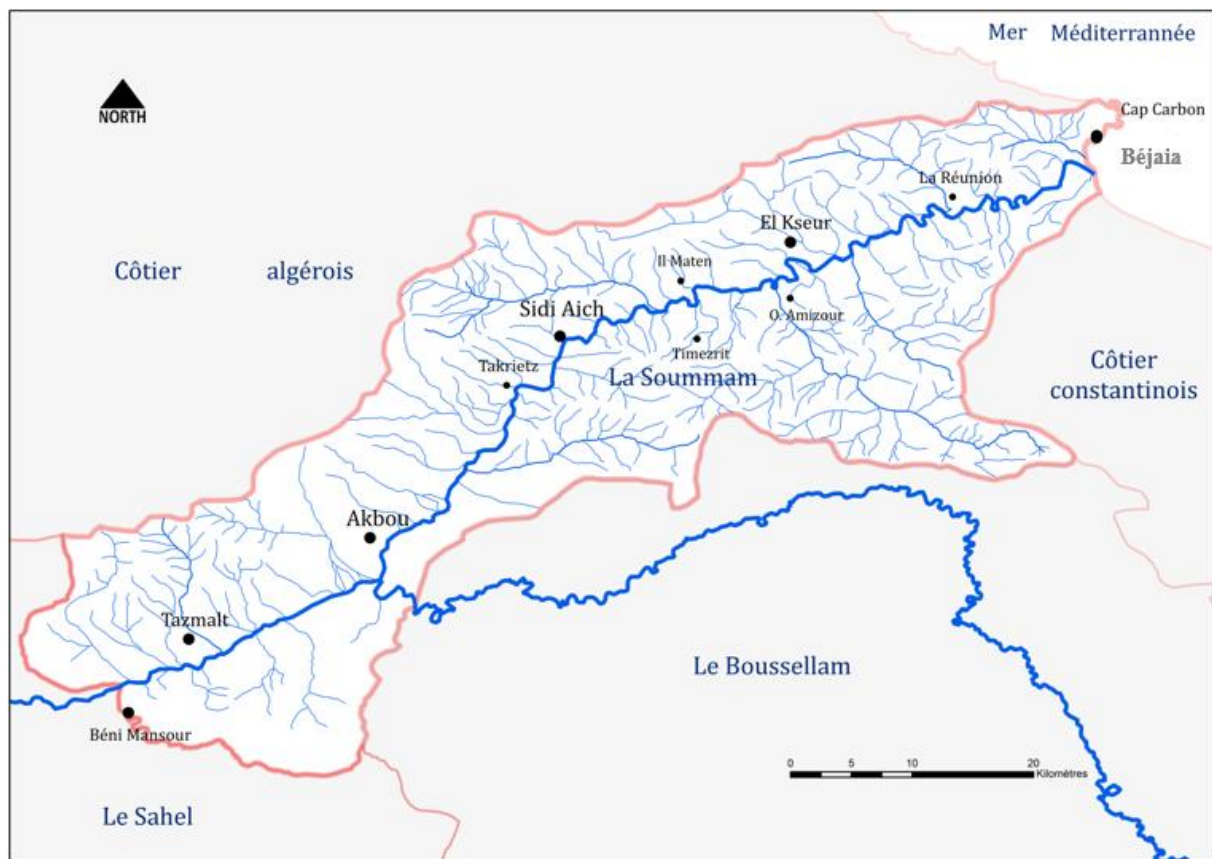


Figure 8 : Les sous bassins versants de la Soummam (Kessasra, 2015).

## II.5. Végétation

La vallée de la Soummam, en raison de son abondance en eau, s'est transformée en un environnement favorable au développement d'espèces hydrophiles. Le paysage végétal dans les versants de basse altitude est modelé par des pratiques agricoles traditionnelles, principalement axées sur la culture d'oliviers et de petites parcelles de maraîchage familial situées en périphérie des zones habitées. Les zones de haute montagne, quant à elles, conservent généralement une végétation naturelle, comprenant des formations arbustives telles que le Chêne kermes (*Quercus coccifera*), le Chêne vert (*Quercus ilex*), le Chêne liège (*Quercus suber*), et le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*). Les plaines alluvionnaires fertiles présentent une diversité de milieux, avec des cultures maraîchères intensives, des formations végétales naturelles arborescentes en bordure des cours d'eau, en particulier le long de l'oued Soummam (Ramasar, 2008).

Concernant notre zone d'étude, la végétation est limitée, se composant principalement d'un maquis d'oliviers, avec une absence remarquable de plantes herbacées et de flore arborescente. Au sud du piton, s'étendent les terrasses alluviales de l'Oued Soummam, partiellement occupées par une zone d'activité et des habitations récemment construites. Le reste de la zone est

partiellement dédié à la culture de céréales et de maraîchage, avec une prédominance de plantations d'oliviers (Bizriche&Benkerrou, 2012).

## **II.6. Population**

Les concentrations démographiques les plus notables se situent principalement aux abords des centres urbains majeurs tels que Tazmalt, Akbou, Sidi Aich, El Kseur, Amizour et Béjaïa. En revanche, les communes montagneuses périphériques affichent des densités plus modérées, comme à Ighil Ali et Tamokra. Ces zones se démarquent principalement par la présence de bourgs et de hameaux isolés, formant un paysage dispersé (Kessasra, 2015). Néanmoins, une concentration démographique de populations se manifeste sur les flancs montagneux, en particulier au sein de certaines communes montagneuses situées à proximité de la vallée, telles que Souk Oufella, Chemini, Semaoun et Feraoun. En général, la densité démographique moyenne peut présenter des variations. Au dernier recensement général de la population datant de 2018 par la direction de la programmation et du suivi budgétaires (DPSB), la population de la commune d'Akbou est estimée à 84626 habitants (ANIREF, 2018).

## **II.7. Activités industrielles**

Six zones industrielles sont actuellement en activité tout au long de la vallée, à savoir celles de Tazmalt, Akbou, Sidi Aich, El Kseur, Amizour et Béjaïa. La distribution sectorielle de ces zones présente une relative homogénéité, bien que la croissance soutenue de l'industrie agroalimentaire concentrée principalement dans les communes de Béjaïa, Akbou et El Kseur(PNE, 2010).

Akbou, hébergeant la zone industrielle de Taharacht étendue sur environ 42,2 hectares, se positionne comme un pilier majeur de l'activité industrielle dans la vallée. L'exploitation du piton d'Akbou répond à une demande constante sur le marché local en granulat. Ce gisement de roches massives est exploité en tant qu'industrie extractive à ciel ouvert, principalement sur le flanc sud et la partie orientale de l'édifice. La concession est exploitée conjointement par deux entreprises, encotrab et somacob (Kessasra, 2015).

De plus, il existe des sablières situées à l'est du piton, des gravières, des installations des stations de concassage et des cimenteries qui sont toujours en activité. Ces installations industrielles ne sont pas sans impacts sur la nappe alluviale, les écosystèmes associés et environnants. Ces activités entraînent une exposition accrue de la nappe alluviale à des vulnérabilités résultant de la mise à nu occasionnée par ces pratiques extractives. (Kessasra ,2015).

## II.8. Conditions climatiques

A l'échelle régionale, les conditions climatiques du bassin versant de la Soummam présentent une diversité assez marquée en raison de variations continentales (Fig .9). Dans la région de Bejaia et de la vallée de la Soummam inférieure, le climat est principalement de type méditerranéen, (Fig .10), caractérisé par une humidité modérée et des variations saisonnières légères de la température. Cette zone littorale jouit d'un climat pluvieux et doux en hiver, ainsi que sec et chaud en été.

Par ailleurs, sur les plateaux de Sétif et de Bouira, le climat devient plus continental et sec, avec des hivers froids et des étés chauds (Fig .9). La partie méridionale du plateau de Sétif est dominée par un climat aride. Les zones de montagne, quant à elles, se caractérisent par un été sec et chaud, ainsi qu'un hiver pluvieux et froid, avec des températures parfois descendant à 0°C et en dessous, accompagnées de chutes de neige(Zouggaghe et al., 2014).

A l'échelle locale, les données climatiques examinées, couvrant la période de 1996 à 2019 à la station métrologique de Tazmalt fournies par l'Office National de Météorologie, permettent de dégager des tendances climatiques caractéristiques de la vallée de la moyenne Soummam. Le mois de février se démarque avec des précipitations atteignant un cumul maximal de 113,8 mm, établissant ainsi son statut de mois le plus pluvieux. En revanche, le mois de juillet se caractérise par une valeur minimale de 10,6 mm, le positionnant comme le mois le plus sec.

En ce qui concerne les variations mensuelles des températures, il est observé que la température minimale, enregistrée en janvier, atteint 11,4 °C, faisant de ce mois le plus froid de l'année. A contrario, le mois d'août se distingue avec une température maximale atteignant 25,9 °C, le qualifiant ainsi de mois particulièrement chaud (Fig .10).

Les vents principaux soufflent majoritairement depuis l'Ouest et le Sud-ouest, ainsi que depuis l'Est et le Nord-est, avec une vitesse oscillante entre 5 et 10 m/s. En hiver, leur vitesse dépasse souvent 16 m/s. En particulier en hiver, les vents dominants proviennent de l'Est Nord-est, à la frontière entre les communes d'Ouzellaguen et de Chelladen (P.D.A.U, 2009).

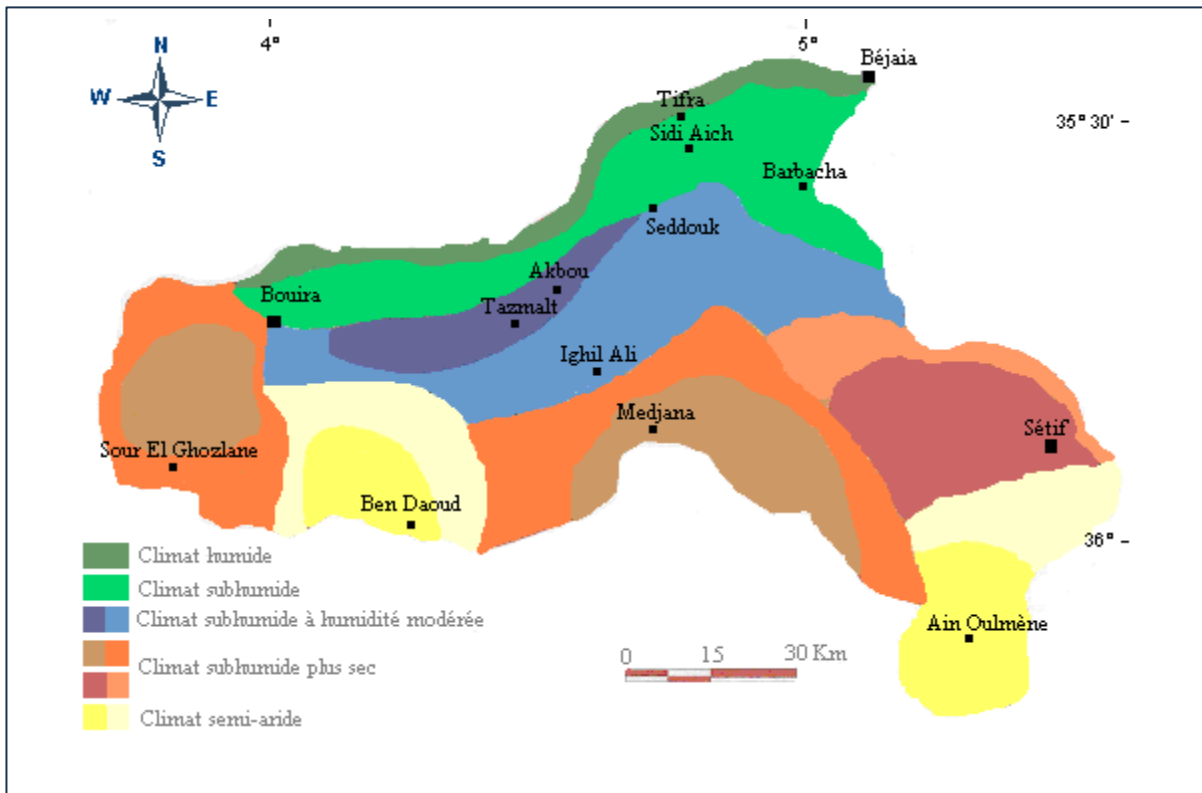


Figure 9 : Zones climatiques du bassin versant de la Soummam (Kessasra, 2006).

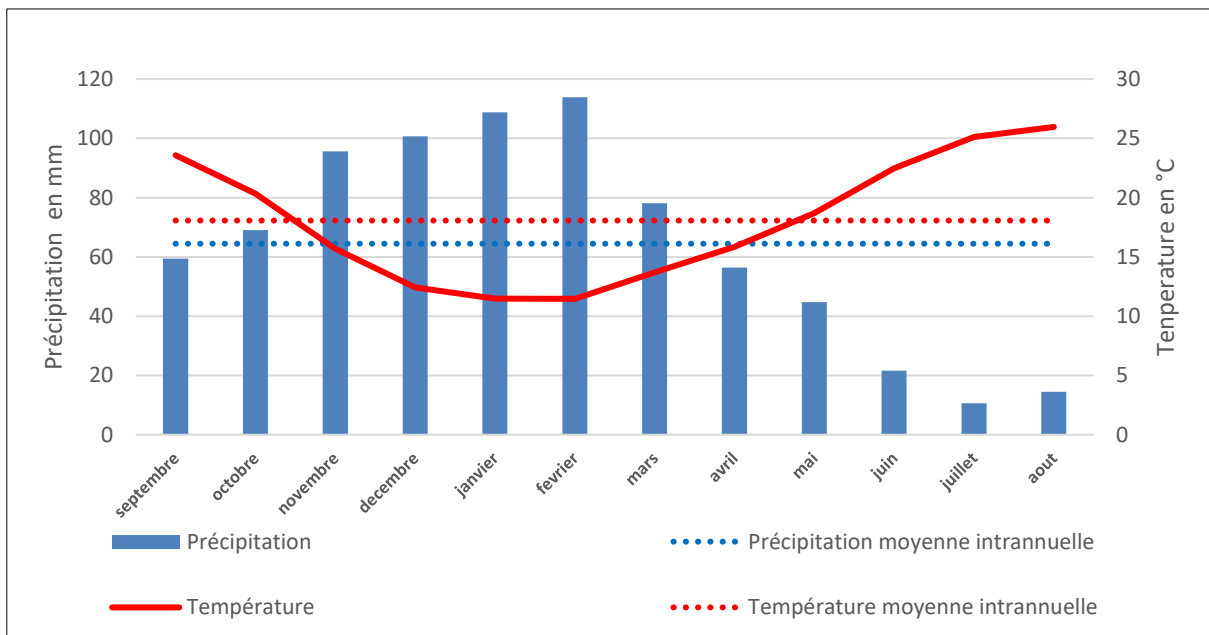


Figure 10 : Digramme Ombro-thermique de la station de Tazmalt (1996-2019).

## II.9. Géologie du site d'étude

Le relief montagneux d'Adrar Gueldamane se caractérise par une crête dentelée s'étendant le long de la rive droite de l'Oued Soummam et se terminant à l'ouest par le Piton d'Akbou qui est une continuité morphologique et géologique de l'Adrar Gueldamane (Fig.11). Les formations géologiques qui constituent le Piton d'Akbou sont des formations carbonatées (Coutelle, 1979):

- Calcaires dolomitiques et dolomies
- Calcaires massifs, oolitiques, et à débris
- Calcaires à grain fin à silex
- Calcaires, lits siliceux et marnes en bancs décimétriques.
- Pélites satinées blanchâtres, calcareuses.
- Pélites blanchâtres.
- Pélites sombres, Pélites claires, de grès blancs à taches rouges. Passées conglomératiques locales.

Le territoire compris entre le piton d'Akbou et Adrar Gueldamane est occupé par le lit de la vallée de la Soummam. La vallée présente cinq terrasses datant du mio-plio quaternaire, elles jouent un rôle crucial dans le fonctionnement hydrogéologique de la nappe aquifère. Ces terrasses se composent principalement de matériaux grossiers tels que les sables, les galets et les graviers, reposant sur un substratum marneux d'âge miocène également, les argiles oligocènes voire même les calcaires crétacés à une centaine de mètres de profondeur. Cette configuration confère à la vallée un potentiel hydrogéologique assez important (Kessasra, 2015).



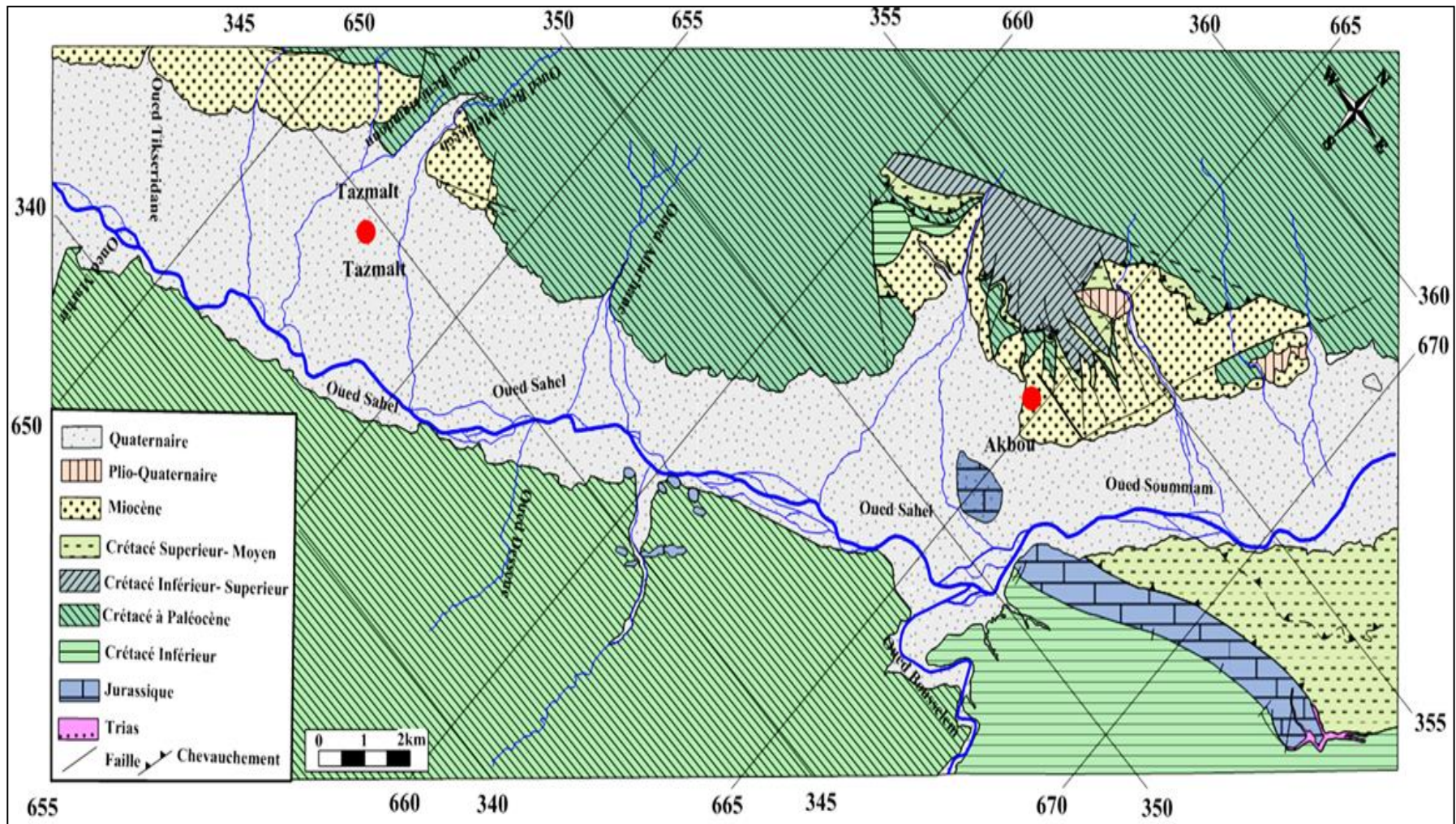


Figure 11: Schéma géologique de l'unité d de Bou-Hamza autour de la Moyenne vallée de la Soummam , au 1/50 000ème.

Source : TECHNOEXPORTSTROY SOFIA (1971)

## **II.10. Conclusion**

Le Piton d'Akbou, situé dans le vaste bassin versant de la Soummam, se distingue par son réseau hydrographique dense et sa végétation limitée, principalement composée d'un maquis d'oliviers. On observe une absence remarquable de plantes herbacées et d'arbres, ce qui est caractéristique du climat méditerranéen. Le Piton d'Akbou est composé de diverses formations géologiques carbonatées, telles que des calcaires dolomitiques, des calcaires massifs, oolitiques, à grain fin à silex, ainsi que des pélites de différentes teintes et textures. La vallée de la Soummam, présente cinq terrasses datant du mio-plio quaternaire, composées principalement de matériaux grossiers.

***Chapitre III***  
***Matériels et méthodes***

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

### **III.1. Introduction**

Dans la perspective d'évaluer l'incidence de l'exploitation minière sur l'environnement, les mesures In situ complétées par les analyses au laboratoire des différents compartiments de l'environnement s'avèrent indispensables. Il s'agit des mesures des paramètres physicochimiques, des concentrations des métaux lourds dans les écosystèmes étudiés. D'abord les écosystèmes aquatiques, à savoir les eaux de surface qui sont oued Aftis à Chekfa et oueds Sahel, Boussellam et Soummam, à Akbou, et les eaux souterraines représentées par la source située au niveau de la carrière d'El M'cif et les forages captant l'aquifère mio-plio-quadernaire de la vallée de la moyenne Soummam; ensuite dans les sédiments tapissant le lit d'oueds Aftis à Chekfa et les oueds, Sahel, Boussellam et Oued Soummam à Akbou et enfin, les sols jouxtant les deux sites d'extraction.

Ce chapitre expose donc la méthodologie analytique suivie dans cette étude d'impact sur l'environnement, englobant les différentes phases d'échantillonnage, de préparation des échantillons, ainsi que les analyses conduites sur les eaux, les sédiments et les sols. Il est complété par un aspect lié aux effets sur la vibration des ondes à travers la présentation des tests sismiques mesurant donc les vibrations des tirs à l'explosif réalisés près de la carrière d'El Mcif à Chekfa.

### **III.2. Campagnes d'échantillonnage d'eaux .**

Trois campagnes ont été menées dans le but de collecter des échantillons d'eau de surface, d'eau souterraine, de sédiments et de sol à proximité des deux sites étudiés. Elles ont été menées en période des hautes eaux en Janvier et en Mai 2021 et en période des basses eaux, en Septembre 2019.

Au niveau de la carrière d'El M'cif, trois prélèvements d'eau de surface (S1,S2,et S3) ont été sélectionnés le long de la rivière Aftis et un prélèvement d'eau souterraine (Fig.12) . Ils sont répartis le long de l'oued d'amont en aval afin de pouvoir évaluer l'impact de l'industrie extractive sur la qualité de l'eau. La première station d'échantillonnage nommée S1 est située en amont de toutes les industries extractives. Ce choix est motivé par notre objectif de vouloir caractériser l'état initial de l'eau naturelle de l'oued Aftis sans l'influence d'aucune activité anthropique. Elle fera ainsi office de station témoin. La deuxième station nommée S2 a été choisie à proximité du site d'extraction. Ce choix correspond à l'endroit d'entrepôt des machines et de l'usine de traitement. Elle servira à évaluer l'impact, qui pourrait être direct, de l'industrie

sur la qualité de l'eau. La troisième station nommée S3 a été choisie en aval de l'oued, permettant ainsi un certain mélange des rejets industriels et de l'eau naturelle de l'oued étudié. Elle servira à estimer l'impact de l'industrie extractive et déterminer le cheminement des contaminants. En outre, un échantillon d'eau souterraine a été prélevé à la source située au sein de la carrière d'El M'cif nommée S4, elle est souvent utilisée dans l'approvisionnement en eau potable du chantier (Fig.12) .

Au niveau du site du piton d'Akbou , la configuration du réseau hydrographique nous a contraint à l'échantillonnage des eaux dans trois oueds, en l'occurrence, Oued Sahel, Oued Boussellam et la Soummam(Fig.13). Quatre stations ont été ainsi sélectionnées. Elles sont réparties le long des oueds d'amont en aval. Ainsi, une station située en amont de toute l'industrie extractive à proximité du piton d'Akbou, elle permettra d'appréhender l'état initial des eaux naturelles de l'oued Sahel, elle est nommée S1. Nous avons également prélevé au niveau de l'effluent principal d'oued Sahel, en l'occurrence Oued Boussellem, la station est nommée S2. Ensuite, une station à proximité du piton afin d'évaluer l'impact de l'extraction et du traitement des granulats sur la qualité de l'eau, elle est nommée S3, ainsi qu'une dernière station située en aval du piton nommée S4, elle vise à estimer le degré d'impact de l'exploitation. Ces stations ont été complétées par l'échantillonnage de deux forages situés au voisinage du piton d'Akbou (Fig .15) . Ces forages captent la nappe du Mio-Plio-Quaternaire qui est composée d'alluvions, de sable, de graviers et d'argiles où deux échantillons d'eau souterraine ont été prélevés.





Figure 12: Echantillonnage de l'eau au niveau d'Oued Aftis (chekfa), (Date : 09 /2019)

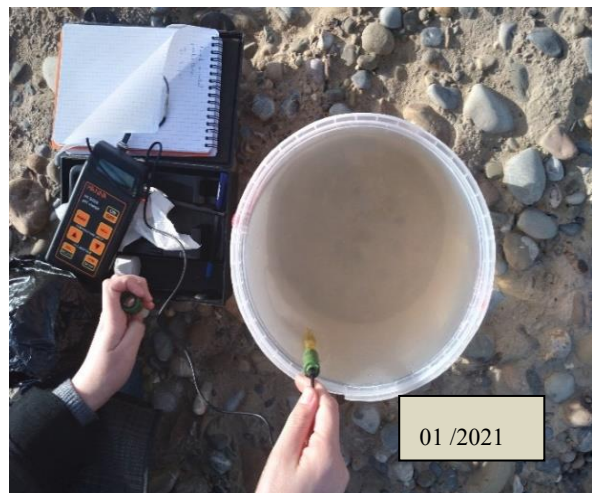


Figure 13 : Echantillonnage de l'eau au niveau d'Oued soummam.

La mesure des paramètres physiques est accomplie in-situ : potentiel Hydrogène (pH), Température (T), Conductivité électrique (CE) à l'aide d'un multi-paramètre (Consort-C561) avec une précision d'analyse de 0,2 %  $\pm$ 1 digit. Pour le pH, un autre pH-mètres type HANNA HI 8424, 1 % de F.S.de plage de conductivité électrique et 0,5 °C de température (Fig .12,13). Les échantillons destinés aux analyses chimiques ont été collectés et stockés sur terrain dans une glacière à 4°C jusqu'à leur acheminement au laboratoire. À leur arrivée, nos échantillons ont été acidifiés jusqu'à l'obtention d'un pH inférieur à 2. Ensuite, ils ont été filtrés à travers une membrane Millipore de 0,45 $\mu$  m et conservés dans un réfrigérateur jusqu'au jour de la lecture



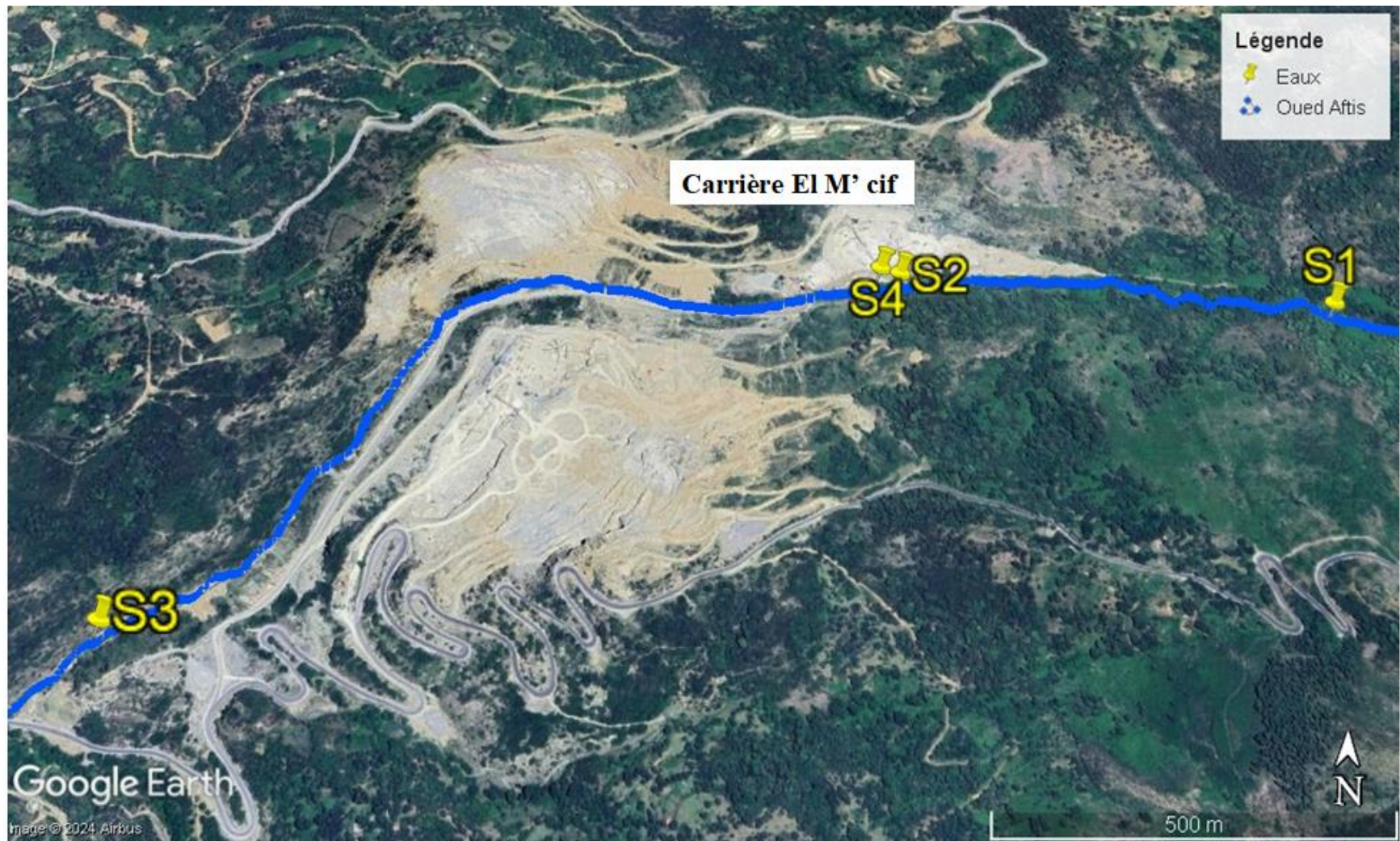


Figure 14 : Inventaire des points d'échantillonnage de l'eau au niveau de la carrière d'El M'cif .



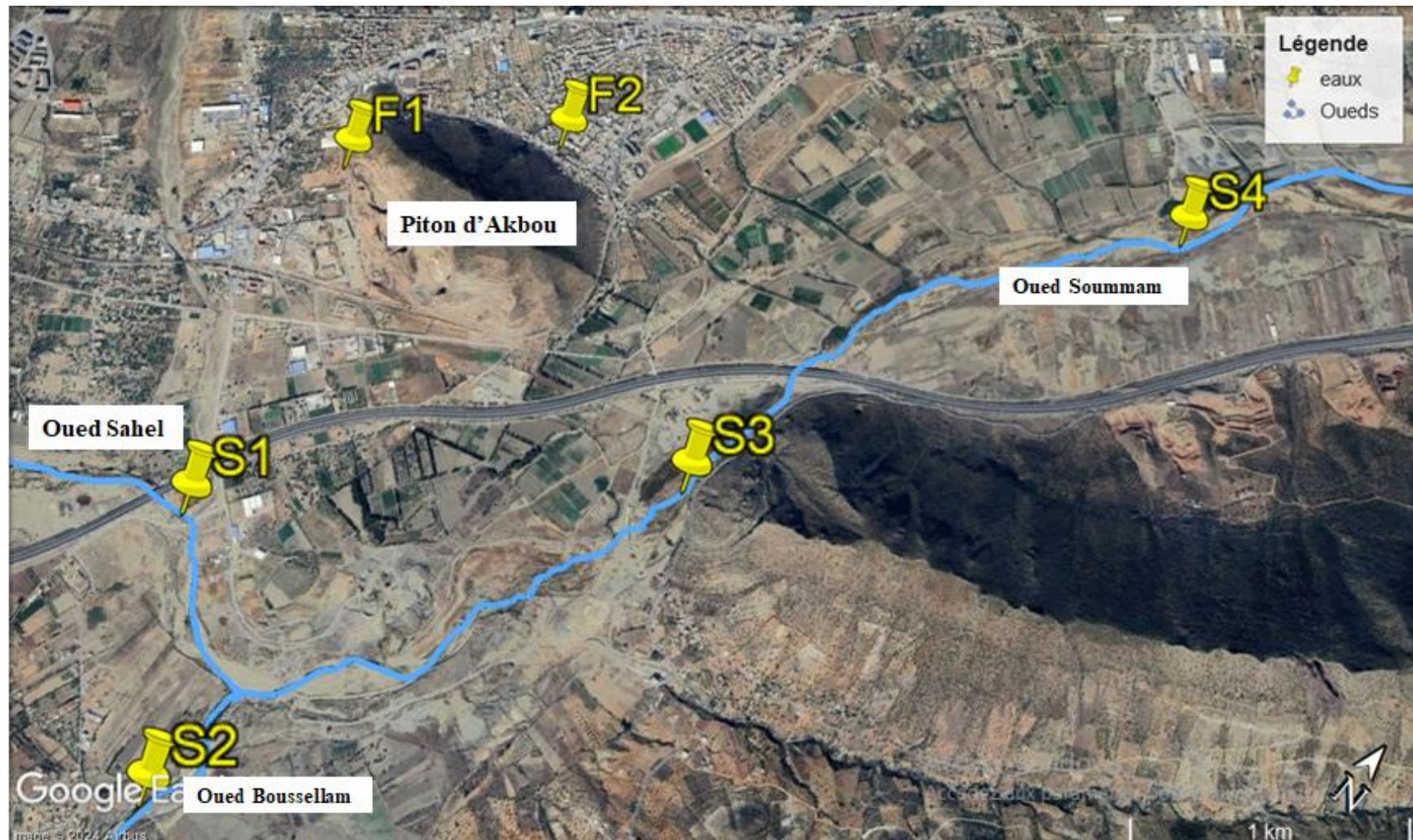


Figure 15 : Inventaire des points d'échantillonnage de l'eau au niveau du site d'Akbou.



Le dosage des ions de calcium, magnésium et chlorure a été réalisé par la méthode volumétrique au laboratoire de génie géologique (LGG) de l'université de Jijel. Quant aux sulfates, nitrates, nitrites, phosphore, ammonium ont été dosés par spectrophotométrie à l'aide d'un spectrophotomètre (UV 1600 PC) au LGG, le sodium et le potassium par le spectrophotomètre d'émission de flamme (AFP100 FLAME PHOTOMETR Biotech Engineering Management CO.LTD) aux laboratoires pédagogiques du département des sciences de la matière de la faculté des sciences exactes et informatique de l'université de Jijel (Fig .16). Les analyses chimiques des éléments majeurs et des ETM dans l'eau ont été conduites en suivant les protocoles et méthodes décrits par Rodier et al. (2009).



Figure 16 : Equipements utilisés dans l'opération de dosage des éléments majeurs au laboratoire (LGG).

### III.3. Echantillonnage des sédiments et des sols

Au niveau des deux sites étudiés ; l'échantillonnage des sédiments est effectué aux mêmes endroits correspondant aux précédentes stations d'échantillonnage d'eau de surface. Trois échantillons de sédiment ont été prélevés au niveau d'Oued Aftis à Chekfa à une profondeur de 0-5 cm (Fig .17). En outre, cinq échantillons de sol ont été prélevés dans la zone de la carrière à une profondeur de 0 à 20 cm et transportés dans des sacs en polyéthylène jusqu'au laboratoire. L'échantillon de sol à la station 3 a été prélevé à une profondeur de 10-30 cm près de la station de traitement et de concassage (Fig .18). Il en résulte une couche d'agrégats d'une taille comprise entre 7 et 10 cm a été observée, avec des particules de différentes tailles (0/3, 3/8, 8/15, 15/25 et 0/25 mm). il a été procédé par l'élimination de cette couche pour pouvoir accéder au sol sous-jacent, qui est censé être le sol naturel.

Quant au site du piton d'Akbou, quatre échantillons de sédiments ont été prélevés au niveau d'Oueds Sahel, Boussellam et Soummam à une profondeur de 0-5 cm (Fig .19). Ainsi, cette campagne est complétée par quatre autres échantillons de sol prélevés à proximité du piton d'Akbou(Fig .20).

Les échantillons de sédiments et de sol ont été séchés à l'air, désagrégés et passés au tamis de 2 mm. Le pH des échantillons a été déterminé dans une suspension solide-eau avec un rapport liquide-solide de 2,5. La conductivité a été déterminée par l'extrait dilué. Cette méthode consiste à faire des extractions aqueuses avec un rapport Sol -eau (1/5). Les analyses de métaux lourds ont été effectuées sur des échantillons de sédiments et de sol dont la taille des particules était inférieure à 80  $\mu\text{m}$ . Un gramme (1g) d'échantillons de sol et de sédiments ont été digérés à l'eau régale (3:1 HCl-HNO<sub>3</sub>) à température ambiante pendant 12 heures, puis à 180°C pendant 30 minutes sur plaque chauffante selon le protocole développé par Clément, M. & Françoise, P. (2003) que nous avons adopté dans notre étude. Après filtration sur papier filtre Whatman N° 42, chaque échantillon a été dilué à 25 mL avec de l'eau distillée. Après la digestion des échantillons, la teneur en métaux lourds a été déterminée par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) à l'aide d'un Perkin Elmer A Analyst 200 au niveau du laboratoire de géologie et environnement de la faculté des sciences de la terre de géographie et d'aménagement du territoire de l'Université de Constantine 1. Les longueurs d'onde requises sont les suivantes : Fe = 248.3, Pb = 217 nm, Zn = 213.9 nm, Cu = 324.8 nm, Cd = 228.8 nm. Afin de mettre en place un contrôle de qualité, l'appareil de spectrométrie d'absorption atomique a été calibré et normalisé avant que les échantillons ne soient analysés. Les analyses ont été effectuées dans le domaine linéaire des graphiques d'étalonnage ; les solutions étalons ont été préparées par dilutions successives. Chaque analyse a été réalisée en trois exemplaires et les résultats ont été exprimés en moyenne.



Figure 17 : Inventaire des points d'échantillonnage des sédiments de la carrière d'El M'cif .





Figure 18 : Inventaire des points d'échantillonnage du sol au niveau de la carrière d'El M'cif.



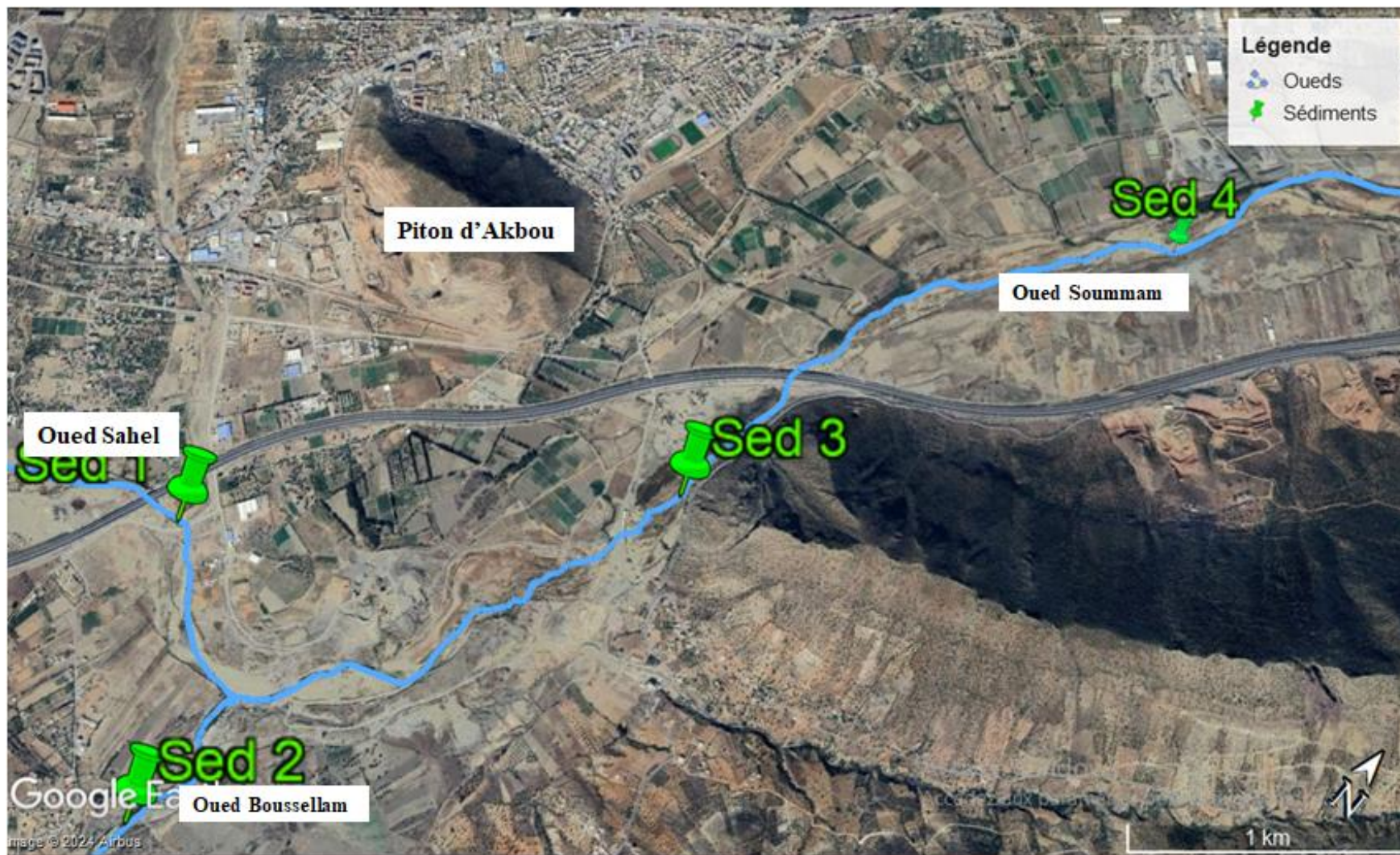


Figure 19 : Inventaire des points d'échantillonnage des sédiments au niveau du site d'Akbou.





Figure 20 : Inventaire des points d'échantillonnage du sol au niveau du site d'Akbou

### III.4. Techniques géochimiques et pétrographiques sur les roches

Dans le but d'identifier l'origine des métaux lourds dans notre environnement industrialisé, une étude pétrographique et géochimique a été menée. Pour se faire, échantillons de roches, sections polies et lames minces ont été préparées et confectionnées dans différents laboratoires de recherche (Fig .21). En effet, cinq échantillons de roches ont été prélevés uniquement à proximité de la carrière d'El M'cif à Chekfa et analysés au laboratoire, le site du Piton d'akbou est à l'arrêt et demeure inaccessible. Des sections polies ont été préparées sur sulfures observés dans les roches carbonatées exploitées. Elles ont été réalisées au laboratoire LGG (Université de Jijel). En outre, des lames minces sont élaborées au niveau du laboratoire des ressources minérales de l'université El Manar de Tunis en Tunisie.

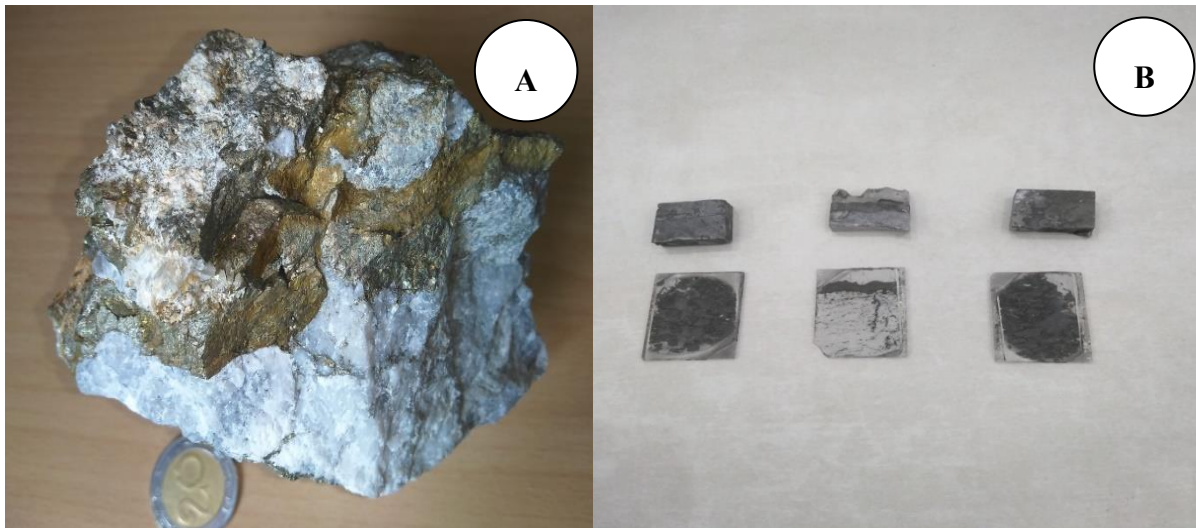


Figure 21 : (A): échantillon de la roche carbonatée à pyrite récolté au niveau du site, (B) : lames minces de la roche carbonatée à pyrite.

Par ailleurs, la XRF est une analyse qualitative qui permet de fournir avec plus d'acuité la composition chimique en éléments majeurs et les éléments métalliques à l'état de traces dans les échantillons de roches. Cinq échantillons de roches de 10 grammes en forme de boulettes ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre à fluorescence X Panalytical Epsilon 3 au Laboratoire de Pollution et de Traitement des Eaux, de la faculté des sciences exactes de l'Université de Constantine 1.

Chaque échantillon de roche prélevé a subi une analyse de composition minéralogique à l'aide d'un diffractomètre à rayons X automatique polyvalent au Smart Lab SE, d'Alger et au niveau du laboratoire de ressources minérales à l'université El Manar de Tunis (Fig .22).





Figure 22 : Diffractomètre à rayons X (PANalyticalX'Pert PRO) au laboratoire de ressources minérales à l'université El Manar de Tunis.

En complément également, nous avons réalisé une série d'analyses géochimiques à la recherche d'éléments traces métalliques sur les mêmes roches au niveau de laboratoire des ressources minérale à l'université El Manar de Tunis. Après le broyage d'échantillon de roche avec le broyeur en agate, une quantité de 0.30 g de l'échantillon est attaquée dans un bécher en téflon à froid par le mélange de 10 ml d'acide fluorhydrique et 5 ml d'acide perchlorique pendant une nuit. Après, nous avons fait l'attaque à chaud qui est l'évaporation de l'échantillon à sec sur une plaque chauffante à température entre 200 et 300 °C, lorsque l'échantillon devient visqueux et en l'absence de dégagement de fumée blanche, on ajoute 5 ml d'acide nitrique de nouveau et de l'eau distillée et on laisse bouillir. Enfin, après refroidissement on transvase la solution dans une fiole de 100 ml ou de 50 ml et on complète jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée. Grâce à l'absorption atomique on effectue le calcul de la concentration des éléments traces métalliques suivants : Pb, Cu, Zn, Cd (Fig .23).





Figure 23 : Analyse d'ETM sur les roches par la SAA au laboratoire de ressources minérales à l'université El Manar de Tunis.

### III.5. Evaluation des vibrations des tirs

Dans le cadre de l'étude d'impact environnemental de la carrière d'El M'cif, la générale des mines a réalisé un test sismique à l'aide de nomis séismographes. L'objectif de l'étude était de déterminer la loi d'atténuation des tirs de carrière, les effets des vibrations sur les constructions voisines de la carrière à Chekfa, et les effets environnementaux des tirs de carrière. Le tir numéro 14/2020 a été effectué en septembre 2020 à une distance de 478 m de la zone de tir et de 120 m du bâtiment le plus proche.

### III.6. Les indices d'évaluation écologique

L'indice de géo-accumulation (I-geo), l'indice de pollution (PI+IPI) et l'évaluation du risque écologique (RI) ont été appliqués afin d'évaluer le degré de contamination des sédiments et du sol au niveau des deux sites par les métaux lourds étudiés (Tableau.1).

#### III.6.1. Indice de géo-accumulation (Igeo)

L'indice I-geo, développé par Müller en 1969, est une méthode quantitative permettant d'évaluer les niveaux de pollution par les métaux lourds dans les sédiments et le sol, ainsi que l'impact des activités humaines sur l'environnement. Les valeurs (Igeo) ont été calculées à l'aide de l'équation suivante (Müller, 1969) :

$$I_{geo} = \text{Log}_2 (C_n / 1,5 B_n)$$

$C_n$  : la teneur en métaux lourds mesurée dans l'échantillon solide.

$B_n$  : le fond géochimique de la croûte terrestre (Reimann & de Caritat, 1998).

1,5 : le facteur de correction de la matrice de fond utilisé pour tenir compte des variations lithologiques.

### III.6.2. Indice de pollution (IP+IPI)

Le niveau de contamination dans le sol et les sédiments a été évalué en calculant l'IP et l'IPI des métaux étudiés (Seklaoui et al. 2016). L'IP est défini comme le rapport entre la concentration mesurée de métaux lourds dans les sédiments et le sol ( $C_n$ ) et le fond géochimique local ( $B_n$ ), la valeur de l'IP est définie comme suit :

$$PI = \frac{\text{la teneur en métaux lourds mesurée } (C_n)}{\text{le fond géochimique de la croûte terrestre } (B_n)}$$

La valeur moyenne de l'IP des métaux étudiés définit l'IPI.

### III.6.3. L'indice de risque écologique (RI)

En 1980, le scientifique suédois Hakanson a proposé l'indice de risque écologique (IR) pour évaluer le risque écologique posé par les métaux lourds dans les sols et les sédiments d'eau et leur comportement dans l'environnement. L'indice de risque écologique (IR) peut être exprimé comme suit :

$$RI = \sum E_i$$

$$E_i = T_i f_i = T_i \frac{C_i}{B_i}$$

$E_i$  : le facteur de risque unique pour les métaux lourds dans les sédiments de cours d'eau et les échantillons de sol.

$T_i$  : le facteur de réponse toxique pour le métal (i), les valeurs de toxicité de référence pour chaque métal lourd dans l'ordre suivant :  $T_{Cd} = 30$ ,  $T_{Cu} = T_{Pb} = 5$  et  $T_{Zn} = 1$  (Hakanson, 1980).

$F_i$  : le rapport entre la concentration mesurée  $C_i$  et une valeur de référence  $B_i$  pour les métaux présents dans le sol et les sédiments.

Tableau 1 : Critères de classification de l'indice de risque écologique potentiel

| Grades | $I_{\text{geo}}$            | PI-IPI              | RI                  | Classes d'évaluation écologique |
|--------|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|
| I      | $I_{\text{geo}} \leq 0$     | $PI-IPI \leq 1$     | $RI < 150$          | Risque écologique Faible        |
| II     | $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ | $1 < PI-IPI \leq 2$ | $150 < RI \leq 300$ | Risque écologique modéré        |
| III    | $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ | $2 < PI-IPI \leq 3$ | $300 < RI \leq 600$ | Risque écologique considérable  |
| IV     | $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ | $3 < PI-IPI \leq 5$ | $RI > 600$          | Risque écologique élevé         |
| V      | $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ | $PI-IPI > 5$        | /                   | Risque écologique extrême       |

### **III.7. Normes appliquées**

Le contrôle de la qualité des eaux de surface a été effectué sur la base des directives algériennes pour les eaux de surface en 2011 ; modifiée en 2012. La contamination des eaux souterraines a été examinée sur la base des normes de l’OMS en 2022 et des normes algériennes des eaux souterraines.

La concentration maximale autorisée en nitrates est établie à 50 mg/L pour les eaux de surface et les eaux souterraines, conformément aux normes édictées par les autorités algériennes ainsi que les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

En ce qui concerne l'ammonium, les normes algériennes de 2011 établissent la concentration maximale autorisée à 4 mg/L dans les eaux de surface et à 0,5 mg/L dans les eaux souterraines. Ces valeurs convergent vers les recommandations de l'OMS de 2022, fixées à 0,2 mg/L. Pour les nitrites, la valeur maximale autorisée est de 3 mg/L conformément aux normes de l'OMS émises en 2022.

La réglementation algérienne stipule une limite de 400 mg/L pour les chlorures dans les eaux de surface et souterraines. En revanche, les concentrations maximales autorisées pour les chlorures sont fixées à 600 mg/L dans les eaux de surface et à 500 mg/L dans les eaux souterraines.

Les normes des métaux lourds dans l'eau et le sol varient en fonction des réglementations nationales et internationales, ainsi que des objectifs de protection de l'environnement et de la santé humaine (Tableau.2). La norme de concentration en fer dans les eaux de surface en Algérie est de 1 mg/L, tandis que dans les eaux souterraines, cette limite est établie à 0,3 mg/L. Pour le plomb, les normes algériennes de 2011 fixent la concentration maximale autorisée à 50 µg/L dans les eaux de surface, et à 10 µg/L dans les eaux souterraines, conformément aux normes algériennes de 2011 et aux directives de l'OMS de 2022.

Concernant le zinc, les normes algériennes de 2011 prescrivent une limite de 5000 µg/L dans les eaux de surface et les eaux souterraines, et 50 µg/L dans les normes de l'OMS édictées en 2022. Pour le cuivre, les eaux de surface en Algérie doivent respecter une concentration maximale de 2000 µg/L selon les normes de 2011 et aux directives de l'OMS de 2022 ,tandis que dans les eaux souterraines, cette limite est réduite à 50 µg/L, conformément aux normes algériennes de 2011

En ce qui concerne le cadmium, les normes algériennes de 2011 fixent la concentration maximale autorisée à 5 µg/L dans les eaux de surface et les eaux souterraines, et 3 µg/L selon les normes de l'OMS de 2022.

Par ailleurs, une analyse comparative des concentrations de métaux lourds dans les sols, les sédiments et la croûte terrestre moyenne, conforme à la définition établie par Reimann & de Caritat (1998), a été entreprise. L'objectif sous-jacent à cette comparaison vise à évaluer dans quelle mesure les concentrations des métaux lourds dans les sols et les sédiments excèdent celles de la croûte terrestre moyenne.

Nous avons réalisé une comparaison des concentrations métalliques par rapport à un fond géochimique des sols, et nous avons opté pour utiliser les valeurs de Fe, Pb, Zn, Cu et Cd proposées par Reimann & de Caritat (1998), qui sont respectivement fixées à 30890, 17, 52, 14, et 0,1 ppm, selon leur méthodologie.

Tableau 2 : Normes requises pour les eaux de surface et les eaux souterraines

|                               | Eaux de surface          | Eaux souterraines        |           | Croûte continentale supérieure    |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------------------|
|                               | Normes Algériennes, 2011 | Normes Algériennes, 2011 | OMS, 2022 | Reimann et de Caritat, 1998 (ppm) |
| T°C                           | 25                       | 25                       | 25        | /                                 |
| CE                            | 2800 à 20 °C             | 2800 à 20 °C             | /         | /                                 |
| pH                            | ≥ 6,5 et ≤ 9             | ≥ 6,5 et ≤ 9             | /         | /                                 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 4 mg/L                   | 0,5 mg/L                 | 0,2 mg/L  | /                                 |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 50 mg/L                  | 50 mg/L                  | 50 mg/L   | /                                 |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | /                        | /                        | 3 mg/L    | /                                 |
| Cl <sup>-</sup>               | 600 mg/L                 | 500 mg/L                 | /         | /                                 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 400 mg/L                 | 400 mg/L                 | /         | /                                 |
| Fe                            | 1 mg/L                   | 0,3 mg/L                 | /         | 30890 ppm                         |

|    |           |           |         |          |
|----|-----------|-----------|---------|----------|
| Pb | 50 µg/L   | 10 µg/L   | 10 µg/L | 17 ppm   |
| Zn | 5000 µg/L | 5000 µg/L | 50 µg/L | 52 ppm   |
| Cu | 2000 µg/L | 2000µg/L  | 50µg/L  | 14,3 ppm |
| Cd | 5 µg/L    | 5 µg/L    | 3 µg/L  | 0,1 ppm  |

### III .8. Conclusion

En conclusion, la sélection soigneuse de l'équipement, la conception précise des protocoles d'analyse, l'échantillonnage ajusté en fonction de la disponibilité, ainsi que le choix des méthodes analytiques ont été déployés dans le but de répondre de manière exhaustive à nos premières interrogations . Chaque décision méthodologique est étayée par une recherche approfondie de la validité interne et de la fiabilité des résultats.

Les données recueillies à travers ces méthodologies offrent une perspective approfondie sur les répercussions générées par les industries extractives sur l'environnement.

## ***Chapitre IV :***

***Etude d'impact sur l'environnement de  
l'exploitation de la carrière d'El M'cif  
(Chekfa, Jijel)***

## **Chapitre IV : Etude d'impact sur l'environnement de l'exploitation de la carrière d'El M'cif (Chekfa, Jijel)**

### **IV.1. Introduction**

Le site d'El M'cif se situe dans le sous-bassin versant d'Oued Saayoud, traversé par Oued Aftis. Nous y avons prélevé des échantillons d'eau de surface, une source (eau souterraine) au niveau de la carrière, de sédiments et de sols dans les environs durant les trois campagnes de terrain. Dans la suite de ce chapitre, nous exposerons les principaux résultats obtenus.

### **IV.2. Variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques et métaux lourds**

#### **IV.2.1. Paramètres physiques dans l' eau**

- **Température**

Les fluctuations des températures enregistrées dans les diverses stations sont résumées dans la figure 24. La température est un facteur écologique crucial dans les écosystèmes aquatiques. Les températures mesurées in situ fluctuent de manière relativement stable tout au long de la saison, Les valeurs minimales ont été mesurées aux stations 1 et 2 en janvier 2021 ne dépassant pas 12° C, et une valeur maximale de 25,5° C à la station S3 en aval de la carrière et enregistrée en octobre 2019. L'eau de source varie entre 13 et 25,4 °C, en fonction de la saison. Les températures des eaux de surface et de l'eau de source sont conformes aux normes algériennes et aux normes de l'OMS.

- **pH**

La mesure du potentiel hydrogène (pH) traduit l'acidité ou l'alcalinité d'un milieu, la neutralité étant à pH 7. Le pH de l'eau est la concentration des ions H<sup>+</sup> contenue dans une solution. Toutes les stations semblent avoir un pH essentiellement basique, avec des variations allant de 7,72 à la station 3 en octobre 2019 à 8,88 à la station 1 en mai 2021. Les valeurs du pH de l'eau de source fluctuent quant à elles entre 7,13 et 8,09 (Fig.24).

Il est admis que cette alcalinité de l'eau est étroitement liée à la dissolution des roches dans le gisement de roches carbonatées exploité, qui se manifeste en affleurement sous forme de bandes irrégulières et d'amas lenticulaires de roches carbonatées cristallines, lorsque ces roches se dissolvent, elles libèrent des ions bicarbonate dans l'eau, ce qui entraîne une augmentation de son alcalinité.

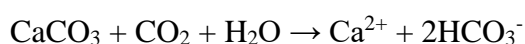
- **Conductivité électrique**

La conductivité électrique permet d'évaluer la concentration des ions présents dans une solution, ce qui donne une indication sur le degré de minéralisation de l'échantillon. Les mesures effectuées lors des trois campagnes d'échantillonnage ont révélé des valeurs comprises entre 362  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à la station 2 et 520  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à la station 3 en aval (Fig.24). Quant à la CE de l'eau de source, elle varie entre 367 et 429  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ . En janvier 2021, la mesure de la conductivité électrique dépasse la norme établie par l'OMS, qui est fixée à 400  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ . Nous constatons que toutes les valeurs de la CE sont inférieures aux limites recommandées par les normes algériennes des eaux de surface et souterraines qui, elles, sont fixées à 2800  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ .

#### **IV.2.2. Paramètres chimiques des eaux**

- **Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ )**

Les fluctuations de calcium dans les différentes stations sont résumées dans la figure 24. La présence de cet élément dans les eaux est liée à la composition géologique des terrains traversés et à la dissolution de gneiss riches en minéraux contenant du calcium, tels que l'oligoclase  $((\text{Na,Ca})(\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si})_2\text{O}_8)$ , Apatite  $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH}))$ , zircon  $(\text{ZrSiO}_4)$ , tourmaline  $((\text{Ca,K,Na})(\text{Al,Fe,Li,Mg,Mn})_3(\text{Al,Cr,Fe,V})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si,Al,B})_6\text{O}_{18}(\text{OH,F})_4)$ , sphène  $(\text{CaTiSiO}_5)$ . Les roches carbonatées contiennent également des minéraux riches en calcium, tels que la calcite  $(\text{CaCO}_3)$  et l'épidote  $(\text{Ca}_2(\text{Fe,Al})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$  (Aalfiz, 1990). D'après la figure 24 les teneurs en calcium varient entre 47,1 mg/l à la station 2 et 157,11 mg/l à la station 3 en janvier 2021. Les fluctuations de la concentration en calcium dans l'eau sont étroitement liées à la lithologie des terrains traversés à l'instar des formations carbonatées métamorphisées. La dissolution de ces formations augmentera la présence du Ca dans l'eau. Il n'en demeure pas moins que le processus de dissolution des roches carbonatées est également influencé par les conditions climatiques favorisant la libération de Ca dans l'eau. Dans la région de Chekfa, caractérisée par un taux de précipitation considérablement élevé, le lessivage et la mise en solution des éléments chimiques sont favorisés. Sur le terrain, l'eau de pluie, enrichie en dioxyde de carbone, entre en contact avec les roches carbonatées, initiant ainsi un processus graduel de dissolution du carbonate de calcium, comme exprimé par l'équation chimique suivante :





De plus, la surface de contact entre l'eau et la roche au niveau de la carrière d'El M'cif facilite probablement une dissolution plus rapide. Par conséquent, les roches fracturées présentent une forte capacité de libérer une quantité accrue de calcium dans l'eau.

- **Magnésium ( $Mg^{+2}$ )**

Les fluctuations dans les différentes stations sont résumées dans la figure 24. Les taux de concentration de magnésium mesurés à Oued Aftis présentent une large variation allant de 1,94 mg/L à la station 2 en mai 2021 à 111,36 mg/L à la station 3 en janvier 2021 (Fig.24).

- **Sodium et Potassium ( $Na^{+}+K^{+}$ )**

Les fluctuations de potassium et de sodium dans les différentes stations sont résumées dans la figure 25. Généralement, ces éléments proviennent principalement de la dissolution des formations salifères, de l'influence de la salinité marine, de l'altération des roches contenant des silicates de sodium, ainsi que des déchets animaux tels que les urines et les selles. De plus, ils peuvent également être apportés par le lessivage des sols après l'utilisation de fertilisants. Les concentrations de sodium varient de façon relativement faible, allant de 15,1 mg/L à la station 2 en janvier 2021 et 32,2 à la station 1 en octobre 2019 (Fig.25).

En ce qui concerne le potassium, les eaux naturelles présentent généralement des concentrations relativement faibles. Cependant, ces valeurs peuvent être influencées par diverses activités humaines telles que l'agriculture, l'exploitation minière et industrielle. Les sources de potassium incluent l'altération des gneiss riches en minéraux silicatés tels que les feldspaths et la tourmaline, ainsi que la dissolution des engrais chimiques. Les concentrations locales varient entre 1,1mg/l à S1 en octobre 2019 et 2,5 mg/l à S3 en mai 2021.

- **Chlorures ( $Cl^{-}$ )**

Les fluctuations des Chlorures dans les différentes stations sont résumées dans la figure 25. Les chlorures peuvent avoir diverses origines, notamment l'intrusion marine, la contamination par les eaux usées domestiques et la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. De plus, l'utilisation des pesticides dans l'agriculture peut également contribuer à la présence de chlorures. A Oued aftis ; les concentrations des chlorures varient entre 53,2 mg/l à la station 1 et 145,5 mg/l à la station 2 en octobre 2019 (Fig.25). Ces valeurs respectent les normes requises, fixées à 600 mg/l selon les normes algériennes et à 500 mg/l selon les normes de l'OMS.

- **Bicarbonates ( $HCO_3^{-}$ )**

Les fluctuations des bicarbonates dans les différentes stations sont résumées dans la figure 24. La principale source des bicarbonates est la dissolution des roches carbonatées, métamorphiques et gypsifères selon l'équation chimique suivante :



A Oued Aftis, les bicarbonates se présentent avec des concentrations sensiblement élevées. Il a été relevé également de notables variations dans le sens de l'écoulement de l'oued depuis l'amont vers l'aval avec en particulier des irrégularités dans les teneurs. Les teneurs varient entre 122 mg/l à la station 2 en octobre 2019 et atteignent 488 mg/l à la station 1 en mai 2021(Fig.24).

Ces fortes teneurs sont probablement attribuables au lessivage des roches carbonatées exploitées dans les carrières, ainsi que les terrains métamorphiques environnants.

- **Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)**

Les fluctuations des sulfates dans les différentes stations sont résumées dans la figure 25 . Le soufre est un élément non métallique qui se trouve naturellement dans les sols et les roches. Il existe sous forme organique, connue sous le nom de soufre protéique, ainsi que sous forme minérale, notamment les sulfates et le soufre élémentaire. Le soufre réagit avec l'oxygène pour former des ions sulfate, qui se trouvent dans certains minéraux tels que le gypse et la baryte. Localement, les teneurs en sulfates des eaux de surface d'oued Aftis varient entre 8,82 mg/l à la station 2 et 48,08 mg/l à la station 3 en janvier 2021(Fig.25). Ces valeurs respectent les normes requises, fixées à 400 mg/l selon les normes algériennes et les normes de l'OMS.

- **Sels nutritifs: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>**

Les fluctuations des sels nutritifs constatées dans les différentes stations sont résumées dans la figure 25. On peut observer que les teneurs en nitrates dans les eaux de surface sont assez faibles, atteignant une valeur maximale de 16,57 mg/L au mois de mai 2021 à la station 1. Les nitrites, quant à eux, sont généralement présents à des concentrations plus faibles, avec une valeur minimale de 0,01 mg/L à la station 1 en janvier 2021 et une valeur maximale de 0,079 mg/L à la station 2 en mai 2021. Toutefois, toutes les stations superficielles sélectionnées ne dépassent pas les normes recommandées pour les nitrates qui sont fixés à 50 mg/L.

Les concentrations de NH<sub>4</sub> dans l'Oued Aftis varient entre 0,003 mg/L à la station 3 et 0,14 mg/L à la station 1. Les analyses montrent des concentrations en orthophosphate très faibles, allant de 0,02 mg/L à la station 3 à 0,077 mg/L à la station 2 en janvier 2021(Fig.25).

Dans notre site d'étude, les concentrations des sels nutritifs sont relativement faibles ; ce qui suggère que cette eau présente une bonne aptitude aux usages.

### IV. 3. Effet saisonnier sur les teneurs

L'influence de la variation saisonnière sur la concentration des éléments dans l'eau est un aspect important à considérer dans notre cas d'étude. Au cours des différentes campagnes de terrain, lesquelles ont été délibérément réparties sur plusieurs saisons, les conditions climato-environnementales telles que les précipitations, la température et l'activité biologique varient d'une période saisonnière à une autre, ce qui peut affecter les concentrations des éléments analysés dans l'eau (Tableau 3). En effet, Pendant la période des basses eaux, il a été relevé une augmentation, tout à fait significative, des teneurs dans l'eau de certains éléments tels que les pH, CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ . L'une des raisons qu'on peut évoquer est que pendant cette période, le débit d'eau dans l'oued est naturellement réduit sous l'effet de l'évaporation ; et par conséquent il est désigné comme étant un débit d'étiage. Sous de telles conditions hydrologiques, il peut entraîner une stagnation de l'eau et par conséquent une hausse des teneurs de certains éléments dissous. Pendant la période des hautes eaux, les concentrations sont plus élevées en calcium et en magnésium. Cela peut être dû aux fortes pluies qui entraînent le lessivage des sols et des roches.

Par ailleurs, l'eau de source qui s'écoule à travers les roches métamorphiques du massif cristallophyllien de la Petite Kabylie présente une EC allant de 367 à 429  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et un pH compris entre 7,13 et 8,09. Les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  fluctuent entre 146,4 et 185,44 mg/L, celles de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  se situent entre 48,1 et 99,39 mg/L et 6,72 et 11,52 mg/L, respectivement. Les concentrations de  $\text{Na}^+$  varient entre 17,1 et 32,8 mg/L, la concentration de  $\text{K}^+$  varie entre 2 et 20,4 mg/L. Quant aux concentrations de  $\text{Cl}^-$ , elles varient entre 60,35 à 81,65 mg/L, les concentrations de  $\text{SO}_4^-$  varient de 6,25 à 13,87 mg/L, et les concentrations de  $\text{NO}_3^-$  varient de 1,39 à 2,62 mg/L. On détecte également de faibles concentrations de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^-$  et  $\text{NO}_2^-$ . Ces valeurs respectent les normes requises, selon les normes algériennes et les normes de l'OMS. D'après les résultats des analyses des éléments majeurs, les eaux de surface et la source située à la carrière d'El M'cif semblent être préservées de toute contamination. La plupart des valeurs des paramètres physico-chimiques retenues dans cette étude ( $\text{T}^\circ\text{C}$ , pH, CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ) se situent principalement dans les limites recommandées par l'organisation mondiale de la santé ainsi que les normes en vigueur utilisées en Algérie.

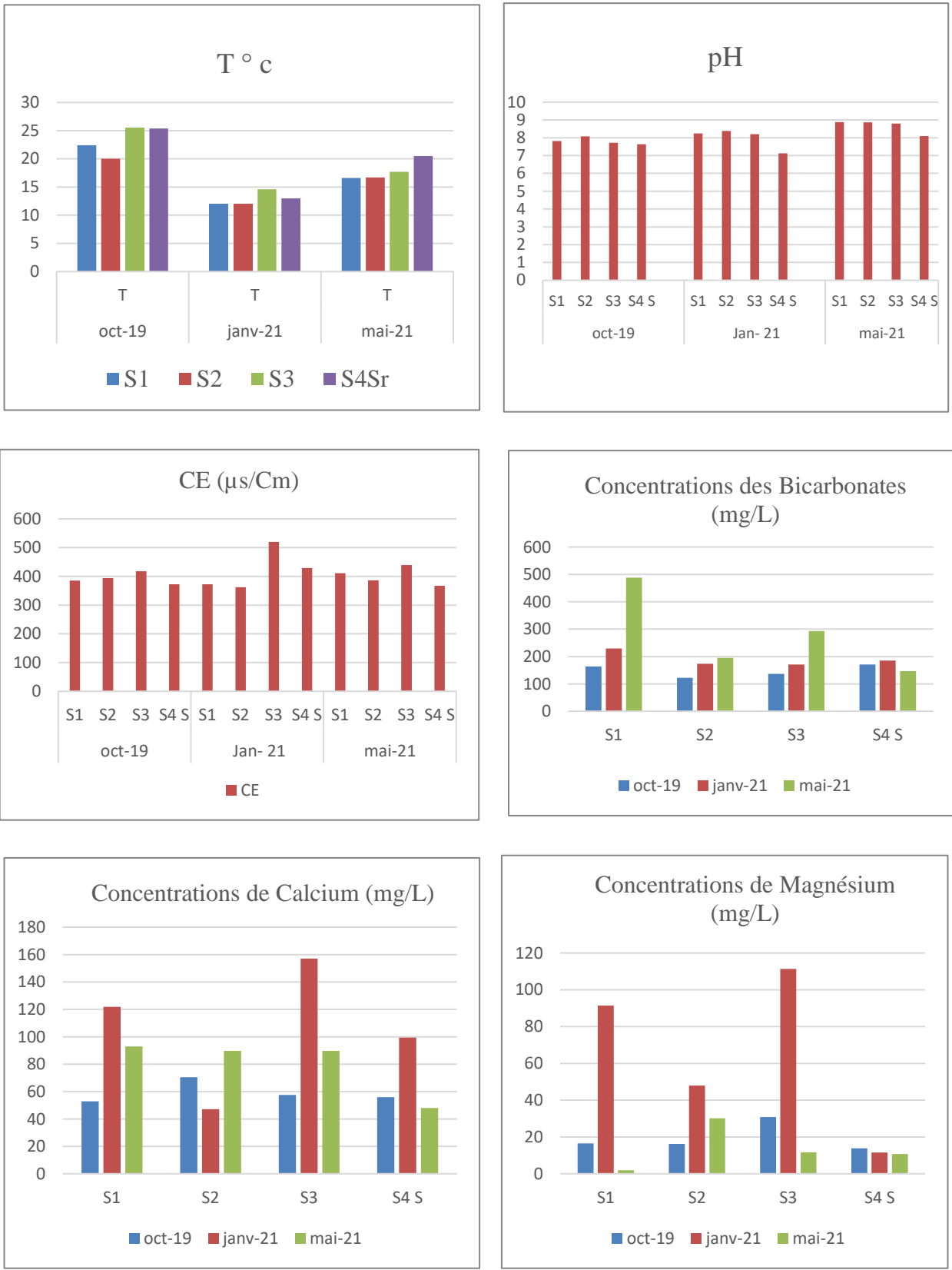


Figure 24 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif

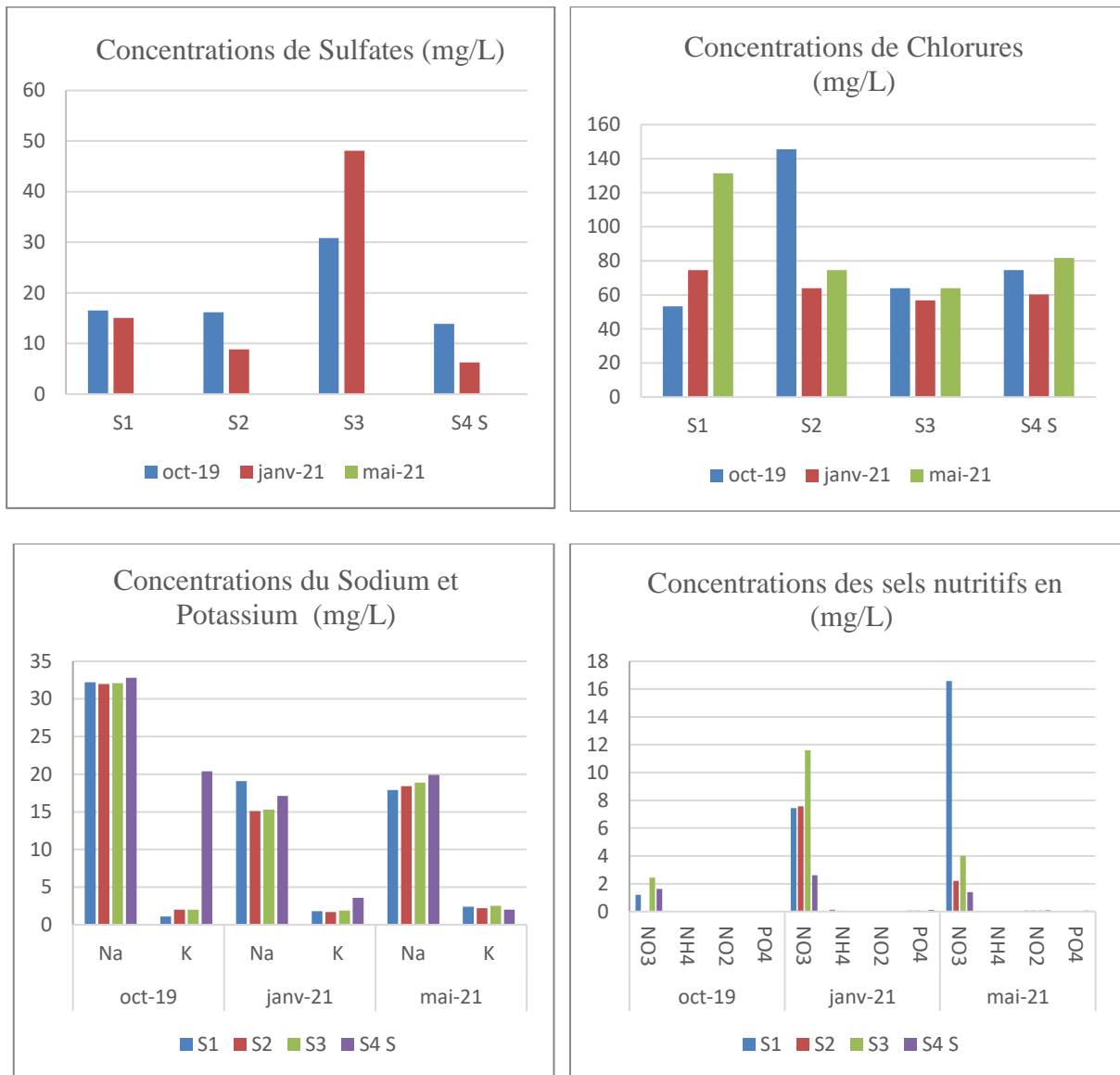


Figure 25 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif .

Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines au niveau de la carrière d'El M'cif (Jijel)

| Paramètres                           | Oct-19 |        |        |       | Jan- 21 |        |        |        | Mai-21 |       |       |       |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                                      | S1     | S2     | S3     | S4 S  | S1      | S2     | S3     | S4 S   | S1     | S2    | S3    | S4 S  |
| T                                    | 22.4   | 20     | 25.5   | 25.4  | 12      | 12     | 14.6   | 13     | 16.6   | 16.7  | 17.7  | 20.5  |
| PH                                   | 7.81   | 8.08   | 7.72   | 7.64  | 8.24    | 8.38   | 8.2    | 7.13   | 8.88   | 8.86  | 8.8   | 8.09  |
| CE                                   | 385    | 394    | 418    | 372   | 372     | 362    | 520    | 429    | 411    | 386   | 439   | 367   |
| O2                                   | 0.8    | 0.38   | 0.43   | ND    | ND      | ND     | ND     | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) | 163.48 | 122    | 136.64 | 170.8 | 229.36  | 173.24 | 170.8  | 185.44 | 488    | 195.2 | 292.8 | 146.4 |
| Ca <sup>+</sup> (mg/L)               | 52.8   | 70.54  | 57.6   | 56    | 121.84  | 47.1   | 157.11 | 99.39  | 92.99  | 89.78 | 89.79 | 48.1  |
| Mg <sup>+</sup> (mg/L)               | 11.52  | 11.52  | 13.44  | 6.72  | 91.36   | 48     | 111.36 | 11.52  | 1.94   | 30.13 | 11.66 | 10.69 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) | 16.55  | 16.17  | 30.84  | 13.87 | 15.08   | 8.82   | 48.08  | 6.25   | 0      | 0     | 0     | 0     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)  | 1.21   | 0      | 2,43   | 1,63  | 7,44    | 7,57   | 11,6   | 2,62   | 16,57  | 2,2   | 4     | 1,39  |
| Cl <sup>-</sup> (mg/L)               | 53,25  | 145,55 | 63,9   | 74,55 | 74,55   | 63,9   | 56,8   | 60,35  | 131,35 | 74,55 | 63,9  | 81,65 |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) | N.D    | N.D    | N.D    | N.D   | 0,06    | 0,077  | 0,02   | 0,118  | 0      | 0     | 0     | 0,06  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)  | N.D    | N.D    | N.D    | N.D   | 0,14    | 0,04   | 0,03   | 0,008  | 0      | 0     | 0     | 0     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)  | N.D    | N.D    | N.D    | N.D   | 0,01    | 0,01   | 0,018  | 0,004  | 0,06   | 0,079 | 0,073 | 0,084 |
| Na <sup>+</sup> (mg/L)               | 32,2   | 32     | 32,1   | 32,8  | 19,1    | 15,1   | 15,3   | 17,1   | 17,9   | 18,4  | 18,9  | 19,9  |
| K <sup>+</sup> (mg/L)                | 1,1    | 2      | 2      | 20,4  | 1,8     | 1,7    | 1,9    | 3,6    | 2,4    | 2,2   | 2,5   | 2     |

#### IV.4. Eléments Traces Métalliques (ETM)

##### IV.4. 1. Variation spatiale et saisonnière des métaux lourds dans l'eau

Les éléments traces métalliques (ETM) sont généralement présents dans l'environnement à des concentrations très faibles, comme leur nom l'indique. Cependant, les activités anthropiques peuvent les introduire davantage plus dans l'environnement (Briffa et al., 2020).

Le tableau 4 présente les concentrations en ETM obtenues des différentes campagnes d'échantillonnage dans Oued Aftis et la source au niveau de la carrière d'El M'cif. Une tendance décroissante peut être observée dans les concentrations des ETM, une tendance qui peut être exprimée comme suit :  $Zn > Pb > Fe > Cd > Cu$ .

Tableau 4 : Concentration des ETM dans les eaux de l'Oued Aftis .

|    | Eaux de surface |       |         |         | Eau de source |       |       |       | OMS  | Normes algériennes $\mu\text{g/L}$ |                |
|----|-----------------|-------|---------|---------|---------------|-------|-------|-------|------|------------------------------------|----------------|
|    | Min             | Max   | Mean    | Sd      | Min           | Max   | Mean  | Sd    |      | Eau de surface                     | Eau souterrain |
| Fe | 52.3            | 230.4 | 105.9   | 56.5    | 57.5          | 95.4  | 75.6  | 19    | 5000 | 1000                               | 300            |
| Pb | 54.5            | 708.8 | 330.2   | 53      | 204.5         | 613.4 | 381.7 | 209.8 | 10   | 50                                 | 10             |
| Zn | 176             | 69516 | 19707.1 | 23530.8 | 9430          | 22890 | 16695 | 967.8 | 50   | 5000                               | 5000           |
| Cu | 5               | 13.4  | 9.3     | 3       | 6.4           | 11.7  | 8.4   | 2.9   | 2000 | 2000                               | 50             |
| Cd | 10              | 24    | 17.7    | 52.7    | 14            | 21    | 17.7  | 3.5   | 3    | 5                                  | 5              |

- **Fer**

Les concentrations de fer dans les stations d'échantillonnage présentent une moyenne de 105.9  $\mu\text{g/L}$ . La figure 26 révèle une variation allant de 52.3  $\mu\text{g/L}$  à la station S3 en octobre 2019 à 230.4  $\mu\text{g/L}$  à la station S2 en janvier 2021.

En ce qui concerne l'eau de source, les concentrations de Fer se situent entre 57.5 à 95.40  $\mu\text{g/L}$ . La valeur maximale a été toujours enregistrée en janvier 2021.

Il est à noter que les concentrations en fer dans les eaux de surface et de source sont conformes aux normes algériennes en matière d'eau de surface, fixées à 1000  $\mu\text{g/L}$ , ainsi que celles concernant les eaux souterraines, établies à 300  $\mu\text{g/L}$ .

Le fer constitue le deuxième métal le plus abondant dans la croûte terrestre, représentant approximativement 5 % de sa composition. La présence d'éléments ferreux à l'état élémentaire

est rare dans la nature, en raison de la tendance des ions ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ) et ferriques ( $\text{Fe}^{3+}$ ) à se combiner facilement avec des composés renfermant de l'oxygène et du soufre, formant ainsi des oxydes, hydroxydes, carbonates et sulfures. La forme prédominante sous laquelle le fer se rencontre le plus fréquemment dans la nature est celle d'oxydes (OMS, 2003).

A oued Aftis près de la carrière, les concentrations en fer sont vraisemblablement d'origine lithologique. La coexistence de pyrites avec les roches carbonatées métamorphisées exploitées pourrait entraîner la libération d'éléments ferreux dans l'eau. La présence de pyrites, qui sont des sulfures de fer, , pourrait induire une mobilisation du fer lors des processus de dissolution et de réaction chimique avec l'eau.

- **Plomb**

On observe des concentrations de plomb significativement élevées dans la quasi-totalité des stations de prélèvement. Nous y avons relevé une moyenne de 330.02  $\mu\text{g/L}$ . La figure 26 met en évidence une variabilité suffisamment large allant de 54.4  $\mu\text{g/L}$  à la station S3 en octobre 2019 pour atteindre 708.8  $\mu\text{g/L}$  à la station S1 en janvier 2021.

Concernant l'eau de source, les concentrations de plomb se situent dans une fourchette importante, allant de 204.50 à 613.40  $\mu\text{g/L}$ . La valeur maximale a été enregistrée en janvier 2021. Il convient de souligner que les concentrations de plomb dans les eaux de surface et les eaux de source de la carrière d'El M'cif dépassent considérablement les limites prescrites par l'OMS ainsi que les normes réglementaires en vigueur en Algérie. Les normes fixées par l'OMS pour les eaux souterraines s'élèvent à 10  $\mu\text{g/L}$ , tandis que les normes algériennes établies pour les eaux souterraines et les eaux de surface sont respectivement de 10  $\mu\text{g/L}$  et 50  $\mu\text{g/L}$ .

Le plomb se trouve naturellement dans des quantités très limitées, cependant, sa production résulte principalement des activités humaines telles que les industries, les véhicules automobiles, et la fabrication de batteries. Les principaux vecteurs de contact humain avec ce métal incluent la poussière, les événements de batteries, la peinture au plomb, ainsi qu'une alimentation contaminée (Raj & Das, 2023).

Au sein d'une carrière en activité, la source présumée du plomb est liée aux activités d'extraction et de traitement des matériaux extraits, lesquels peuvent contenir du plomb. Pendant le processus d'extraction, des particules de poussière contenant du plomb peuvent être générées. De plus, l'utilisation d'explosifs, de machines de forage et d'équipements miniers peut contribuer à la dispersion de particules de plomb dans l'environnement. La gestion inappropriée des déchets miniers, notamment le stockage ou l'élimination inadéquats des résidus miniers,



peut également entraîner la libération de plomb dans le sol et les cours d'eau environnants. Ces éléments techniques se superposent sur les conditions d'exploitation en vigueur actuellement dans la carrière d'El Mcif à Chekfa, d'où la possibilité d'établir un lien direct entre l'exploitation industrielle de la carrière et les fortes teneurs enregistrées dans les eaux naturelles de la région.

- **Zinc**

Le zinc est l'élément le plus abondant dans les eaux de surface et de la source analysées près de notre carrière en exploitation. La moyenne des neuf valeurs des teneurs de zinc dans les eaux de surface d'oued Aftis est de  $19707.1 \mu\text{g/L}$ , soit  $19.70 \text{ mg/l}$ . Selon la figure 26 ; les niveaux de concentration de zinc varient considérablement d'une campagne à une autre, allant de  $179 \mu\text{g/L}$  à la station S1 en octobre 2019 et montent exponentiellement à  $69516 \mu\text{g/L}$  à la station S2 en janvier 2021.

Quant aux eaux de source, elles présentent des valeurs comprises entre  $9430$  et  $22890 \mu\text{g/L}$  ; avec un pic de concentration enregistré en janvier 2021. Les teneurs en zinc dans les eaux de surface et de source de la carrière d'El M'cif dépassent de ce fait les normes requises selon l'OMS et les normes algériennes. Ces dernières sont établies respectivement à  $50$  et  $5000 \mu\text{g/L}$ .

Le zinc pénètre dans les systèmes aquatiques et les sols à la suite de processus naturels et d'activités anthropiques. Les contributions significatives de zinc dans l'eau proviennent de diverses sources, telles que le drainage minier, les déchets industriels et municipaux, le ruissellement urbain, les émissions des centrales électriques au charbon, et l'incinération des déchets. Cependant, l'apport prédominant émane principalement de l'agriculture. Il convient de souligner que, bien que diverses sources anthropiques aient un impact significatif, l'apport prééminent de zinc dans les écosystèmes aquatiques provient de l'érosion des particules de sol contenant du zinc (Grujic et al., 2018)

Des observations marquantes ont été faites au niveau de la carrière étudiée et font ressortir une augmentation significative des concentrations de zinc, particulièrement au cours du mois de janvier 2021. Durant cette période, la station 2, située à proximité de la station de concassage, a enregistré la valeur maximale de zinc, soit  $69516 \mu\text{g/L}$ . Cette corrélation spatio-temporelle suggère une possible influence des activités de concassage au sein de la carrière sur la libération accrue du zinc dans l'environnement. Les processus d'altération météorique ont également été identifiés comme des mécanismes potentiels contribuant à la libération du zinc à partir des amphiboles et les micas (Reimann & de Caritat, 1998) présents dans les formations rocheuses

extraites. Par ailleurs, les activités inhérentes à l'extraction, l'enrobage et aux opérations de carrière, se révèlent être une source substantielle d'introduction de zinc dans l'écosystème local.

- **Cuivre**

Effectivement, les concentrations de cuivre sont présentes en faible quantité, avec une moyenne de 9.3 µg/L. Les niveaux de concentration de cuivre varient de 5 µg/L à la station S1 en octobre 2019 et 13.4 à la station S3 en mai 2021.

De plus, les teneurs en cuivre dans les eaux de source se situent entre 6.40 à 11.7 µg/L, avec comme valeur maximale enregistrée en mai 2021. Il est important de souligner que ces concentrations sont bien conformes aux normes établies par l'organisation mondiale de la santé (OMS) ainsi que les normes algériennes en vigueur. Ces dernières sont établies à 2000 µg/L (Fig.26).

De surcroît, l'accumulation d'ions cuivre provient d'une variété de sources, incluant l'impact de l'industrialisation, le traitement des déchets électroniques, la gestion des déchets urbains, ainsi que les processus naturels d'érosion des métaux, de dissolution, et de lessivage vers la nappe phréatique. Il est important de noter que le cuivre se retrouve fréquemment à des concentrations élevées dans les eaux usées, du fait de son statut de métal précieux et de son utilisation répandue dans divers secteurs industriels, tels que la finition des métaux et le placage électrolytique (Al-Saydeh et al., 2017; Manne et al., 2022).

Au niveau de la carrière, le cuivre peut avoir plusieurs sources. La composition géologique des roches extraites peut libérer du cuivre lors des opérations d'extraction et de traitement. Les eaux de pluie traversant la carrière peuvent également entraîner le lessivage de minéraux contenant du cuivre. De plus, l'utilisation d'explosifs pendant les opérations d'abattage peut libérer des particules fines de cuivre, et les eaux usées industrielles générées lors du lavage des matériaux sur site peuvent contenir du cuivre en raison du contact avec les minéraux extraits.

- **Cadmium**

Le Cadmium est en effet l'élément le plus problématique dans cette étude. On y observe des concentrations alarmantes du cadmium dans toutes des stations de prélèvement. Les teneurs obtenues sont très proches les unes des autres, avoisinant une moyenne de 17.7 µg/L. La figure 26, met bien en évidence cette fluctuation, allant de 10 µg/L à la station S1 en octobre 2019 à 24 µg/L à la station S1 en mai 2021.

Quant aux concentrations du Cadmium dans l'eau de source, elles varient entre 14 à 21 µg/L. avec la valeur maximale enregistrée en janvier 2021. Il est important de noter que les teneurs du Cadmium dans les eaux de surface et de source de la carrière d'El M'cif dépassent largement les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ainsi que les normes algériennes en vigueur. Ces dernières sont établies respectivement à 3 et 5µg/L, soit trois à quatre fois supérieure aux normes, ce qui confère au cadmium son aspect alarmant et problématique dans l'écosystème étudié.

Les principales sources naturelles de cadmium (Cd) comprennent les incendies de forêt et les éruptions volcaniques, aussi bien terrestres que marines, qui ont relâché environ 60 % des émissions naturelles totales de ce métal dans l'environnement. L'altération géologique des roches minérales dans le sol constitue également une contribution significative à la présence de Cd. Par ailleurs, la contamination anthropique des ressources hydriques par le cadmium peut résulter d'activités humaines telles que l'exploitation minière, les procédés de fusion métallurgique, le tabagisme, les rejets d'eaux usées industrielles, ainsi que la présence de particules en suspension dans l'air(Mahmood et al., 2018).

Dans notre site d'étude, l'origine prédominante du cadmium est attribuée en grande partie à des processus géologiques, notamment le lessivage des formations géologiques du socle. Ces formations renferment intrinsèquement des concentrations significatives de cadmium. Par ailleurs, la libération substantielle de ce métal toxique peut résulter de diverses activités anthropiques telles que l'émission de poussières, le rejet d'eaux usées, l'utilisation d'explosifs, la combustion d'huiles lourdes, ainsi que d'autres processus industriels qu'on peut rencontrer sur le site industriel en activité. Ces facteurs contribuent à l'augmentation des niveaux de cadmium dans l'environnement local.

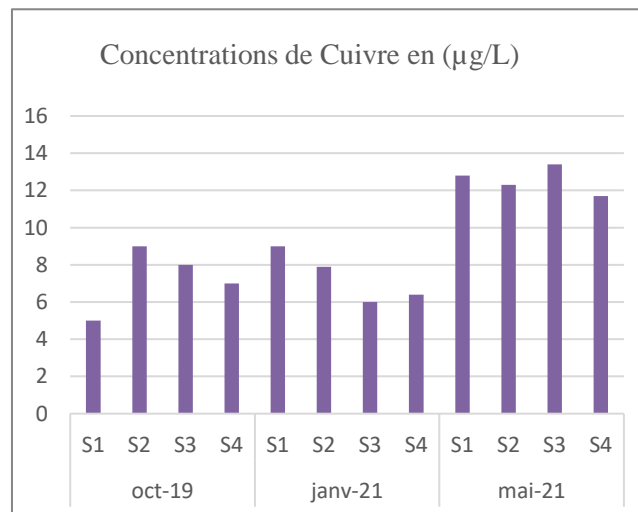
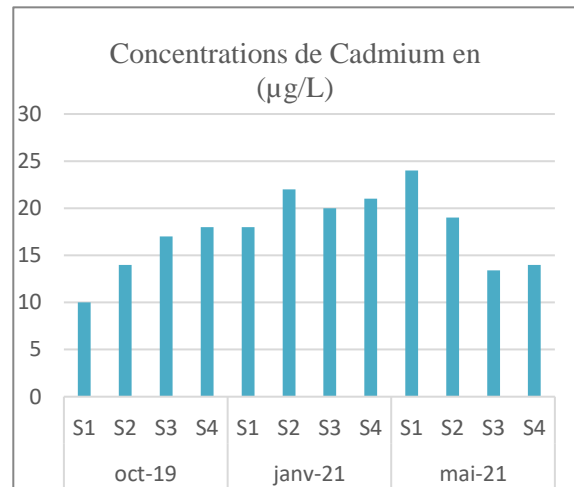
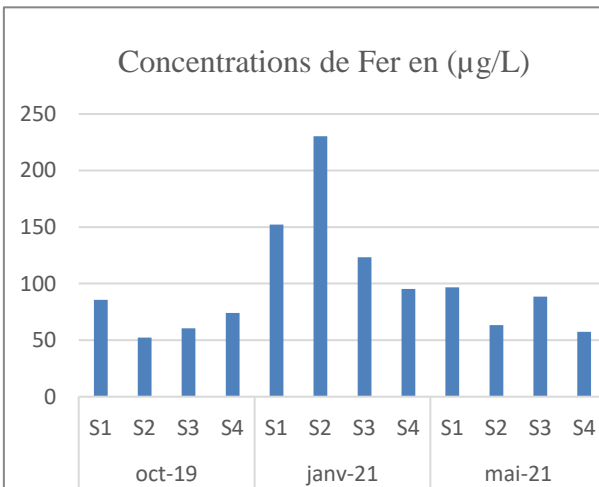
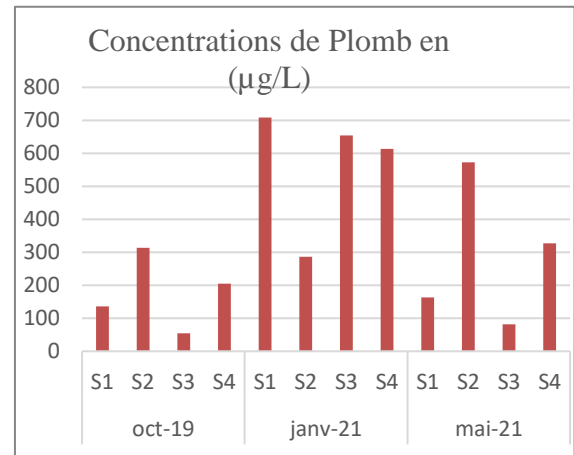
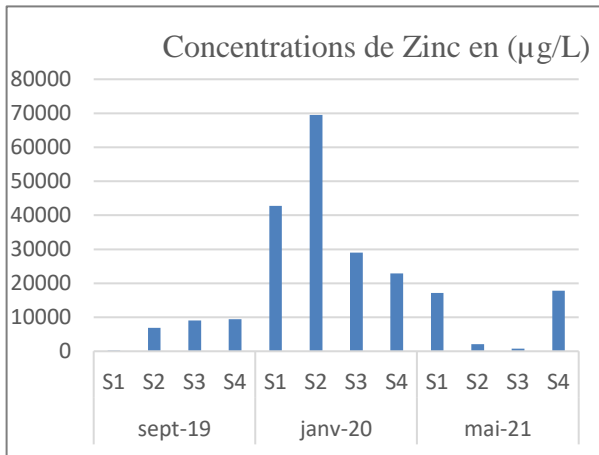


Figure 26 : Concentrations des métaux lourds dans les eaux de surface et de la source au niveau de la carrière d'El M'cif

La variation saisonnière met en évidence le contrôle prédominant des conditions hydrologiques, climatiques et environnementales sur les concentrations des ETM (Jamal et al., 2019). Au cours de la saison humide, une observation significative est faite quant à l'augmentation des concentrations de zinc, de plomb, de fer et de cadmium dans les eaux de surface et les eaux souterraines. Excepté pour le cuivre où son comportement est bien différent. En effet, les valeurs les plus élevées de cuivre sont enregistrées pendant la période des basses eaux. Ce phénomène peut être attribué à divers facteurs, tels que les processus d'érosion accrue, où le débit des rivières et des cours d'eau est réduit, exposant davantage les lits et les berges à l'érosion; les ruissellements des précipitations, où l'eau de pluie ruisselant sur les surfaces terrestres entraîne des particules de sol et de sédiments contenant du cuivre vers les cours d'eau; et la mobilisation accrue des éléments à partir du sol.

D'après les graphiques présentés dans la figure 27 ; on observe une augmentation des concentrations de plomb, du zinc et du fer dans la station 2, située près de la carrière, de la station de concassage et champs de tirs et d'abattage, ainsi que dans la station 3 proche à la station permanente d'enrobage et bitume. Ces observations nous permettent d'admettre que la carrière a une influence ponctuelle et locale sur les concentrations des ETM dans l'eau. Par contre, le cadmium et le cuivre présentent des fluctuations similaires à travers les différentes stations étudiées, avec une augmentation légère a été observée dans la station 2 et la station 3 en octobre 2019 et en janvier 2021 précisément.

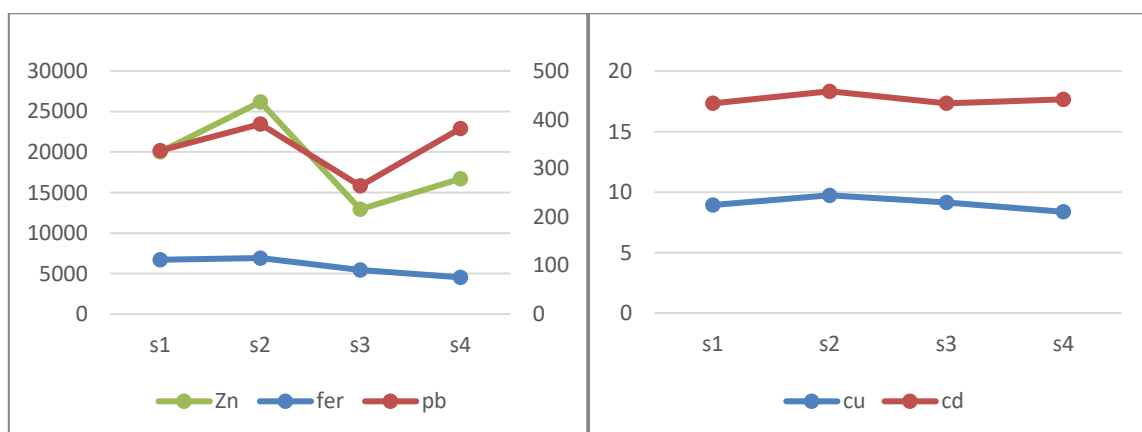


Figure 27 : Variation spatiotemporelle de la moyenne des concentrations des ETM par station dans les eaux de surface au niveau de la carrière d'El M'cif.

#### **IV.5. Caractéristiques physicochimiques des sédiments**

Les résultats d'analyses de pH, de conductivité électrique et la teneur totale en (CaCO<sub>3</sub>) sont récapitulés dans le tableau 6 .

Les sédiments présentent un pH à tendance largement, alcaline. En effet, dans les trois stations les valeurs varient entre 8.4 et 8.5 ; avec une moyenne de 8.5. Ces valeurs élevées de pH reflètent la nature lithologique des terrains environnant dominée principalement par l'affleurement des roches carbonatées.

La conductivité électrique de la solution des sédiments varie entre 110 et 212  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La valeur maximale a été enregistrée à la station 2, cette station est située au niveau de la carrière et proche de la station de traitement et de concassage. Cette dernière serait probablement responsable de cette remarquable hausse. Les activités de traitement et concassage augmentent la concentration d'ions et de substances dissoutes dans l'eau des sédiments, ce qui se traduit par une conductivité plus élevée.

La teneur totale en (CaCO<sub>3</sub>) est la détermination de la quantité de CaCO<sub>3</sub> dans les sédiments ; en utilisant de l'acide. Les résultats du teneur totale en (CaCO<sub>3</sub>) des sédiments d'oued Aftis sont présentés dans le tableau 6. La teneur en CaCO<sub>3</sub> dans les sédiments augmente d'amont en aval, elle varie entre 0.42 et 7.94 %. La valeur maximale a été enregistrée à la station 3.

##### **IV.5.1 Concentrations des ETM dans les sédiments**

Le tableau 6 présente les teneurs en ETM dans les sédiments d'Oued Aftis, on remarque une tendance des concentrations décroissantes, qui peut être établie comme suit : Fe > Zn > Cu > Cd ; avec respectivement une moyenne de 15034.17, 1085.30, 14.60, 1.49 ppm.

Les concentrations de fer dans les sédiments présentent une fluctuation de 13 790 à 15 895 ppm. La valeur maximale a été enregistrée à la station 3.

Le zinc présente une variation décroissante d'amont en aval ; variant 565.92 et 1515.75 ppm, ou la valeur maximale a été enregistrée à la station 1.

Le cuivre montre de faibles concentrations, ces teneurs se situent entre 13.08 et 15.75 ppm, où la valeur maximale a été enregistrée à la station 1.

Le cadmium présente des teneurs très proches d'une station à l'autre, fluctuant entre 1,20 et 1,70 ppm. La valeur maximale a été enregistrée à la station 3.

Les concentrations moyennes de zinc, de cuivre et de cadmium dans les sédiments de l'oued Aftis dépassent les valeurs de référence établies par Riemann et Caritat (1998), qui sont respectivement de 52 ppm, 14.3 ppm et 0.1 ppm.

#### **IV.6. Caractéristiques physicochimiques des sols**

Les cinq échantillons du sol recueillis dans les alentours de la carrière présentent un pH généralement alcalin. En effet, les valeurs varient entre 7.93 à la station 1 et 8.64 à la station 4 (Tableau.5 ). L'influence des roches carbonatées exploitées au niveau de la carrière est très visible en termes de pH.

La conductivité électrique de la solution du sol varie entre 85 et 349  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  . On remarque une variation très importante d'amont en aval ; avec une concentration en sels solubles plus forte au niveau de la station de traitement.

La teneur du calcaire total dans le sol varie entre 4.18 et 70.24 % ; la valeur maximale a été enregistrée à S3 où se trouve la station de traitement.

##### **IV.6.1. Concentrations des ETM dans le sol**

Les concentrations des ETM dans le sol sont présentées dans le tableau 5

La tendance générale des concentrations peut être établie comme suit :  $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$  ; avec respectivement une moyenne de 17 906, 219.78, 128 .86, 20 .76 et 2.42 ppm.

De prime abord, il a été constaté que les concentrations de zinc dans le sol présentent une ample variation d'une station à l'autre. Elles oscillent entre 1.98 et 1017.50 ppm, où le pic a été enregistrée au niveau de la station 1.

Les concentrations de fer dans le sol fluctuent de 7 990 à 22885 ppm. On remarque que les concentrations augmentent au sein de l'auréole de la carrière et au voisinage de la station de traitement, le champ de tir et la centrale d'enrobage.

Cette hausse, qui peut être qualifiée de ponctuelle, est vraisemblablement corrélée à la présence du sulfure de fer (pyrite) dans les roches carbonatées exploitées. Elle peut également être attribuée à la corrosion des équipements et des machines de concassage utilisés dans le processus d'extraction. Cette conjonction de facteurs géologiques, liés d'une part à la composition des roches extraites, et d'autre part de facteurs anthropiques, tels que la corrosion des équipements industriels, pourrait contribuer de manière significative à l'augmentation graduelle des concentrations de métaux dans les eaux pendant la saison humide.



A la station 5 la teneur est la plus faible, elle est de l'ordre de 7990 ppm, correspondant à la station la plus éloignée de la carrière.

Le plomb montre des valeurs importantes qui fluctuent entre 81,75 à 197 ppm, la valeur maximale a été enregistrée à la station 4, toute proche aux centrales d'enrobage.

Les concentrations de cuivre varient entre 10.62 et 38.19 ppm ; où la valeur maximale a été enregistrée à la station 1. Les concentrations de cadmium sont très proches, varient dans une fourchette comprise entre 1,23 et 3,39 ppm, avec une légère augmentation au niveau des stations prélevées au niveau de la carrière et proches de la station de traitement et de la centrale d'enrobés. Les concentrations moyennes de zinc, de plomb, de cuivre et de cadmium dans le sol surpassent les valeurs de référence établies à 52, 17, 14.3, et 0.1 ppm respectivement (Reimann & de Caritat, 1998).

Tableau 5: Paramètres physicochimiques et concentrations des ETM dans les sédiments et les sols au niveau de la carrière d'El M'cif.

|                 | Sédiments |         |          |          | Sols    |        |       |       |       |         |
|-----------------|-----------|---------|----------|----------|---------|--------|-------|-------|-------|---------|
|                 | S 1       | S2      | S3       | Moyenne  | S1      | S2     | S3    | S4    | S5    | Moyenne |
| pH              | 8.4       | 8.5     | 8.5      | 8.27     | 7.93    | 8.14   | 8.08  | 8.64  | 8.57  | 8,5     |
| EC( $\mu$ S/Cm) | 110       | 212     | 115      | 145.67   | 115     | 143    | 349   | 146   | 85    | 167.60  |
| CaCO3%          | 0.42      | 4.81    | 7.94     | 4.39     | 4.18    | 47.04  | 70.24 | 45.16 | 21.74 | 37.67   |
| Fe(ppm)         | 13790     | 15895   | 15417.50 | 15034.17 | 19695   | 22885  | 21515 | 17445 | 7990  | 17906   |
| Pb (ppm)        | ND        | ND      | ND       | ND       | 81.75   | 132.65 | 137   | 197   | 95.90 | 128.86  |
| Zn (ppm)        | 1515.75   | 1174.22 | 565.92   | 1085.30  | 1017.50 | 43.80  | 1.98  | 23.60 | 12    | 219.78  |
| Cu (ppm)        | 15.75     | 13.08   | 14.96    | 14.60    | 38.19   | 25.02  | 10.62 | 13.90 | 16.06 | 20.76   |
| Cd (ppm)        | 1.57      | 1.20    | 1.70     | 1.49     | 1.23    | 3.39   | 2.32  | 2.85  | 2.30  | 2.42    |

## IV.7. Evaluation du degré de contamination des sédiments par les ETM

### IV.7.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo)

Les valeurs de l'indice I-Géo calculées pour les ETM étudiés sont consignées dans la figure 28. La tendance de l'indice I-Géo dans les sédiments d'Oued Aftis est établie comme suit : Cd > Zn > Cu > Fe. Les valeurs de I-Géo montrent que les trois échantillons de sédiment sont non contaminés par le fer et le cuivre (I-géo < 0), modérément à sévèrement contaminés par le zinc (2 < I-géo < 4). Quant au Cd, ses valeurs d'I-géo indiquent qu'ils sont sévèrement à extrêmement contaminés (3 < I-géo < 4).

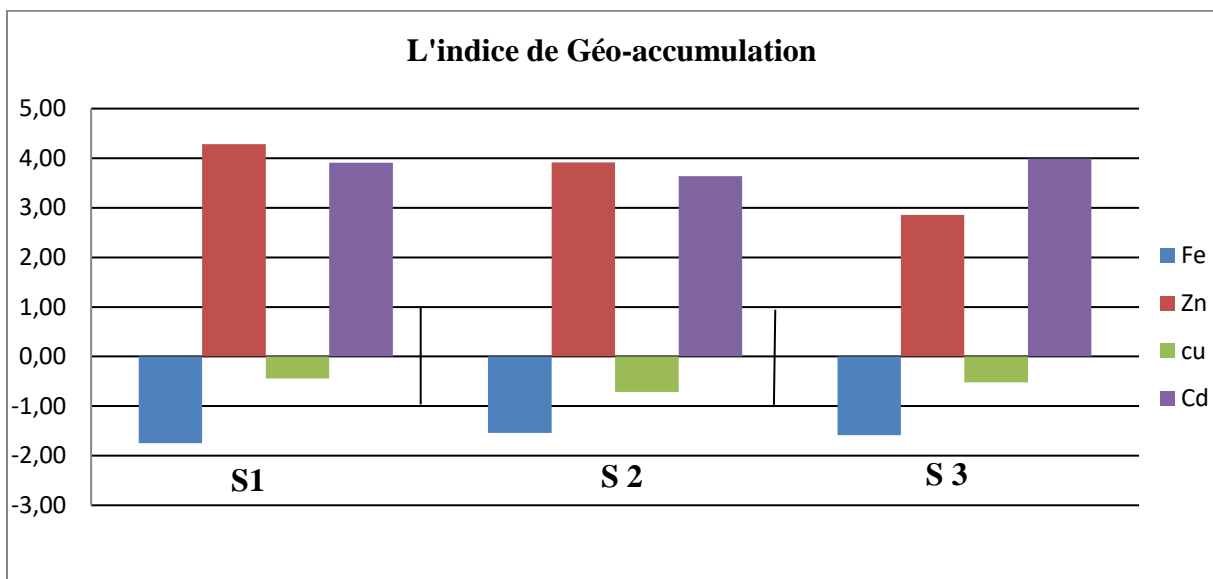


Figure 28 : Variation de l'indice de géo accumulation dans les sédiments d'oued Aftis.

### IV.7.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI)

Les valeurs de IP des métaux dans les sédiments des stations sont représentées sur la figure 29. Les échantillons des sédiments dans les stations 1, 2 et 3 sont faiblement contaminés par le fer, indiqués par des valeurs de l'indice de pollution ( $IP \leq 1$ ), modérément contaminés en cuivre ( $1 < PI \leq 3$ ), et fortement contaminés en zinc et cadmium ( $PI > 3$ ).

La valeur moyenne IPI des quatre ETM dans les sédiments est 7.60 ; elles sont fortement contaminées.

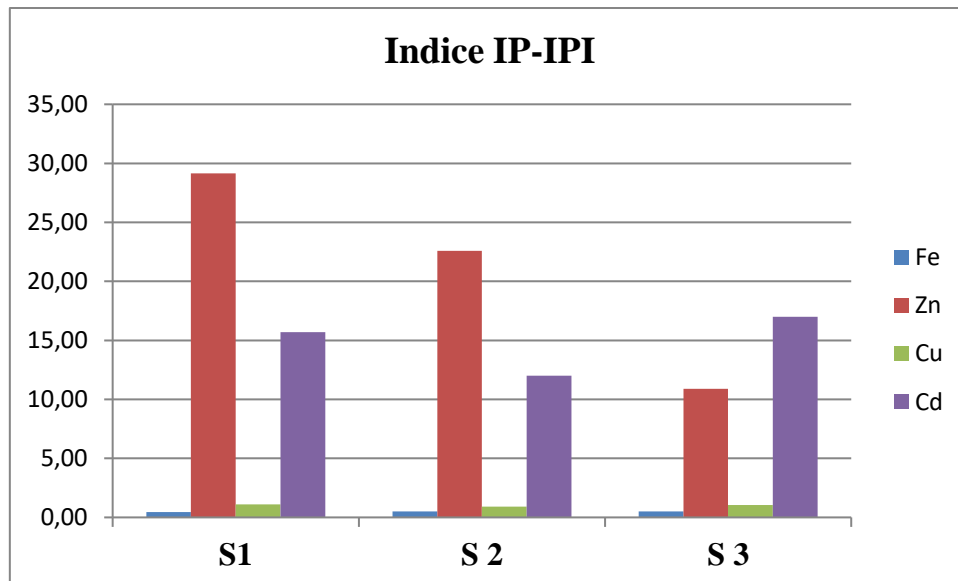


Figure 29 : Variation de l'indice de pollution dans les sédiments d'oued Aftis.

#### IV.7.3 L'indice de risque potentiel (RI)

Les valeurs de risque écologique des ETM des sédiments sont consignées dans le graphe 30.

Les résultats de l'indice de risque écologique potentiel pour un seul élément (Ei) et l'indice de risque potentiel (RI) ont été calculés. Les valeurs moyennes du coefficient de risque potentiel (Ei) des teneurs en métaux dans les sédiments ont été classées dans l'ordre suivant : Cd > Zn > Cu. Le Cd présente un niveau de risque écologique extrêmement élevé, Le Zn et le Cu dans les sédiments des cours d'eau et les sols présentent un faible risque écologique.

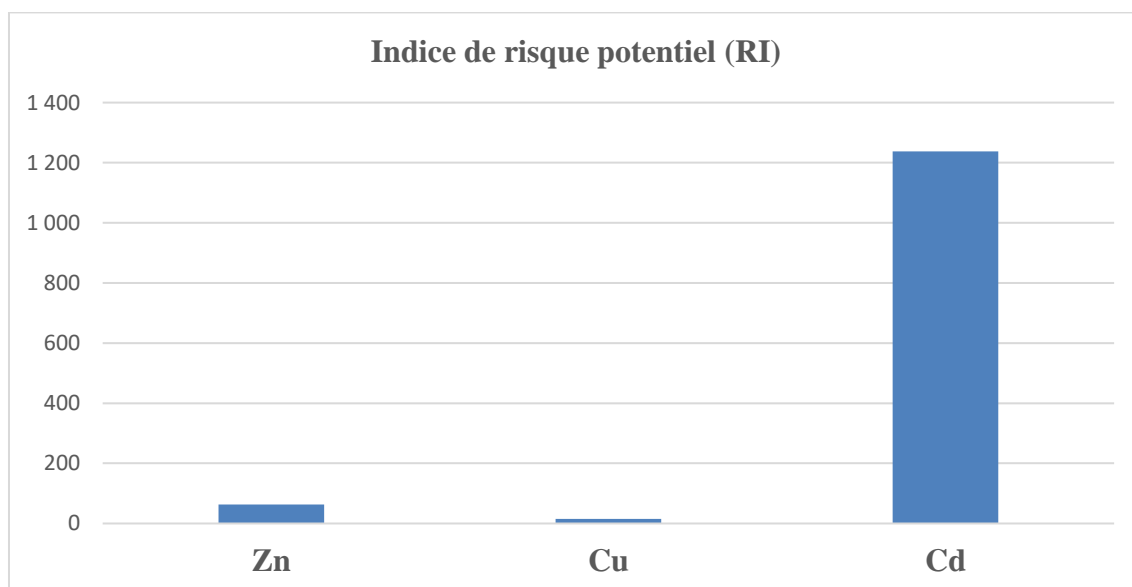


Figure 30 : Variation de L'indice de risque potentiel (RI) dans les sédiments d'oued Aftis.

## IV.8. Evaluation du degré de contamination des sols par les ETM

### IV.8.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo)

Les valeurs de l'indice I-géo calculées pour les éléments traces métalliques (ETM) étudiés sont présentées dans la figure 31. On observe une tendance dans les échantillons de sols de la carrière d'El M'cif comme suit :  $Cd > Pb > Cu > Zn > Fe$ . Les valeurs de l'indice I-géo pour le fer, le cuivre et le zinc dans toutes les stations prélevées indiquent qu'ils ne sont pas contaminés ( $I\text{-géo} < 0$ ) ; à l'exception des stations 1 et 2 pour le cuivre et S1 pour le zinc, modérément à sévèrement contaminés ( $2 < I\text{-géo} < 3$ ). Les valeurs de l'indice I-Géo pour le cadmium montrent une contamination sévère à extrême ( $3 < I\text{-géo} < 4$ ).

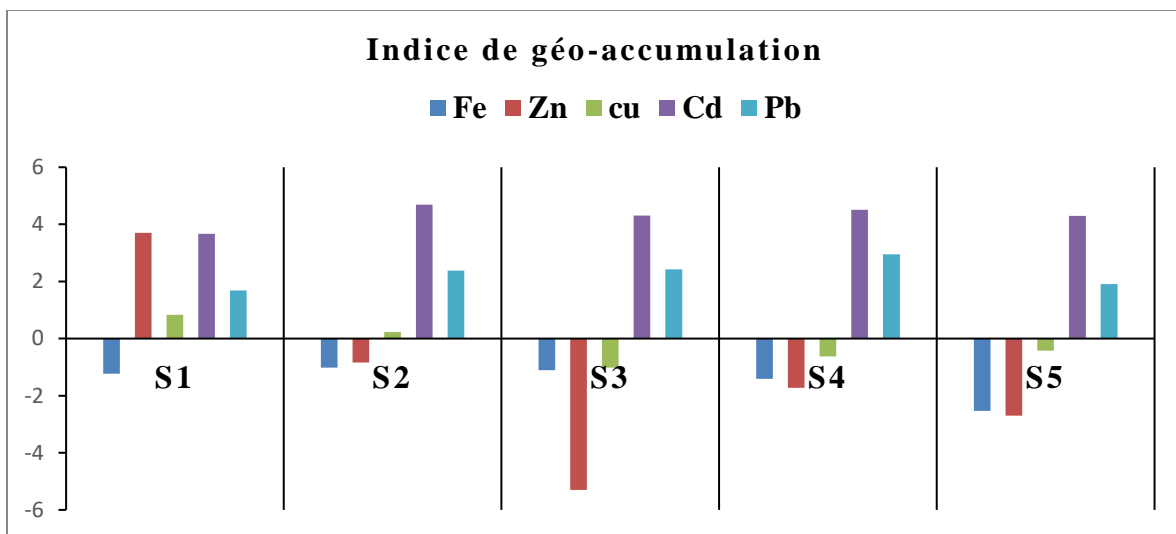


Figure 31 : Variation de l'indice de géo accumulation dans le sol de la carrière d'El M'cif.

### IV.8.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI)

D'après la figure 32, les cinq stations présentent une faible contamination en fer et en zinc, à l'exception de la station S1. Ces valeurs sont indiquées par des valeurs de l'indice de pollution ( $IP \leq 1$ ). En revanche, elles sont modérément contaminées en cuivre ( $1 < IP \leq 3$ ) et fortement contaminées en plomb et en cadmium ( $IP > 3$ ).

La valeur moyenne de l'indice de pollution IPI pour les quatre métaux traces dans le sol est de 6.52, ce qui indique une forte contamination.

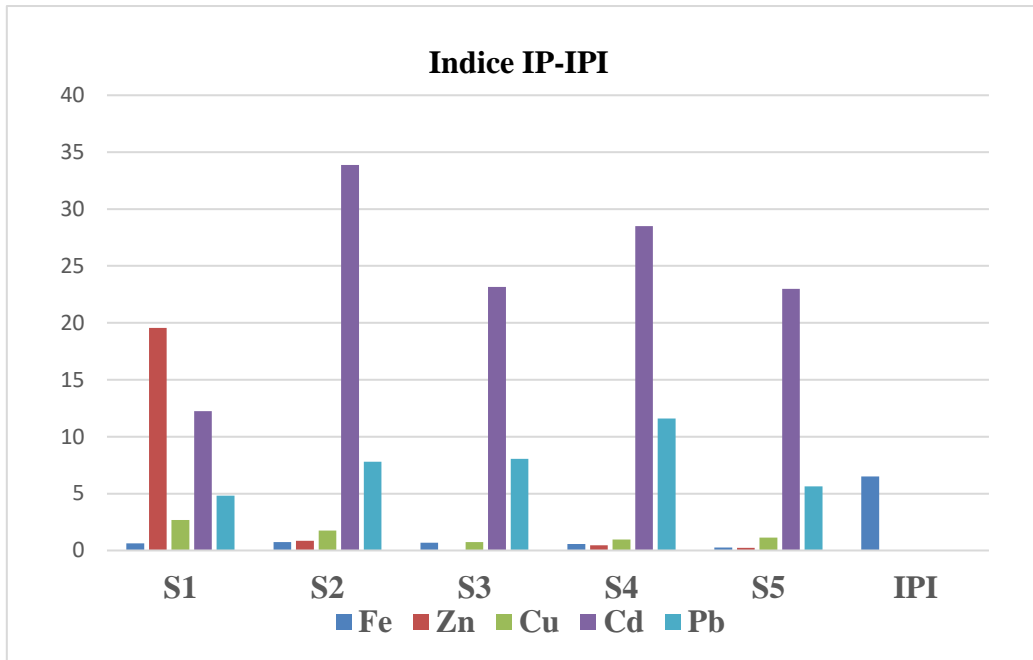


Figure 32 : Variation de l'indice IP-IPI dans le sol de la carrière d'El M'cif

#### IV.8.3. L'indice de risque potentiel (RI)

Les valeurs de risque écologique des ETM dans le sol sont consignées dans le graphique 33. Les résultats de l'indice de risque écologique potentiel pour chaque élément (Ei) ainsi que l'indice de risque potentiel (RI) ont été calculés. Selon les moyennes du coefficient de risque potentiel (Ei) des concentrations de métaux dans le sol, la classification est la suivante : Cd > Zn > Cu. Le cadmium présente un niveau de risque écologique extrêmement élevé, tandis que le zinc et le cuivre dans le sol présentent un risque écologique faible.

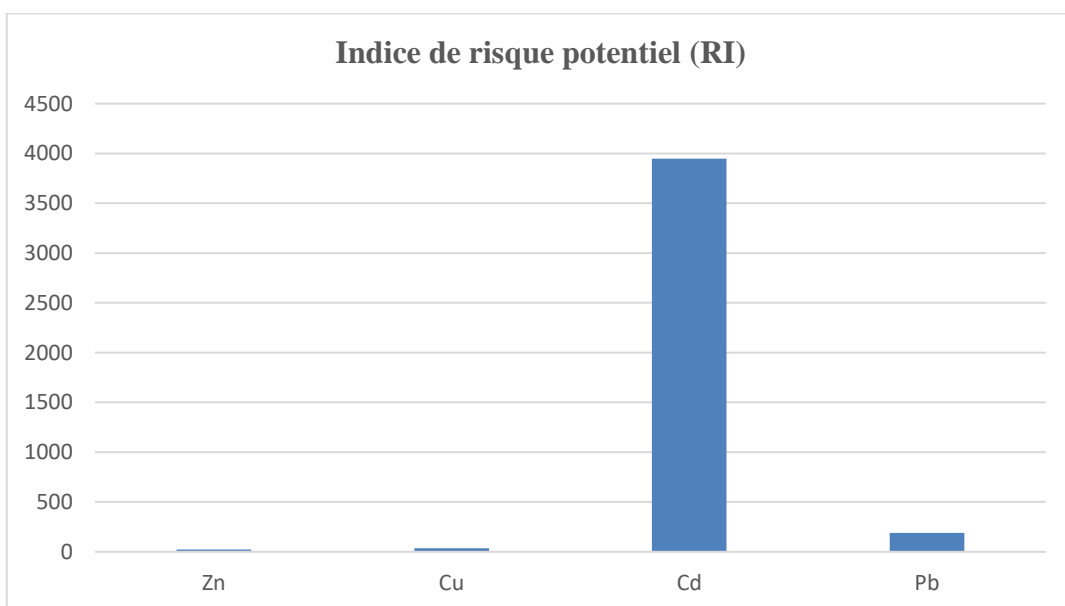


Figure 33 : Variation de l'indice de risque potentiel (RI) dans le sol de la carrière d'El M'cif.

D'après une comparaison des résultats obtenus à partir de trois indices de pollution différents, à savoir l'indice I-géo, le PI-IPI et le RI, on peut constater que les valeurs de l'indice I-géo offrent une représentation plus précise des niveaux de contamination par rapport aux autres indices. Par conséquent, pour une évaluation plus rigoureuse de la contamination, il est recommandé d'utiliser spécifiquement l'indice I-Geo, tel que suggéré par les recherches d'Arab et al. (2021) et de Seklaoui et al. (2016). En utilisant cet indice plus précis, nous serions en mesure d'obtenir une évaluation plus adéquate de l'ampleur de la contamination dans les échantillons étudiés.

#### **IV.9. Caractérisation géochimique et minéralogique des roches de la carrière**

L'identification de la composition chimique des roches environnantes dans la carrière revêt une importance capitale afin d'identifier l'origine des éléments traces métalliques (ETM) présents dans l'environnement. Cela permet de comprendre si ces composants chimiques proviennent de processus géogènes et naturels, d'activités anthropiques principalement industriels ou des deux à la fois.

##### **IV.9.1. Roche carbonatée**

La figure 34 représente le spectre obtenu à partir des analyses de diffraction des rayons X (DRX) effectuées sur un échantillon de roche carbonatée prélevé à la carrière d'El M'cif.

La fraction minérale prédominante se compose principalement de la calcite, représentant 74.4%, et de la pyrite, représentant 25.6% (Fig.34). Les analyses de fluorescence des rayons X (FRX) mettent en évidence la présence significative de calcium, atteignant 74.9%, de fer avec une proportion de 14.43%, et de soufre représentant 4.384%. Ces résultats sont parfaitement cohérents avec les analyses DRX et avec les phases minérales présentes dans l'échantillon de la roche carbonatée, comme détaillé dans le tableau 6. De plus, l'analyse par fluorescence des rayons X, présentée dans le tableau 6, révèle des concentrations élevées d'éléments traces métalliques, notamment l'indium à 2,242 %, le cadmium à 0,708 %, le zinc à 0,126 % et le plomb à 0,008 %. Ces valeurs, étonnamment élevées, nécessitent une confirmation par des méthodes d'analyse plus précises pour garantir leur exactitude.

Par ailleurs, afin d'évaluer encore plus le contenu en ETM de l'échantillon de roche carbonatée exploitée et nous orienter dans nos interprétations des résultats des analyses de l'eau des sédiments et du sol, cette roche exploitée de la carrière d'El M'cif a fait l'objet d'une analyse géochimique par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) visant à déterminer les concentrations de plus en plus précises en ETM. Les résultats indiquent que les concentrations



en cadmium sont prépondérantes, elles frôlent 0.15 ppm. Viennent ensuite les concentrations en zinc et en plomb, qui elles, avoisinent chacune la teneur de 0.11 ppm. Enfin, les teneurs en cuivre sont moins concentrées, elles ont été mesurées à 0.08 ppm.

#### **IV.9.2. Gneiss et pegmatite**

La figure 35 représente le spectre dérivé des analyses de diffraction des rayons X (DRX) réalisées sur un échantillon de pegmatite prélevé spécifiquement à la carrière d'El M'cif.

Les minéraux présents dans l'échantillon analysé sont principalement la muscovite qui domine la composante à hauteur de 88.2%, l'albite avec 10.5% et enfin le quartz qui occupe uniquement 1.2% de l'échantillon(Fig.35). De leur côté, les analyses de fluorescence des rayons X, communément abrégées FRX, révèlent des concentrations significatives du silicium à hauteur de 69.15%, du potassium à 12.64%, de l'aluminium à 11.46%, du sodium à 2.492%, et du calcium à 1.628%. En outre, le tableau 6 relève la présence de fer à 1.70%, ainsi que des teneurs réduites en zinc à 0.017% et en chrome à 0.015%.

Une analyse géochimique par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) a été effectuée sur un échantillon de pegmatite afin de quantifier les concentrations en éléments traces métalliques. Les résultats obtenus révèlent les concentrations suivantes : le zinc est analysé à 0.28 ppm, le cadmium est à 0.17 ppm, le cuivre mesuré à 0.08 ppm et enfin le plomb retrouvé à hauteur de 0.06 ppm.

Les analyses FRX de l'échantillon de gneiss, telles qu'indiquées dans le tableau 6, montrent une similarité dans la composition chimique avec la pegmatite, avec des concentrations considérables de silicium à 60.3%, de potassium à 15.15%, d'aluminium à 13.27%, de calcium à 4.94%, et de sodium à 2.37%. De plus, la FRX révèle la présence de fer à hauteur de 2.84%, ainsi que des très faibles teneurs en chrome à 0.014%, en plomb à 0.006%, et en zinc à 0.003% uniquement.

#### **IV.9.3. Echantillon X**

L'échantillon X contient de sulfures récupérés de l'encaissant avec différentes textures. Il a été quelque peu difficile de séparer complètement les sulfures de leur encaissant composé de carbonates et de silicates. Le spectre dérivé des analyses de diffraction des rayons X (DRX) réalisées sur l'échantillon X prélevé à la carrière d'El M'cif est présenté dans la figure 36.

L'analyse DRX révèle la présence de pyrite à 11.2%, de calcite à 32.3%, et d'augite à 56.5% dans l'échantillon X (Fig.36). Les analyses de fluorescence des rayons X (FRX) mettent en

évidence la présence de soufre à 38.37%, de fer à 30.76%, de calcium à 7.31%, de magnésium à 4.69%, et de silicium à 4.18%, en accord avec les phases minérales observées dans l'échantillon X. De plus, la FRX du tableau 6 indique la présence de traces de métaux lourds dans cet échantillon, notamment le chrome à 0.07%, le zinc à 0.03%, le cuivre à 0.02%, le nickel à 0.02% et l'arsenic à 0.01%. L'échantillon X a également subi une analyse géochimique par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) pour évaluer les concentrations en éléments traces métalliques. Les résultats affichent les valeurs suivantes : le zinc retrouvé à 0.79 ppm, le plomb mesuré à 0.62 ppm, le cuivre mesuré à 0.13 ppm, et enfin le cadmium analysé à 0.09 ppm.

#### **IV.9.4. Echantillon Y**

Le prélèvement de l'échantillon Y a été effectué au niveau de la carrière où les pegmatites intrusives se trouvent dans les roches carbonatées exploités, et cet échantillon contient également des sulfures. La figure 37 présente le spectre obtenu à partir des analyses de diffraction des rayons X (DRX) réalisées sur l'échantillon Y.

La muscovite altérée constitue la fraction minérale prédominante dans l'échantillon Y, représentant 82.1% de sa composition. On y trouve également de la calcite à 12.4%, de la pyrite à 4.3%, et du quartz à 1.1%. Les analyses de fluorescence des rayons X (FRX) réalisées sur cet échantillon révèlent la présence de différents éléments. Le silicium est présent à hauteur de 20%, le fer à 38.37%, le calcium à 15.80%, le soufre à 15.08%, l'aluminium à 3.36%, le potassium à 2.45% et le magnésium à 1.76%.

De plus, la FRX indique la présence d'éléments traces métalliques dans cet échantillon, comme détaillé dans le tableau 6, avec des concentrations de zinc à 0.21%, de plomb à 0.15%, de strontium à 0.14%, de chrome à 0.10%, et de nickel à 0.02%.

D'après l'analyse géochimique par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) réalisée sur l'échantillon Y, les concentrations en éléments traces métalliques sont les suivantes : le zinc est mesuré à 4.13 ppm, le plomb analysé à 3.4 ppm, le cuivre retrouvé à 0.20 ppm, et enfin le cadmium se retrouve à 0.03 ppm uniquement.

#### **IV.10. Caractérisation pétrographique des roches exploitées**

Les roches carbonatées dans la région de Chekfa se présentent sous forme d'amas circonscrits dans les roches schisto-phylladique environnantes. Elles apparaissent parfois sous la forme de bancs décimétriques à métriques, présentant des fractures ou en masse compacte, souvent intrudées par des filons de pegmatite. Ces caractéristiques les rendent propices à l'exploitation,

comme observé dans les sites d'El M'cif et Messiat. Les roches carbonatées extraites de la carrière d'El M'cif exhibent une texture principalement massive, parfois rarement saccharoïde. Ces masses rocheuses montrent des teintes variables, souvent de nuances bleu-grisâtre et occasionnellement blanchâtres. Des inclusions de grains de pyrite sont parfois présentes, disséminées ou en tant que remplissage de fissures(Rouikha , 2008).

Suite à la progression dans les activités d'exploitation dans la carrière, des filons de plus de 4 mètres de longueur et 60 centimètres de largeur, remplis de pyrite, ont été découverts. La pyrite, en tant que composant prédominant, se manifeste sous diverses formes, notamment des grains cubiques disséminés, de petits filonnets millimétriques, des brèches, ou sous forme massive (Fig.38).

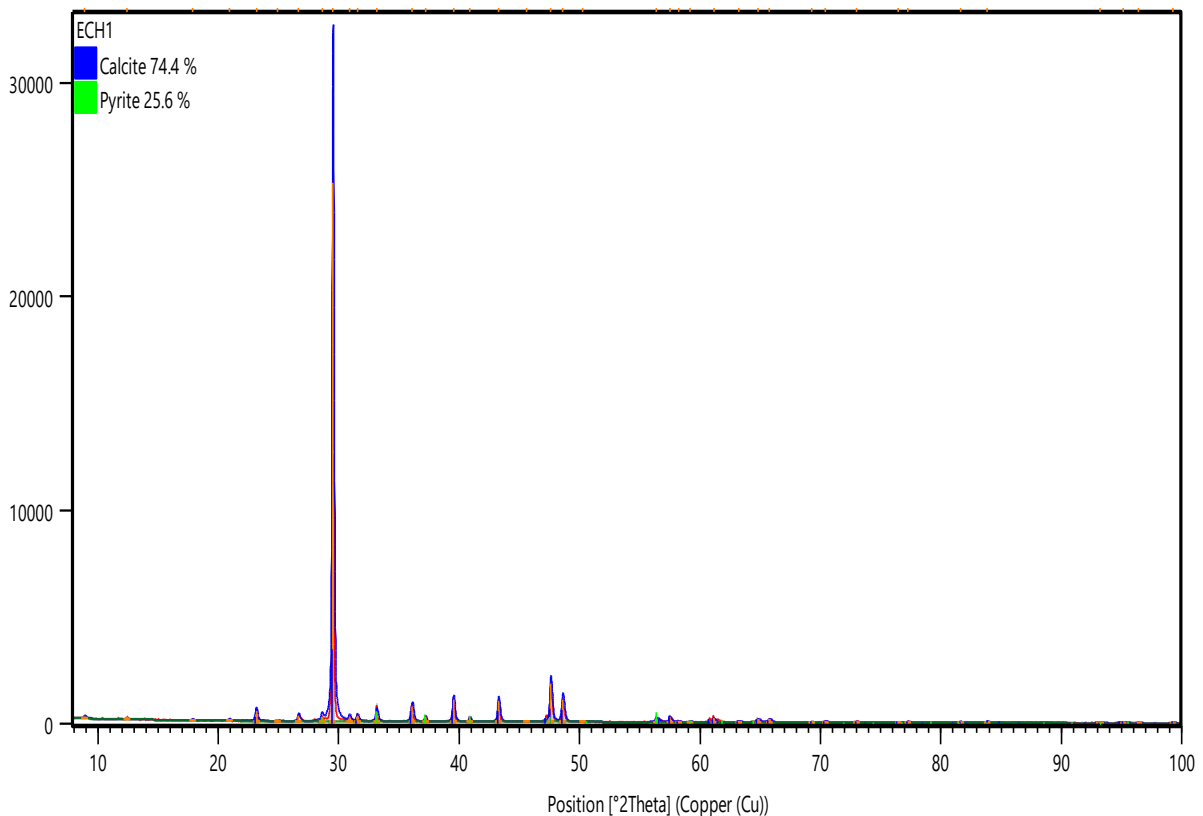


Figure 34 : Spectre DRX de l'échantillon de la roche carbonatée analysé.

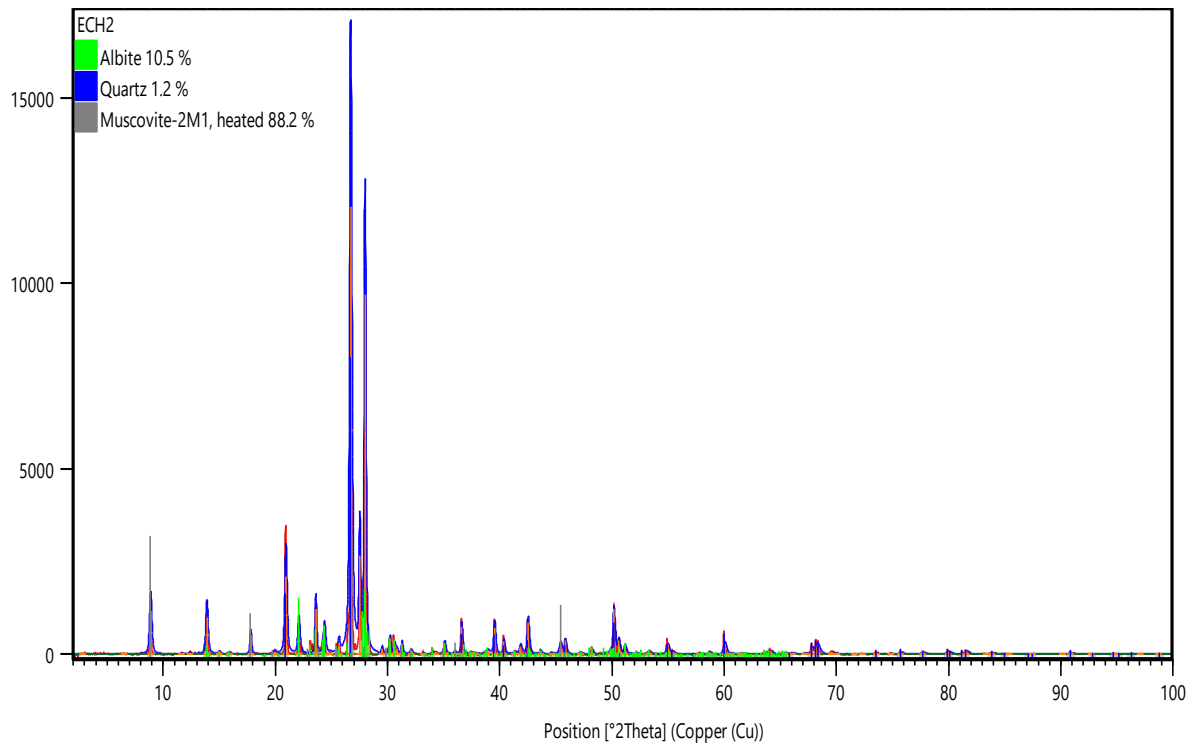


Figure 35 : Spectre DRX de l'échantillon de pegmatite analysé.

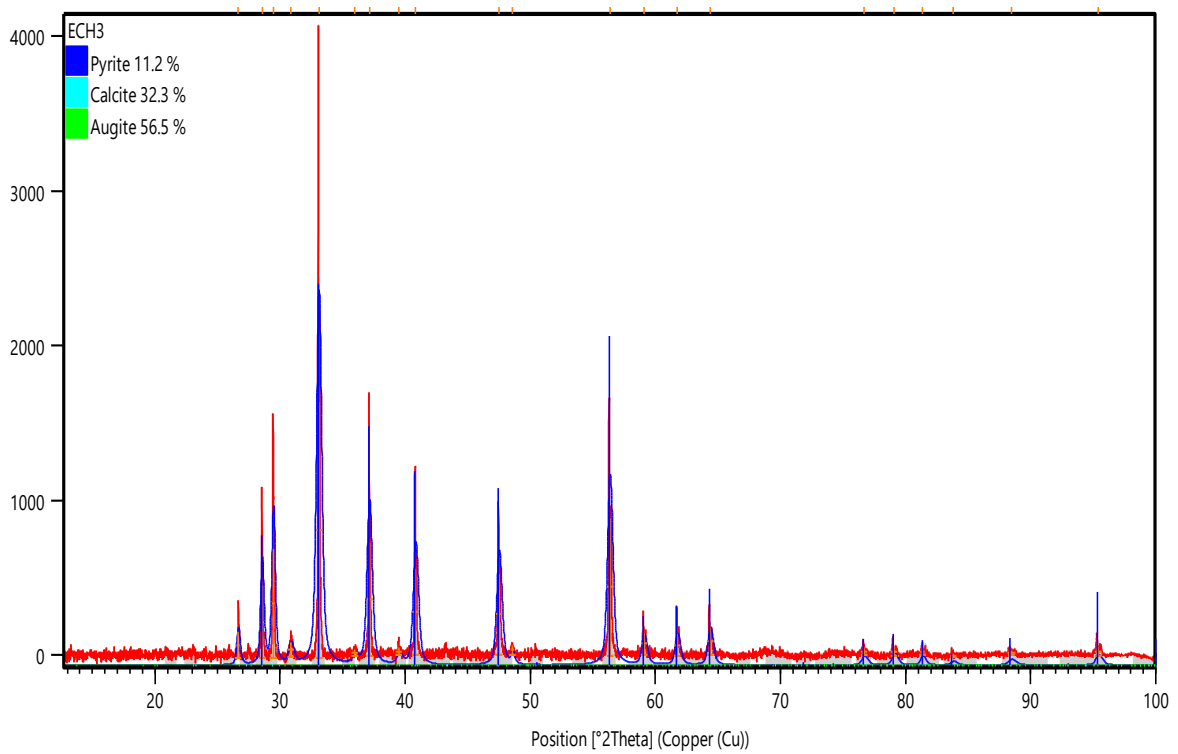


Figure 36 : Spectre DRX de l'échantillon X analysé

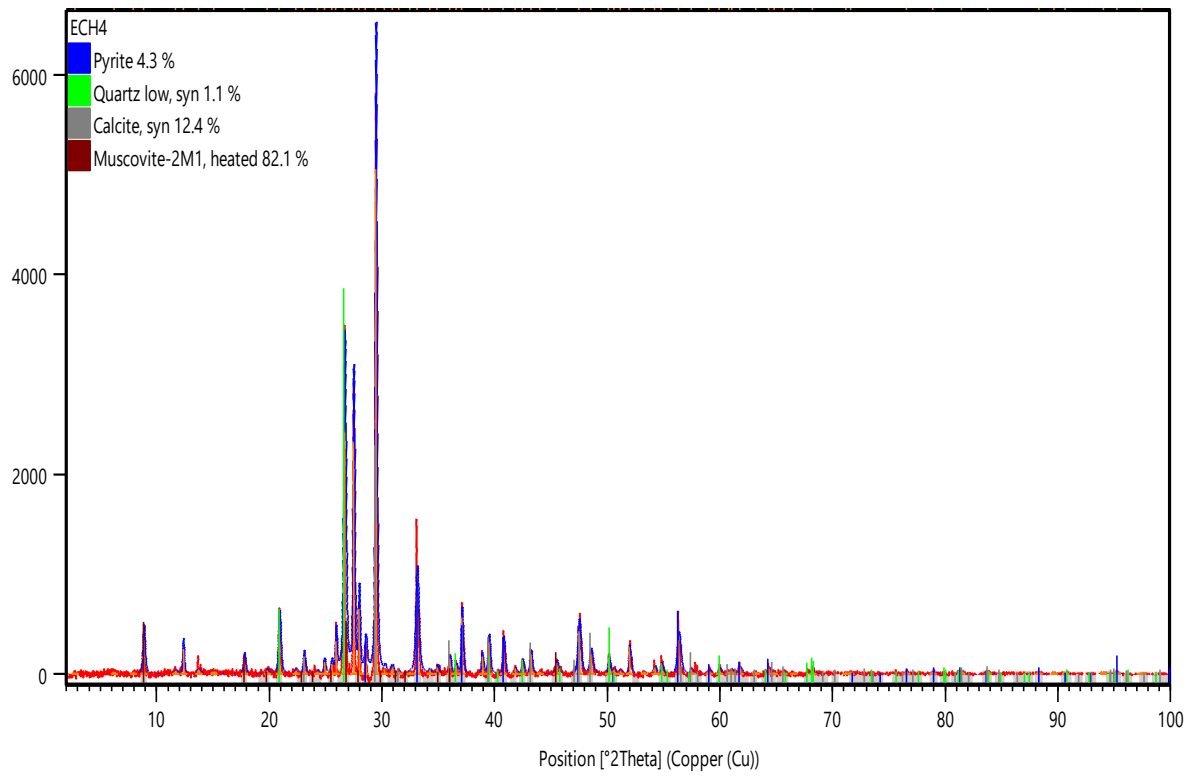


Figure 37 : Spectre DRX de l'échantillon Y analysé.

Tableau 6 : Teneurs en éléments chimiques obtenues par spectrométrie de la Fluorescence X sur les échantillons récoltés de la carrière d'El M'cif. LE : éléments légers

| <b>Calcaire</b> |             | <b>Gneiss</b> |             | <b>Pegmatite</b> |             | <b>Échantillon X</b> |             | <b>Échantillon Y</b> |             |
|-----------------|-------------|---------------|-------------|------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| <b>Ele</b>      | <b>Conc</b> | <b>Ele</b>    | <b>Conc</b> | <b>Ele</b>       | <b>Conc</b> | <b>Ele</b>           | <b>Conc</b> | <b>Ele</b>           | <b>Conc</b> |
|                 | (%)         |               | (%)         |                  | (%)         |                      | (%)         |                      | (%)         |
| <b>Na</b>       | 0.062       | Na            | 2.378       | Na               | 2.492       | Mg                   | 4.69        | Mg                   | 1.76        |
| <b>Mg</b>       | 0.337       | Mg            | 0.192       | Al               | 11.465      | Al                   | 0.99        | Al                   | 3.36        |
| <b>Al</b>       | 0.406       | Al            | 13.278      | Si               | 69.15       | Si                   | 4.18        | Si                   | 20          |
| <b>Si</b>       | 1.376       | Si            | 60,337      | P                | 0.159       | S                    | 38.37       | P                    | 0.08        |
| <b>S</b>        | 4.384       | P             | 0.126       | S                | 0.167       | Ca                   | 7.31        | S                    | 15.08       |
| <b>Ca</b>       | 74.974      | S             | 0.048       | Cl               | 0.193       | Ti                   | 0.2         | K                    | 2.45        |
| <b>Ti</b>       | 0.075       | Cl            | 0.141       | K                | 12.648      | Cr                   | 0.07        | Ca                   | 15.8        |
| <b>Cr</b>       | 0.006       | K             | 15.151      | Ca               | 1.628       | Fe                   | 30.76       | Ti                   | 0.45        |
| <b>Mn</b>       | 0.165       | Ca            | 4.942       | Ti               | 0.034       | As                   | 0.01        | Cr                   | 0.1         |
| <b>Fe</b>       | 14.43       | Ti            | 0.221       | Cr               | 0.015       | Sr                   | 0.01        | Mn                   | 0.07        |
| <b>As</b>       | 0.002       | Cr            | 0.014       | Mn               | 0.033       | Ni                   | 0.02        | Fe                   | 15.86       |
| <b>Rb</b>       | 0.003       | Mn            | 0.067       | Fe               | 1.709       | Zn                   | 0.03        | Zn                   | 0.21        |
| <b>Sr</b>       | 0.812       | Fe            | 2.848       | Zn               | 0.017       | Mo                   | 0.02        | Rb                   | 0.02        |
| <b>Zr</b>       | 0.004       | Zn            | 0.003       | Ga               | 0.009       | Pt                   | 0.01        | Sr                   | 0.14        |
| <b>Cd</b>       | 0.708       | Ga            | 0.007       | Rb               | 0.145       | K                    | 0.27        | Ba                   | 0.06        |
| <b>In</b>       | 2.242       | Rb            | 0.117       | Sr               | 0.035       | Cu                   | 0.02        | Pb                   | 0.15        |
| <b>Ba</b>       | 0.001       | Sr            | 0.059       | Zr               | 0.004       | Sb                   | 0.01        | Ni                   | 0.02        |
| <b>Re</b>       | 0.006       | Y             | 0.004       | Nb               | 0.012       | LE*                  | 12.5        | CU                   | 0.01        |
| <b>Hg</b>       | 0.001       | Zr            | 0.016       | Rh               | 0.075       |                      |             | LE*                  | 24.38       |
| <b>Pb</b>       | 0.008       | Nb            | 0.007       | Eu               | 0.005       |                      |             |                      |             |
| <b>Zn</b>       | 0.126       | Ba            | 0.019       | Re               | 0.001       |                      |             |                      |             |
|                 |             | Eu            | 0.015       | Ir               | 0.002       |                      |             |                      |             |
|                 |             | Pb            | 0.006       |                  |             |                      |             |                      |             |

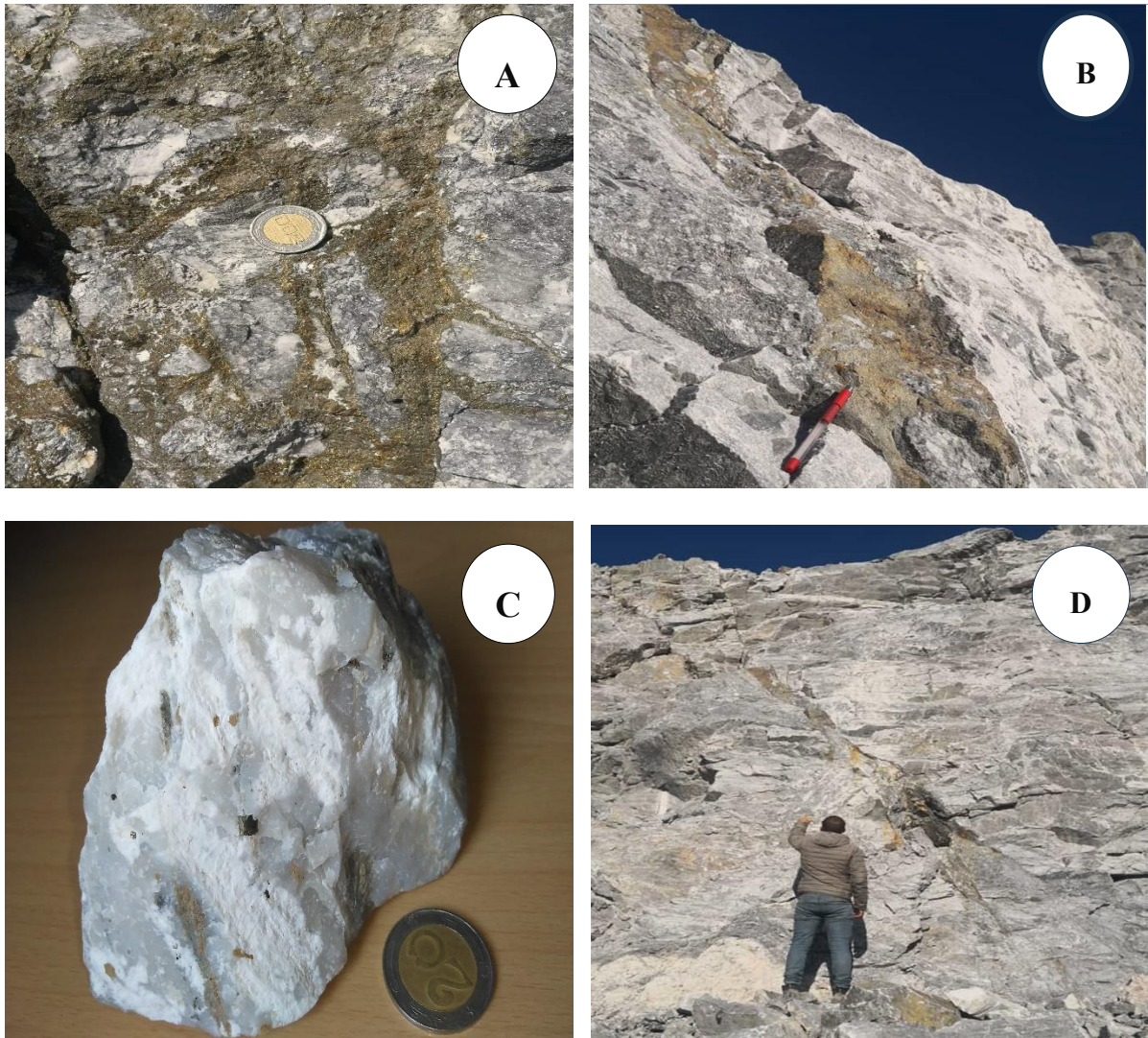


Figure 38 : Caractéristiques macroscopiques des roches carbonatées et des textures de pyrite associées : (A) texture en brèche, (B) texture massive, (C) grains de pyrite disséminés dans la roche, (D) remplissage des fissures par la pyrite.

Les roches carbonatées analysées sont exclusivement constituées de calcite. Cette dernière se manifeste sous forme de plages xénomorphes, affichant des dimensions variables atteignant parfois plus de 3 mm. Elle est reconnaissable par la présence de deux plans de clivage qui forment un motif quadrillé caractéristique (Fig.39. A, B).

Lorsqu'elle est soumise à l'observation en lumière polarisée analysée (LPA), la calcite révèle une biréfringence positive. Cette propriété optique se manifeste par l'apparition de couleurs vives et des variations de teinte au sein des cristaux, caractéristiques de leur structure (Fig.39.A). Le long des fractures, une association la phase minérale fréquemment observée se compose de calcite et de pyrite.



Les observations préliminaires effectuées au moyen du microscope à lumière réfléchie (Fig .39. C, D) ont révélé que la principale minéralogie métallique présente est la pyrite. Les grains examinés présentent fréquemment une altération, souvent sous une forme xénomorphe de dimensions centimétriques (fig.39.C).

La calcite, minéral associée à la pyrite, se distingue par son pléochroïsme clairement observable et sa réflexion interne d'apparence blanchâtre (Fig.39.C, D).

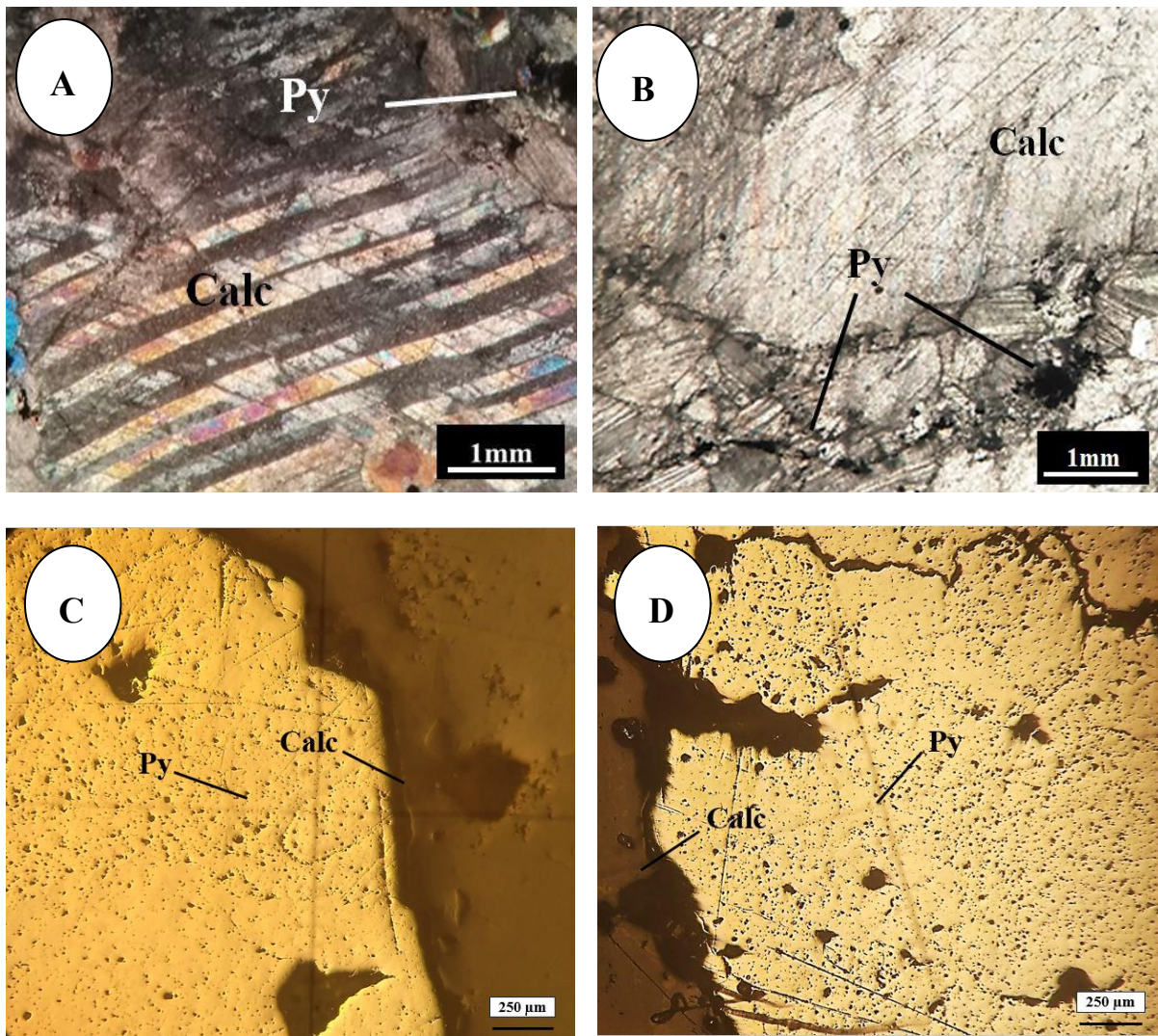


Figure 39 : Observations réalisées au microscope sur des échantillons récoltés au niveau de la carrière : (A) et (B) en lumière transmise polarisée analysée (LPA), (C) et (D) en lumière réfléchie au niveau des sulfures. (Calc : Calcite, Py : Pyrite)

#### IV.11 Evaluation des vibrations lors des tirs d'abattage

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact sur l'environnement de la carrière d'El M'cif dans son aspect lié aux vibrations, la société 'générale des mines' a conduit un essai sismique en utilisant les sismographes nomis. L'objectif de cette étude est de déterminer la loi d'atténuation des ondes

de choc induites par les tirs de la carrière, d'évaluer les répercussions des vibrations sur les structures avoisinantes dans la ville de Chekfa, ainsi que les effets environnementaux des tirs de carrière. Le tir numéro 14/2020 a été réalisé en septembre 2020, à une distance de 478 m de la zone de tir et à 120 m du bâtiment le plus proche.

La Figure 40, illustre de manière explicite les rayons d'influence des ondes sismiques, variant de 20 mm/s à moins de 7.5 mm/s, en réaction à des charges instantanées de 175 kg. Il est notable que les zones urbaines et résidentielles à protéger sont principalement situées dans la plage où les vitesses demeurent en deçà de 10 mm/s, même lorsque les tirs se rapprochent des limites du périmètre d'exploitation. Cependant, il convient de noter que tant que les zones de tir restent à une distance supérieure à 333 m des premières habitations, les vitesses particulières demeureront inférieures à 7.5 mm/s, ce constat étant toujours valable pour une charge maximale instantanée de 175 kg (Salhi et al., 2020).

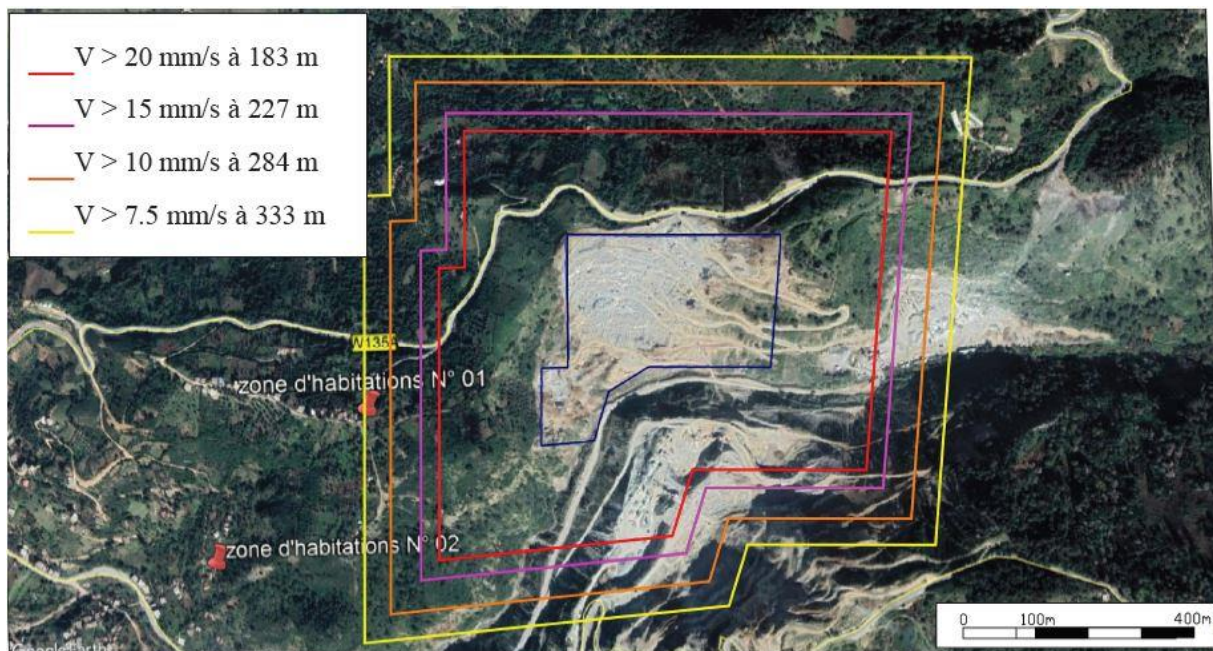


Figure 40 : Rayons d'influence des ondes sismiques pour des charges instantanées de 175 kg (Salhi et al., 2020).

Conformément aux normes allemande DIN 4150 et française, les vibrations générées par les différentes charges explosives se sont avérées insignifiantes. À la position de mesure désignée, la charge explosive de 2100 kg (avec une charge maximale instantanée  $Q = 175$  kg) n'a manifesté aucun impact significatif sur les vibrations, les projections, ni la pollution sonore. Il est indubitable que la zone résidentielle la plus proche est située hors de la zone Z5 (Fig.41),



où les risques sont minimes, et les dommages sont tout à fait négligeables pour un objet doté d'une valeur élevée de  $Q = 175 \text{ kg}$  (Salhi et al., 2020).

Cependant, il est crucial de noter que la limitation à un seul point de mesure dans cet essai à la carrière d'El M'cif pose un défi majeur, car cela restreint la capacité à généraliser une loi pour l'ensemble de la région. De plus, la réalisation d'un unique test sismique représente une approche inhabituelle. Par conséquent, il subsiste une incertitude quant à la représentativité des résultats de l'essai pour l'ensemble de la région, ainsi que la validité des lois établies pour toute la zone. Des tests additionnels pourraient être requis afin de corroborer les résultats et formuler des conclusions plus précises.

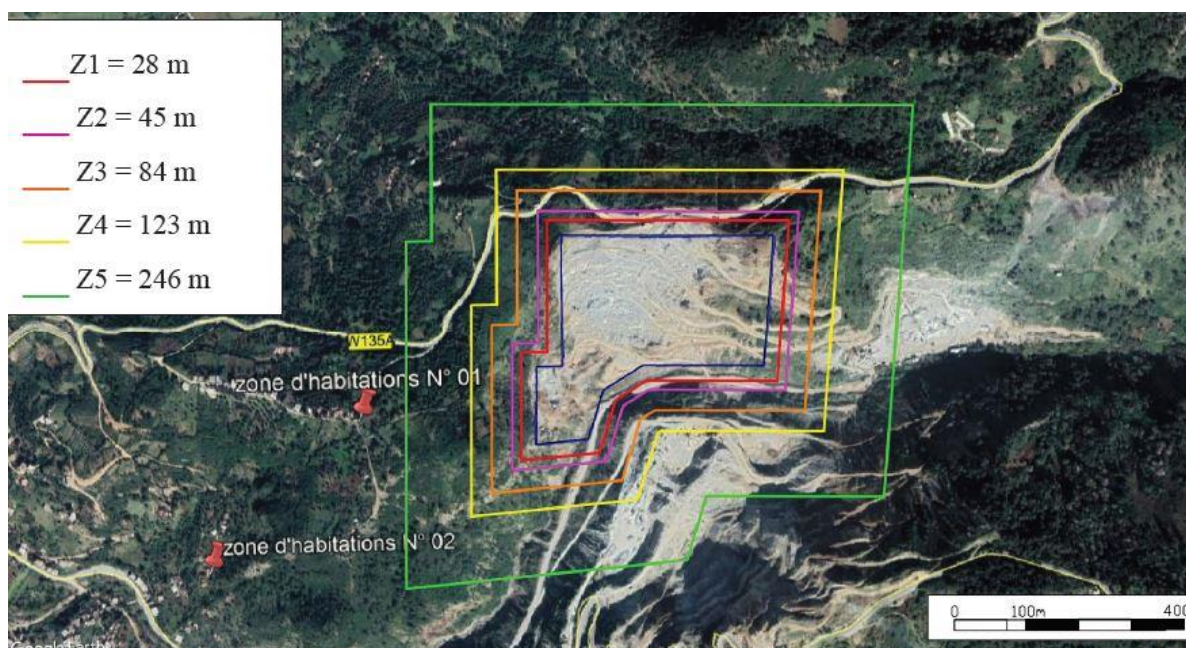


Figure 41 : Zones de risques pour des charges instantanées de 175 kg (Salhi et al., 2020).

#### IV.12 Identification des sources et origine des ETM

Les éléments traces métalliques (ETM), intrinsèquement présents dans le tissu environnemental, émanent généralement du processus d'altération des substrats rocheux, de l'érosion pédologique et de la dissolution des minéraux solubles dans les nappes aquifères (Nasirian et al., 2015). En effet, l'interaction substantielle entre l'eau et les formations lithologiques revêt une importance dans le processus de libération, de mobilisation et de transport des composés minéraux, engendrant la mobilisation des éléments métalliques avec une conséquente augmentation de leurs concentrations dans les différents composants de l'environnement associés (eau, sol, sédiments, végétation). Cette phénoménologie semble

expliquer les irrégularités liées aux ETM dans notre environnement industrialisé par l'exploitation des carrières d'agrégat.

Il est connu que la région de Jijel se caractérise par des précipitations assez substantielles, cumulant une moyenne annuelle d'environ 1 000 mm au cours de la dernière décennie. Ce facteur climatique, aussi déterminant qu'il soit, entraînerait par conséquent une accélération du processus de lessivage des roches exposées par le biais de l'interaction de l'eau avec les formations géologiques affleurantes ainsi que le transport subséquent des minéraux libérés qui en découle. À noter que cette période des hautes eaux, étendue principalement entre les mois d'octobre et mai, coïncide avec nos deux campagnes d'échantillonnage réalisées en septembre 2019 et mai 2021.

Par ailleurs, les activités extractives locales contribuent également de manière assez significative à ce processus de lixiviation (Fig.42.B). En effet, l'influence anthropogénique, notamment les activités extractives de Chekfa et les opérations connexes, peut potentiellement accentuer les concentrations minérales dans l'eau, le sol et les sédiments alentours. Le mécanisme de lessivage des roches extraites ; constituées principalement de roches carbonatées, de pegmatites, de gneiss ainsi que la présence des sulfures sur le site, concourent à la libération d'ions riches en ETM. En effet, le mode d'exploitation à ciel ouvert spécifique à la région implique l'extraction de fronts rocheux, dénudés de leur couvert végétal et fortement exposés aux conditions climatiques, les activités de creusement, le façonnage des terrasses, la réactivation des déchets de carrière érodés, les processus d'érosion des versants et des berges fluviales déposant les sédiments dans les chenaux des cours d'eau, contribuent à l'accroissement des concentrations de métaux dissous dans les eaux de ruissellement qui rejoignent les eaux de surface comme oued Aftis à proximité du site industriel et oued Nil plus en aval.

Des études antérieures ont démontré que les précipitations peuvent induire l'érosion et le lessivage des roches calcaires, entraînant une contamination certaine significative et des niveaux élevés d'ETM dans les sédiments des sources et de la rivière Litani au Mont-Liban (Korfali & Davies, 2004). Ces métaux peuvent être attribués à la géologie du Mont Liban, et la présence de carrières abandonnées ainsi que de formations karstiques en calcaire accentue le risque de transfert de contaminants vers les eaux souterraines et de surface (Darwish et al., 2004).

L'identification de diverses formes géomorphologiques souterraines liées aux karsts au sein de la carrière d'El M'cif (Fig.42.A), résultant par ailleurs du processus d'érosion et de lessivage des formations carbonatées présentes, suscite la réflexion quant à la probabilité que

ces structures géomorphologiques puissent favoriser la contamination des eaux de surface et souterraines en cas de contamination du milieu, qu'elle soit naturelle ou anthropique. Il est admis dans la littérature scientifique que le milieu karstique est plus vulnérable aux contaminations que le milieu poreux d'où un risque de contamination et de transport accrue que l'on soulève dans notre région d'étude. Les prélèvements d'eau à la station 2 montrent des concentrations de Pb, Cd et Zn nettement plus élevées que celles des autres sites d'échantillonnage dans la majorité des cas. Cette observation soulève des interrogations quant à la proximité de la station de traitement de la carrière à oued Aftis, potentiellement liée à cette hausse alarmante des concentrations. De manière similaire, à la station S3, la présence de la station d'enrobé (Fig.42.F) à proximité pourrait influencer le contexte hydrogéochimique. Il est plausible d'avancer que les niveaux élevés de métaux lourds retrouvés précédemment dans l'eau et le sol sont attribuables aux rejets de déchets anthropogéniques dans l'eau sous forme d'eaux usées industrielles engendrées par le lavage à la station, ainsi qu'aux dépôts de poussière sur les sols issues principalement des émanations atmosphériques et à la lixiviation des batteries de transport routier. Outre la contamination, la mobilisation et le transport des métaux lourds principalement est avéré problématique dans ce milieu karstifié.

Au cours de nos investigations sur le terrain, une observation pertinente a été relevée et concerne deux grandes stations de traitement permanente et mobile sur le site d'exploitation générant des particules en suspension dans l'air. La première, en tant qu'installation permanente (Fig.42. D), émet constamment des particules de poussière dans l'air, tandis que la seconde, de nature mobile, libère des particules de manière intermittente. Notons que ces installations opèrent généralement huit heures par jour, six jours par semaine. Outre la poussière générée par ces activités régulières, un nuage de poussière significatif est émis lors des explosions (Fig.42.E), survenant deux à trois fois par mois, avec un périmètre restreint délimitant la carrière. Deux unités industrielles de traitement, une centrale d'enrobé, trois véhicules de transport de matériaux, six engins excavateurs hydrauliques, quatre camions d'une capacité de 15 tonnes, des dispositifs de forage mobiles, des chargeuses à trois roues, un bulldozer, ainsi qu'une automobile et un autobus circulent dans la zone d'activité industrielle.

Il est important de souligner que ces particules en suspension peuvent contenir des éléments métalliques, susceptibles d'être inhalés ou de se déposer sur le sol, contribuant ainsi à la hausse des concentrations de métaux lourds dans le milieu environnant. Le processus prend son ampleur dans la durée surtout quand on sait que le site industriel est opérationnel depuis

2007 et l'effet cumulatif des contaminants dans le milieu récepteur, en particulier le sol de la région, est en partie responsable des seuils alarmants retrouvés dans cette étude.

Par ailleurs, nos investigations de terrain ont révélé que ces équipements engendrent une pollution ponctuelle en émettant des effluents d'hydrocarbures, des huiles lourdes et des lubrifiants associés aux processus de raffinage pétrolier, à l'usure des pneumatiques, des roulements, du liquide de transmission et de l'asphalte(Fig.42.C.F)(Kamani et al., 2017 ;Nasirian et al., 2016). De ce fait, ces émissions comprennent également des contaminants métalliques tels que le Pb, le Cd, le Cr, le Cu et le Zn.

De son côté, il a été repéré un village dit Boumidoune, situé en amont de la carrière, pourrait contribuer à la pollution de l'eau en raison de ses rejets d'eaux usées. Ces flux d'eaux chargés proviennent d'habitations non connectées au réseau d'assainissement. Il faut savoir qu'en milieu montagneux et rural, les habitats ont cet aspect dispersé et sont équipés de fosses septiques parfois vétustes qui laissent échapper des flux chargés en divers polluants d'origine urbaine. Dans l'ensemble, les contaminants métalliques fréquemment présents dans les eaux usées domestiques incluent le Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn (Vysokomornaya et al., 2015).

Des études antérieures menées dans le bassin versant du Nil entre 2011 et 2013 ont révélé des concentrations moyennes de plomb allant de 275.71 à 404.13 µg/L et de cadmium variant de 12.41 à 33 µg/L dans divers échantillons d'eau souterraine prélevés en aval(Belli &Leghouchi, 2018). Une autre étude a rapporté des concentrations élevées de plomb et de cadmium, atteignant respectivement 82.6 et 19.1 µg/L(Belli et al., 2010), Une analyse plus approfondie indique que les concentrations moyennes de ces deux métaux dans les sédiments de la rivière dépassent largement les niveaux de fond, avec des moyennes de 2.34 ppm et 61.50 ppm, respectivement. Ces concentrations élevées dans le bassin versant du Nil sont attribuées à divers facteurs, tels que l'agriculture et l'utilisation d'engrais(Krika&Krika, 2017).

La présence de métaux lourds dans le bassin versant de l'Oued El Nil pourrait être attribuable à la composition géologique de la région et à la présence de gisements polymétalliques dans les formations de socle environnantes. Une étude menée par Afalfiz en 1990 sur le district minéralisé de Chahna, au sud de la ville de Taher, a révélé la présence de métaux lourds dans différents niveaux de minéralisation et leurs roches hôtes. Ces conclusions suggèrent que des formations lithologiques similaires et des minéralisations pourraient exister dans notre zone d'étude, constituant ainsi probablement la source des métaux lourds détectés dans l'eau, les sédiments et les sols analysés. Les déchets domestiques et les dépôts atmosphériques, propices

à la contamination par les métaux lourds, sont également susceptibles de contribuer à cette problématique (Belli & Leghouchi, 2018).

Des investigations complémentaires ont été entreprises au cours d'une campagne d'échantillonnage entre 2021 et 2022, nous avons prélevé cinq puits localisés en aval du bassin versant étudié, dans la région de Djimar, qui se trouve en aval de la commune de Chekfa, et fait partie du bassin versant de l'oued El Nil. Le but a été de suivre les contaminants métalliques en aval, du moment où le milieu souterrain présente une capacité de transport et de mobilité assez grande. Les résultats ont révélé des valeurs de plomb et de cadmium surpassant largement les normes réglementaires, avec des concentrations de plomb s'étendant de 378 à 695  $\mu\text{g/L}$  et des concentrations de cadmium variant de 72 à 169  $\mu\text{g/L}$ . Ces observations mettent en évidence notre hypothèse du transport des contaminants dans le milieu souterrain et la grande vulnérabilité du milieu hydrogéologique aux manifestations karstiques face aux pollutions. Il met en cohérence le phénomène de la continuité spatiale dans les niveaux de concentration des métaux lourds qui semblent s'accroître d'amont en aval ainsi que le transport de ces contaminants métalliques dans les flux d'eau souterraine malgré la présence en aval de nombreuses lentilles et interfaces d'argiles qui devraient jouer le rôle de matrice de fixation et d'adsorption des éléments contaminants. D'ailleurs l'aquifère est recouvert de couche argileuse par endroits le rendant semi-captif et théoriquement protégé des infiltrations souillées par les contaminants de surface.

Toutefois, il convient de noter que les concentrations des métaux lourds atteignent leur concentration maximale en aval de la carrière, présentant une augmentation annuelle des concentrations en plomb et en cadmium. Cette tendance souligne l'impact significatif de l'activité industrielle liée à l'exploitation de la carrière sur la qualité de l'eau dans le bassin versant étudié. Par ailleurs, les concentrations en Pb, Zn, et Cd dans l'eau de la source localisée à proximité de la carrière, avec des moyennes respectives de 381,7  $\mu\text{g/L}$ , 16 695  $\mu\text{g/L}$ , et 17,7  $\mu\text{g/L}$ , dépassent les normes de potabilité requises. Cette source prend naissance dans les montagnes de Bordj Thar et s'écoule à travers les diverses formations lithologiques du socle kabyle, comprenant des gneiss, des micaschistes, des schistes et des phyllades. L'interaction eau-roche est accélérée, surtout lorsque le temps de résidence est prolongé. Il est observé que les eaux souterraines ont une propension naturelle à l'enrichissement progressif en éléments chimiques et en métaux lourds au fil du temps. Cette dynamique met en évidence l'influence substantielle des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques sur la composition chimique des eaux souterraines dans la région étudiée.



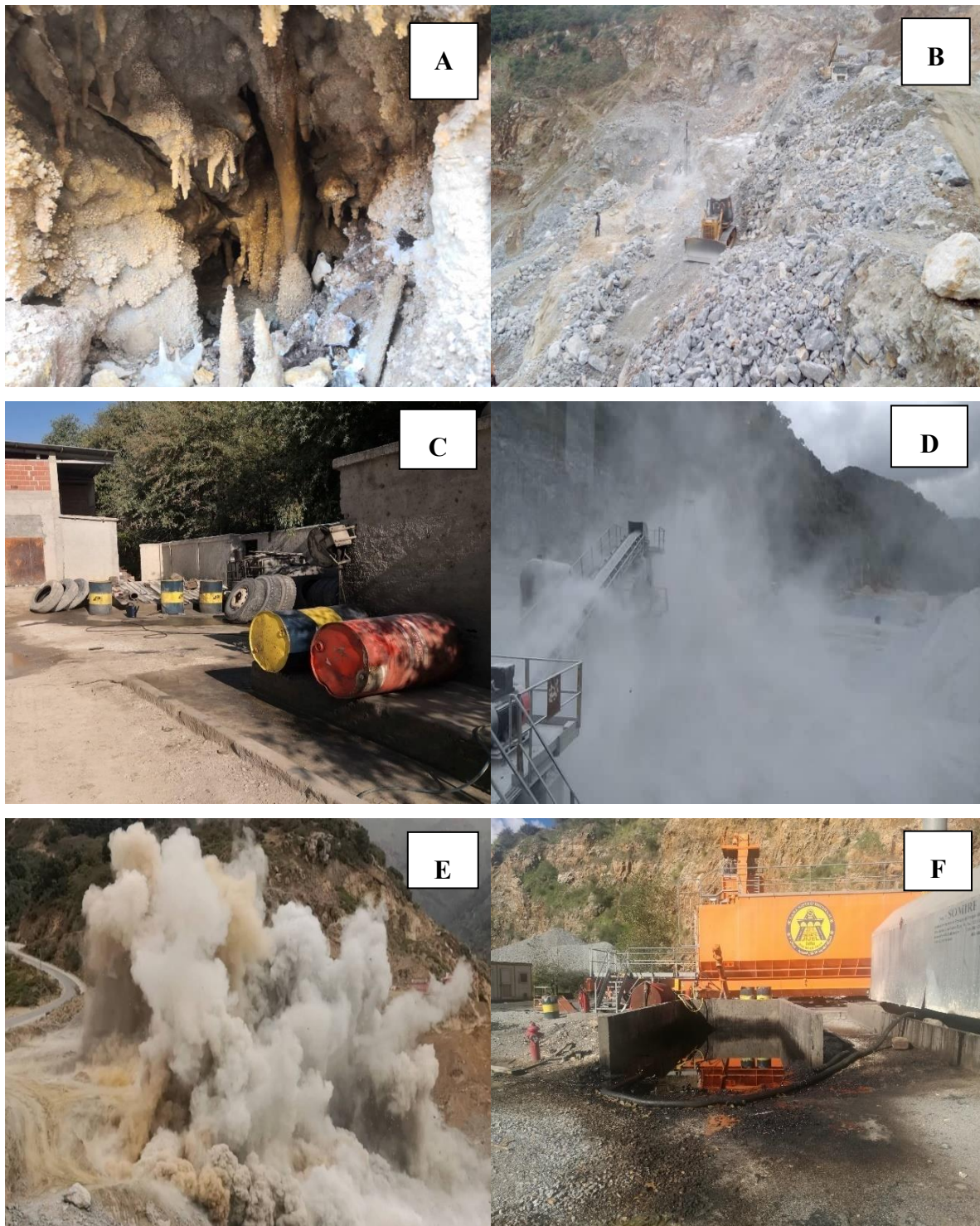


Figure 42 : Prises de vue des différents sites de carrière considérés dans cette étude : (A) cavité karstique dans le calcaire de la carrière, (B) enlèvement d'un bloc rocheux, (C) pollution ponctuelle provenant des usines de bitume et d'asphalte, (D) hydrocarbures et les lubrifiants utilisés dans la carrière, (E) la poussière générée par les machines et l'usine de traitement, (F) un immense nuage de poussière généré par une explosion minière.



En conclusion, il est manifeste que les sources de contamination géogènes prédominent en tant que principaux contributeurs des métaux lourds dans les eaux de surface et les sols. Toutefois, elles sont géographiquement limitées à la partie amont du bassin versant. Ces sources sont suivies par des facteurs anthropogéniques, en particulier les activités extractives situées toujours en amont du bassin versant et leurs conséquences, ainsi que les processus explosifs, les émissions de poussières et les sources de transport, qui ont évolué au cours des deux dernières décennies d'exploitation des agrégats.

Il est admis que la pollution industrielle et celle issue du trafic routier représentent les sources prédominantes de Zn et de Cd excédant les normes de qualité établies. Les paramètres, tels que les volumes d'extraction, le nombre ainsi que les dimensions des carrières, connaissent une croissance notable, accentuant ainsi le risque de mobilisation des métaux à partir des sites de carrières et des résidus vers les eaux et les sols. L'association de ces mécanismes et sources de contamination indique clairement une tendance à l'augmentation future des concentrations des éléments métalliques. Ces perturbations cumulatives doivent être consciencieusement prises en considération dans la prévision et la planification des implications résultantes de l'accroissement anticipé des perturbations environnementales à venir.

#### **IV.13 Conclusion**

Les sources de contamination géogènes sont les principales responsables des métaux lourds dans les eaux de surface et les sols, surtout en amont du bassin versant. Les activités humaines, comme les exploitations minières et les émissions de poussières, intensifient cette pollution, en particulier pour le zinc et le cadmium. L'augmentation des activités extractives et des perturbations environnementales laisse présager une hausse future des concentrations de métaux, rendant nécessaire une planification rigoureuse.

## ***Chapitre V :***

***Etude d'impact sur l'environnement de  
l'exploitation des carrières et l'industrie  
extractive au piton d'Akbou***

## **Chapitre V : Etude d'impact sur l'environnement de l'exploitation des carrières et l'industrie extractive au piton d'Akbou**

### **V.1. Introduction**

Ce chapitre se penchera sur l'étude et l'évaluation de l'impact de l'exploitation des carrières de granulats et des industries extractives dans le piton d'Akbou. Il faut signaler que les carrières sont à l'arrêt depuis 2016. Trois campagnes d'échantillonnage des eaux des rivières de l'oued Sahel, oued Boussellam et oued Soummam ont été réalisées dans cette zone caractérisée par un réseau hydrographique assez dense. Des prélèvements ont été également réalisés sur les eaux souterraines, les sédiments et les sols environnants. Par la suite, nous présenterons et discuterons les principaux résultats obtenus en mettant la lumière sur les anomalies géochimiques relevées sur le site d'extraction actuellement à l'arrêt.

### **V.2. Variation spatio-temporelle des conditions physico-chimiques et métaux lourds dans les eaux**

#### **V.2.1 Paramètres physiques des eaux**

- **Température**

Les variations thermiques enregistrées dans les différentes stations sont résumées dans la figure 43. Au cours de trois campagnes, la température de l'eau de surface présente une amplitude allant de 8,4 à 33,4°C, avec une moyenne de 22,4°C.

Par ailleurs, les mesures In Situ de températures effectuées dans les eaux souterraines des deux forages ont montré des fluctuations comprises entre 16,8°C en mai 2021, et 24,8°C au forage 1 en janvier 2021. La plupart des températures relevées dans les eaux de surface dépasse les normes algériennes et l'OMS, qui sont fixées à 25°C.

- **pH**

Les mesures effectuées dans toutes les stations superficielles indiquent une tendance du milieu plutôt alcaline, marquant des fluctuations allant de 7,35 à (S3) en octobre 2019 à 8,5 à (S3) en septembre 2021 et (S4) en mai 2021. Il en est de même pour les eaux de forages analysées, leurs pH oscillent dans la plage de 7,6 à 8,25 (Fig.43). Il est notable de signaler que la plupart des valeurs est conforme aux normes édictées par les directives sanitaires algériennes ( $6,50 < \text{pH} < 9$ ).

Cette alcalinité prononcée découle spécifiquement de la lithologie régionale, caractérisée par la prépondérance de formations carbonatées.

- **Conductivité électrique**

Les résultats des mesures de la conductivité électrique des eaux de surface dans les trois oueds Sahel, Boussellam et Soummam ont révélé des valeurs anormalement élevées. Elles oscillent de 1804 à 29300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig.43), témoignant d'une forte minéralisation dans cet écosystème aquatique de surface fortement anthropisé. En effet, la valeur maximale de la conductivité électrique a été enregistrée au niveau de l'oued Boussellam atteignant 29300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cette minéralisation trouve son origine d'une part dans la dissolution des dolomies triasiques et du cénomaniens et d'autre part elle est due à la présence des formations alluviales salines mio-plio-quaternaires comme le gypse et les marnes, ainsi que des calcaires crétacés (Boulguerager, 2019).

Etant donné que le Boussellam est identifié comme une potentielle source à l'origine d'un processus accéléré de minéralisation des eaux de surface et des eaux souterraines, ce processus découlerait bien de sa fonction de drainage des formations calcaireuses de la chaîne des Biban dont les versants nord limitent les bordures de la vallée de la Soummam sur sa rive droite.

De plus, la présence d'un barrage, en particulier celui de Tichy Haf, sur cet important affluent renforce l'hypothèse selon laquelle les débits d'eau relâchés, contenant des sédiments et de la boue concentrée en sels nutritifs, peuvent expliquer ces concentrations élevées. En effet, entre 2011 et 2013, Kessasra a mesuré ces conductivités entre 15 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en 2011 et 13 330  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en avril 2013. Il a attribué ces fortes teneurs aux lâchers d'eau qui coïncidaient avec ses prélèvements de mars 2011. Cette conjecture est étayée par les données recueillies auprès de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) en 2011 qui indiquent sur ses bulletins que des lâchers d'eau ont été effectués et estimés à 22,7 Hm<sup>3</sup> entre février et avril 2011 (Kessasra, 2015).

Nous n'avons pas pu appuyer cette corrélation car les nouveaux bulletins de l'ANBT coïncidant avec nos campagnes de terrain entre 2019 et 2021 ne sont pas disponibles. Il faut signaler que le niveau d'eau dans la cuvette du barrage est au plus bas, le barrage a été observé à sec pendant la saison d'étiage depuis 2019 en raison du manque des précipitations.

Quant aux eaux souterraines de la nappe alluviale, les forages analysés indiquent des conductivités électriques variant entre 560 et 894  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Soit une minéralisation modérée. La majorité des valeurs mesurées ne dépasse pas les normes algériennes fixées à 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

## V.2.2 Paramètres chimiques des eaux

- **Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ )**

Selon les données figurant dans le tableau 7 et la figure 43, les concentrations en calcium observées dans les stations de prélèvement le long des oueds reflètent des variations assez significatives, oscillant entre 97,22 mg/L à la station S1 en janvier 2021 et 1382,5 mg/L à la station S2 en septembre 2019. Les teneurs les plus élevées de  $\text{Ca}^{+2}$  ont été enregistrées dans l'oued Boussellam à la station S2. Ces fortes concentrations, en lien immédiat avec les fortes conductivités électriques, résultent principalement de la dissolution des dépôts d'évaporites et des formations carbonatées présentes dans le sous bassin-versant du Boussellam.

Par ailleurs, il convient de souligner que les concentrations de  $\text{Ca}^{+2}$  dans les deux forages analysés présentent des valeurs relativement basses. Se situant dans une fourchette comprise entre 96,2 et 117,8 mg/L, cette disparité observée peut être attribuée à des facteurs géologiques distincts telle que la composition minéralogique des roches, le temps de contact, la présence des fissures et des failles...etc., influençant les caractéristiques chimiques des eaux souterraines par rapport aux eaux de surface.

- **Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ )**

Les concentrations de magnésium observées dans les eaux de surface manifestent une variation significative, s'étendant de 35,9 mg/L (S4) en mai 2021 à 124,8 mg/L à la station 3 au niveau d'Oued Soummam en septembre 2019. Les concentrations de magnésium dans les eaux souterraines exhibent des valeurs relativement basses, oscillant entre 21,38 et 26,24 mg/L (Fig.43).

- **Sodium et Potassium ( $\text{Na}^{++}\text{K}^{+}$ )**

L'origine du sodium est principalement attribuable à la dissolution des formations géologiques riches en sels, aux effluents industriels et domestiques, ainsi qu'à l'utilisation d'engrais en agriculture. Les concentrations de sodium exhibent une plage étendue, variant de 502 à 5192 mg/L à la station 2 au niveau d'oued boussellam en septembre 2019, tandis que des concentrations plus modestes ont été constatées dans les eaux souterraines, oscillant entre 20,7 et 28,50 mg/L (Fig.44).

En ce qui concerne le potassium, les eaux naturelles présentent généralement des concentrations modérées, résultant soit de l'altération des minéraux silicatés ou du lessivage des engrais. Les observations révèlent des concentrations fluctuant dans une fourchette allant de 2 à 59,20 mg/L, tandis que les eaux de forage affichent des concentrations variantes entre 2 et 3,7 mg/L (Fig.44).

- **Chlorures (Cl)**

Les données analytiques relatives aux eaux de surface de la Soummam révèlent que le chlorure émerge comme le paramètre prédominant, exhibant une plage significative de concentrations. Elles oscillent entre 194,8 à 9867 mg/L. Notamment, la valeur maximale a systématiquement été enregistrée au prélèvement effectué à Oued Boussellem (Fig.44). L'origine de ces fortes teneurs en chlorures peut être attribuée à divers facteurs. Il y'a lieu de relever la prédominance du facteur géogène dans la région, notamment le lessivage naturel des sols caractérisés par leur forte salinité, leur teneur en gypse, et leurs dépôts évaporitiques.

Ce facteur est d'autant appuyé par d'autres facteurs d'origine anthropique dus aux activités humaines qui caractérisent la région d'Akbou. En effet, les rejets domestiques de surface provenant des secteurs urbains non-raccordés au réseau d'assainissement et en l'absence d'une STEP dans la région, contribuent à rehausser les teneurs en Cl. Les déversements directs des eaux usées dans le réseau hydrographique est observé lors de nos campagnes de terrain.

D'autant plus, les rejets agricoles des domaines agricoles cultivés à l'amont du piton d'Akbou, en l'occurrence à Cheurfa et à Tazmalt, et des rejets industriels provenant des unités appartenant aux diverses filières industrielles depuis Tazmalt jusqu'à Taharacht près d'Akbou sont identifiés comme des contributeurs substantiels à la présence accrue des chlorures dans l'eau de surface. Des sources additionnelles incluant l'intrusion marine et l'utilisation de pesticides dans l'agriculture peuvent être évoquées, (Kessasra, 2015;Kessasra et al., 2021).

Les concentrations de chlorures dans les eaux de surface dépassent significativement les normes algériennes établies à 600 mg/L, à l'exception des données de l'Oued Sahel. En revanche, les niveaux de chlorures dans les eaux de forage sont conformes aux normes algériennes fixées à 500 mg/L et non conformes à la norme OMS fixée à 200 mg/L.

- **Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )**

Dans les eaux de surface, les concentrations en bicarbonates oscillent entre 200 et 1364 mg/L, comme observé dans l'Oued Sahel en septembre 2019. Les teneurs en ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans les eaux souterraines prélevées présentent une variation allant de 241,5 mg/L au forage 2 en mai 2021 à 430 mg/L au forage 2 en janvier 2021(Fig.43).

L'origine de ces concentrations relativement élevées peut être attribuée vraisemblablement au lessivage des roches carbonatées en présence d'eaux chargées en dioxyde de carbone. Ce phénomène témoigne de l'interaction complexe entre la composition géologique locale et les caractéristiques physico-chimiques des eaux.

- **Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

Les fluctuations des sulfates dans les eaux de la Soummam varient entre 1,92 mg/L, comme observé dans l'Oued Sahel en janvier 2021, et 310,22 mg/L dans la station 4 prélevée à l'Oued Soummam près du piton d'Akbou en mai 2021(Fig.44) .

Par ailleurs, les résultats des prélèvements effectués dans les eaux souterraines ont dévoilé une gamme de concentrations de  $\text{SO}_4^{2-}$  plus étendue oscillant entre 0,106 mg/L et 59,49 mg/L. Les eaux de surface et les eaux souterraines sont en conformité avec les normes algériennes fixées à 400 mg/L.

- **Sels nutritifs :  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$**

Les concentrations en nitrates dans les eaux de surface présentent une tendance à la modération, avec une valeur maximale enregistrée au mois de janvier 2021 à Oued Sahel atteignant 25,4 mg/L. Les concentrations en nitrates sont conformes aux normes algériennes pour les eaux de surface, établies à 50 mg/L. Concernant les nitrites, ces composés se manifestent généralement à des niveaux plus ténus, avec une concentration maximale de 1,39 mg/L observée également à Oued Sahel S1 en janvier 2021. Les teneurs en  $\text{NH}_4^+$ , quant à elles, exhibent une variation, s'étalant de 0,55 mg/L à Oued Soummam S3 à 4,19 mg/L à Oued Sahel S1. Les concentrations en Ammonium sont conformes aux normes algériennes pour les eaux de surface, établies à 4 mg/L. Les analyses révèlent des concentrations en orthophosphate remarquablement limitées, oscillant entre 0 mg/L et 0,39 mg/L, comme constaté à l'emplacement d'Oued soummam S3 en janvier 2021(Fig.44).

L'examen des eaux souterraines expose des niveaux distincts, avec les teneurs en nitrates comprises entre 5,28 mg/L et 13,1 mg/L, celles des nitrites entre 0,002 mg/L et 0,8 mg/L, les concentrations d'ammonium entre 0,008 mg/L et 0,08 mg/L, et les valeurs d'orthophosphate variant entre 0 mg/L et 0,02 mg/L. Les concentrations de nitrates, de nitrites et d'ammonium sont conformes aux normes algériennes et de l'OMS pour les eaux souterraines, établies respectivement à 50 mg/L, 30 mg/L et 0,2 mg/L respectivement (Fig.44).

A l'issue de ces premiers résultats analytiques du second site étudié, il en ressort que la rivière Boussellam, en tant qu'affluent majeur de la vallée de la moyenne Soummam, exerce une influence directe sur les divers paramètres physico-chimiques au sein de ladite vallée. En effet, des valeurs assez élevées de conductivité électrique (CE) ainsi que des concentrations significatives en sels minéraux associés (Chlorures, sulfates, ...etc.) ont été identifiées en fortes proportions dans les eaux en aval (S3), résultant du drainage des formations carbonatées des Bibans provenant de l'affluent Boussellam. Il a été identifié également la croissance

remarquable des teneurs physico-chimiques analysées entre 2019 et 2021 dans cette étude comparativement à celles mesurées par Kessasra 2011 et 2013, ce qui reflète l'influence de l'intense activité humaine sur les écosystèmes aquatiques de la région.

La station (S2) au niveau de l'oued Boussellam se révèle être une source substantielle de pollution, engendrant la présence de sels minéraux issus du drainage et du lessivage des formations carbonatées des Bibans, ainsi que des effluents industriels et urbains renfermant divers polluants (Kessasra, 2015). Ce qui pourrait nous orienter sur l'impact direct qu'exerce les sites d'extraction dans les carrières à l'arrêt du piton d'Akbou. Les sites d'extraction dans les carrières, même à l'arrêt, peuvent avoir un impact direct sur la qualité de l'eau par le lessivage des dépôts résiduels et des produits chimiques, la modification des flux d'eau souterrains, la contamination par les poussières, les changements géochimiques tels que l'oxydation, et la solubilisation des métaux. De plus, les réservoirs de polluants et la perturbation des écosystèmes peuvent relâcher des contaminants dans les eaux souterraines.



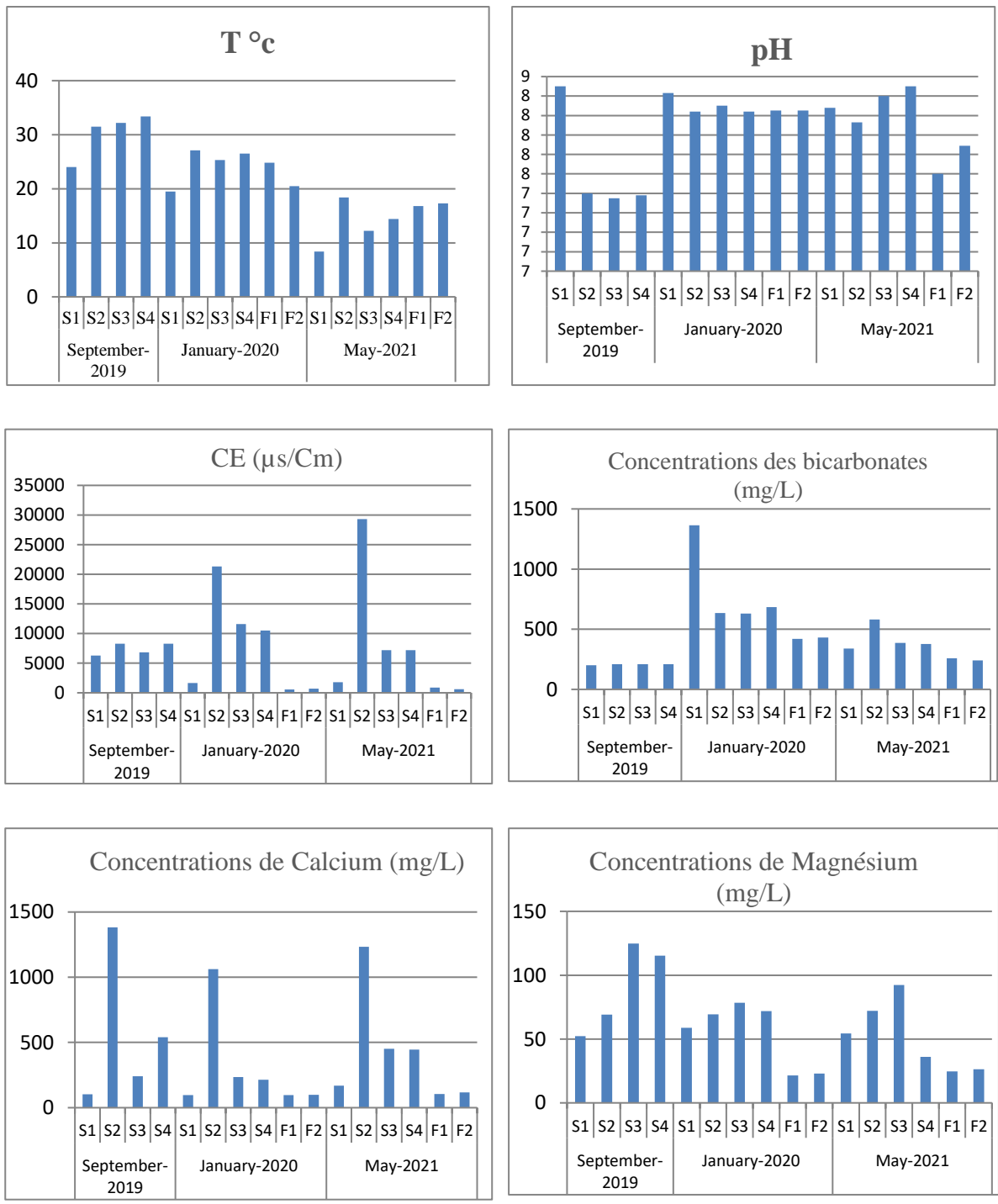


Figure 41 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines dans les carrières et l'industrie extractive du Piton d'Akhou (Béjaïa)

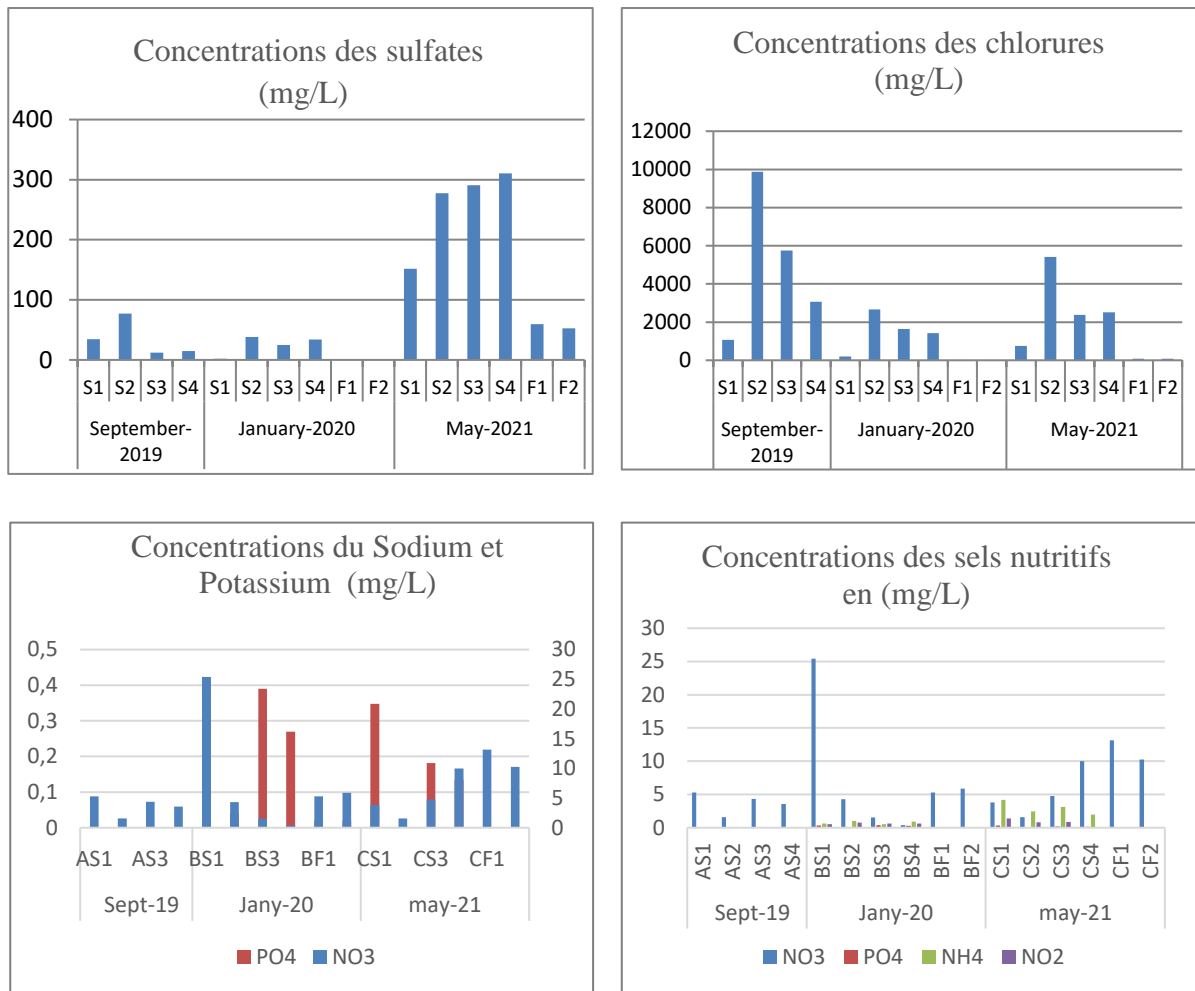


Figure 42 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines dans les carrières et l'industrie extractive du Piton d'Akbou (Béjaïa)

Tableau 7 : Paramètres physico-chimiques des eaux de surface et souterraines au niveau des industries extractives au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa)

| Paramètres                           | sept-19 |         |        |        | janv-20 |         |       |        |       |      | mai-21 |         |         |         |        |        |
|--------------------------------------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|-------|--------|-------|------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
|                                      | S1      | S2      | S3     | S4     | S1      | S2      | S3    | S4     | F1    | F2   | S1     | S2      | S3      | S4      | F1     | F2     |
| T                                    | 24      | 31.5    | 32.2   | 33.4   | 19.5    | 27.1    | 25.3  | 26.5   | 24.8  | 20.5 | 8.4    | 18.4    | 12.2    | 14.4    | 16.8   | 17.3   |
| PH                                   | 8.5     | 7.4     | 7.35   | 7.38   | 8.43    | 8.24    | 8.3   | 8.24   | 8.25  | 8.25 | 8.28   | 8.13    | 8.4     | 8.5     | 7.6    | 7.89   |
| CE                                   | 6310    | 8280    | 6820   | 8300   | 1670    | 21300   | 11600 | 10500  | 560   | 700  | 1804   | 29300   | 7200    | 7200    | 894    | 629    |
| O <sub>2</sub>                       | 200     | 208.84  | 209.84 | 210.13 | 1364    | 634.5   | 630.9 | 683.2  | 420   | 430  | 339.16 | 580     | 385.52  | 378.2   | 258.64 | 241.56 |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) | 103.48  | 1382.52 | 241.24 | 541.24 | 97.22   | 1061.32 | 235.8 | 214.83 | 96.19 | 99.4 | 169.33 | 1234.21 | 452.1   | 445.8   | 105.8  | 117.87 |
| Ca <sup>+</sup> (mg/L)               | 52.3    | 69.2    | 124.8  | 115.2  | 58.71   | 69.42   | 78.4  | 71.78  | 21.38 | 23   | 54.43  | 72      | 92.34   | 35.96   | 24.71  | 26.24  |
| Mg <sup>+</sup> (mg/L)               | 34.41   | 76.9    | 12.1   | 14.92  | 1.92    | 38.43   | 25    | 34     | 0.21  | 0.11 | 151.8  | 277.33  | 290.67  | 310.22  | 59.49  | 52.6   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) | 5.3     | 1.57    | 4.35   | 3.58   | 25.41   | 4.3     | 1.52  | 0.39   | 5.28  | 5.9  | 3.82   | 1.58    | 4.76    | 10      | 13.14  | 10.26  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)  | 1070    | 9867    | 5751   | 3063.5 | 194.8   | 2672    | 1640  | 1426.8 | 2.8   | 3    | 760    | 5416    | 2374.85 | 2518.25 | 88.75  | 80.55  |
| Cl <sup>-</sup> (mg/L)               | -       | -       | -      | -      | 0.36    | 0.04    | 0.39  | 0.27   | 0.02  | 0.02 | 0.35   | 0       | 0.18    | 0.14    | 0      | 0      |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L) | -       | -       | -      | -      | 0.63    | 1.01    | 0.55  | 0.9    | 0.06  | 0.01 | 4.19   | 2.48    | 3.13    | 1.99    | 0.08   | 0.01   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)  | -       | -       | -      | -      | 0.52    | 0.79    | 0.62  | 0.65   | 0.01  | 0    | 1.39   | 0.82    | 0.86    | 0.12    | 0.05   | 0.08   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)  | 704     | 5192    | 4129   | 1340   | 558.68  | 1098    | 1165  | 1030   | 28.5  | 28.1 | 502    | 3160    | 1330    | 1449    | 25.2   | 20.7   |
| Na <sup>+</sup> (mg/L)               | 10      | 48      | 59.2   | 7.8    | 10.5    | 12      | 14.6  | 53     | 3.7   | 2.4  | 8.4    | 58      | 18.4    | 17.6    | 2      | 3.6    |
| K                                    | 10      | 48      | 59.2   | 7.8    | 10.5    | 12      | 14.6  | 53     | 3.7   | 2.4  | 8.4    | 58      | 18.4    | 17.6    | 2      | 3.6    |

### V.3. Eléments Traces Métalliques

#### V.3.1. Variation spatiale et saisonnière des métaux lourds

Le tableau 8 présente les teneurs en métaux lourds, ainsi que des statistiques descriptives associées. Elles sont issues des campagnes d'échantillonnage analysées dans les oueds Sahel, Boussellam et la Soummam, et les eaux de forages aux abords du piton d'Akbou. Les valeurs moyennes de concentration des métaux ont été établies dans l'ordre décroissant suivant : Zn > Pb > Fe > Cd > Cu.

Tableau 8 : Éléments traces métalliques dans les eaux de surface et les eaux souterraines des carrières et l'industrie extractive au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa)

|    | Eaux de surface<br>µg/L |       |         |         | Eaux souterraines<br>µg/L |       |        |        | OMS<br>(2022)<br>µg/L | Normes algériennes<br>(2011) µg/L |                 |
|----|-------------------------|-------|---------|---------|---------------------------|-------|--------|--------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|
|    | Min                     | Max   | Mean    | Sd      | Min                       | Max   | Mean   | Sd     |                       | Eau de surface                    | Eau souterraine |
| Fe | 33.1                    | 283.9 | 149.9   | 86.7    | 67                        | 74.6  | 70.5   | 3.4    | 5000                  | 1000                              | 300             |
| Pb | 54.5                    | 940.5 | 320.3   | 269     | 136.3                     | 667.9 | 313.5  | 247.6  | 10                    | 50                                | 10              |
| Zn | 8.0                     | 70639 | 10471.3 | 21362.7 | 149                       | 18270 | 6914.0 | 8628.3 | 50                    | 5000                              | 5000            |
| Cu | 7.6                     | 77.4  | 15.8    | 5.7     | 7.4                       | 11.9  | 10.3   | 1.9    | 2000                  | 2000                              | 50              |
| Cd | 19                      | 39.1  | 25.5    | 4.8     | 20                        | 22    | 21.3   | 0.9    | 3                     | 5                                 | 5               |

- **Fer**

Les concentrations de fer relevées au droit des stations d'échantillonnage exhibent une moyenne de 149,9 µg/L. L'analyse graphique met en lumière une amplitude variant de 33,1 µg/L, observée à Oued soummam à la station 4 en septembre 2019, à 283,9 µg/L, enregistrée à la même station au mois de mai 2021.

En ce qui concerne les prélèvements réalisés au niveau des forages, les concentrations en fer présentent une fourchette comprise entre 67 et 74.6 µg/L. La concentration maximale a été consignée en mai 2021 au forage F2. Il est à noter que les teneurs en fer dans les eaux de surface et souterraines sont conformes aux directives émises tant par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) que par les normes réglementaires algériennes, lesquelles sont fixées à un seuil de 1000 µg/L pour les eaux de surface et à 300 µg/L pour les eaux souterraines (Fig.45).

La source de ces concentrations en fer est probablement lithologique. Le piton d'Akbou représente la continuité de la montagne d'Adrar Gueldamane (Coutelle, 1979) qui abrite des

vestiges d'exploitation minière du fer sur le flanc nord de l'Adrar Gueldaman (Kherbouche, 2015). Le lessivage de ces formations, où le minerai extrait était principalement composé d'hydroxydes de fer avec une teneur élevée, d'au moins 50% de Fe (Glaçon, 1967), est probablement à l'origine de ces concentrations élevées de fer dans l'eau, du moins pour la station de l'oued Soummam S4.

- **Plomb**

Des concentrations de plomb significativement élevées ont été observées dans la quasi-totalité des stations de prélèvement des eaux de surface, avec une moyenne enregistrée de 320.3 µg/L. La figure 50 révèle une variabilité substantielle, s'étendant de 54.4 µg/L à Oued Soummam S3 à une valeur maximale de 940.5 µg/L à Oued Boussellam S2 en janvier 2021 (Fig.45).

En ce qui concerne les eaux souterraines, les concentrations de plomb se présentent dans une large fourchette, oscillant entre 136.3 et 667.9 µg/L. La valeur maximale a été enregistrée en janvier 2021. Il convient de souligner que les teneurs en plomb dépassent largement les normes algériennes et les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), fixées à 10 µg/L.

Les principales sources du plomb incluent les poussières, les émissions provenant des véhicules automobiles, l'exposition aux événements de batteries, la manipulation de peinture au plomb, les déchets miniers, ainsi qu'une alimentation contaminée.(Raj &Das, 2023).

L'analyse révèle que la station de prélèvement située à Oued Boussellam enregistre des concentrations de plus en plus élevées de plomb par rapport aux autres stations. L'eau de l'Oued Boussellam exhibe une forte minéralisation et une charge importante en métaux lourds, suggérant que ces concentrations élevées en plomb peuvent résulter du lessivage des formations géologiques de la chaîne des Bibans que l'oued traverse et des lâchers du barrage de Tichy Haf. Ceux-ci contiennent des boues au fond de la cuvette polluées et enrichies en métaux lourds.

De plus, une étude de la pollution menée sur la partie amont de l'Oued Boussellam révèle que les concentrations en plomb plus en amont de la station échantillonnée atteignent 760 µg/L. Ce qui est attribué à l'évacuation des eaux usées et des déchets provenant de la zone industrielle et de la ville de Sétif (Boulgueraguer, 2014) où prend naissance le Boussellam.

Il en est de même dans la vallée de la Soummam où la présence de plomb résulte de l'évacuation incontrôlée des eaux usées, de la présence de décharges publiques et de la dispersion non-réglémentée des déchets le long de la vallée. Le trafic routier, les émissions de poussières provenant des cimenteries et les divers déchets industriels contribuent également à

la libération de plomb dans le sol et les cours d'eau environnants. La problématique du plomb dans les eaux atteint les trois sous-bassin versants de la Soummam.

- **Zinc**

Le zinc émerge comme l'élément prédominant dans les eaux de surface et souterraines analysées à proximité de notre site d'étude. La moyenne des douze valeurs de la teneur en zinc dans les eaux de surface s'élève à 10 471.3 µg/L. Conformément à la figure 50, les concentrations de zinc présentent une variation significative au cours des trois campagnes, oscillant entre 8 µg/L en septembre 2019 à S3 et atteignant exponentiellement 70 639 µg/L en janvier 2021 au niveau de l'Oued Soummam à S3.

En ce qui concerne les eaux de forages, les valeurs de zinc varient entre 149 et 18 270 µg/L, avec un pic de concentration enregistré en mai 2021. Les teneurs en zinc dans les eaux de forage dépassent ainsi les normes établies par l'OMS, fixées à 50 µg/L.

L'introduction du zinc dans l'environnement résulte de diverses causes, notamment le drainage minier, les déchets industriels, les effluents industriels, les eaux usées domestiques et les pratiques agricoles (Grujic et al., 2018). L'analyse exhaustive menée au niveau du piton d'Akbou a révélé une augmentation notable des concentrations de zinc, particulièrement remarquable en janvier 2021. Durant cette période, la station d'Oued Soummam, adjacente aux sablières, aux stations de concassage et de broyage au pied du piton, a enregistré une concentration maximale de zinc de 70639 µg/L. Cette corrélation temporelle et spatiale suggère une possible influence de ces activités sur la libération accrue de zinc. De plus, le lessivage des reliefs du Djurdjura et des Bibans qui bordent les deux rives de la vallée de la Soummam a également été identifié comme un mécanisme potentiel contribuant à la libération et la mobilisation du zinc dans l'environnement et en particulier dans le réseau hydrographique du bassin versant.

Par ailleurs, la région d'Akbou abrite plusieurs industries, notamment la zone industrielle de Taharacht qui s'étend sur environ 42,25 ha et est considérée comme un pôle industriel majeur dans la vallée. Les secteurs industriels du textile (TexALG), de l'agroalimentaire, ainsi que les eaux usées évaluées à 4,10<sup>6</sup> L par jour et les décharges publiques (30 à 50,10<sup>3</sup> T par jour) de la grande agglomération d'Akbou sont probablement des sources substantielles d'introduction de zinc dans les eaux (Bir et al., 2016; Kessasra, 2015).

Les pratiques agricoles telles que l'utilisation de fertilisants, de pesticides contenant du zinc peuvent entraîner une augmentation des concentrations de zinc dans le sol et les eaux

environnantes au site industriel étudié. Les domaines agricoles se trouvent principalement à l'amont du site, depuis Cheurfa, Tazmalt, Allaghane jusqu'aux abords du piton.

- **Cuivre**

Les concentrations de cuivre sont détectées à des niveaux relativement bas, affichant une moyenne de 15.8 µg/L. Les variations de ces concentrations sont étendues, oscillant entre 7.6 µg/L à Oued Sahel (S1) et 77.4 µg/L à Oued Soummam (S4) en septembre 2019, comme illustré de manière explicite dans la figure 45.

Par ailleurs, les teneurs en cuivre dans les eaux souterraines présentent une fourchette de 7.4 à 11.9 µg/L, avec une valeur maximale enregistrée en janvier 2021. Il convient de souligner que ces concentrations sont inférieures aux normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ainsi qu'aux normes réglementaires algériennes en vigueur, fixées à 2000 µg/L pour les eaux de surface et à 50 µg/L pour les eaux souterraines.

- **Cadmium**

Des concentrations notables de cadmium sont observées dans l'ensemble des stations de prélèvement des eaux de surface, atteignant une moyenne de 25.5 µg/L. La représentation graphique met en relief une variabilité, s'étendant de 19 µg/L à Oued Sahel à la station 1 en mai 2021 à 39.1 µg/L à Oued Soummam à la station 4 en septembre 2019 (Fig.45).

En ce qui concerne les concentrations de cadmium dans les eaux de forages, elles présentent une courte plage de variation allant de 20 à 22 µg/L, avec une valeur maximale enregistrée en mai 2021. Il convient de souligner que les teneurs en cadmium dans les eaux de surface et les eaux souterraines dépassent largement les normes établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), ainsi que les normes réglementaires algériennes en vigueur, fixées à 3 µg/L et 5 µg/L respectivement.

Dans notre site d'étude, la source potentielle de cadmium peut résulter de diverses activités anthropiques, l'émission de poussières, le rejet d'eaux usées, le trafic routier, ainsi que d'autres processus industriels. Ces facteurs contribuent à l'augmentation des niveaux de cadmium dans l'environnement local. Il convient également de ne pas négliger la contribution naturelle de cadmium, résultant de processus géologiques tels que le lessivage des formations géologiques susceptibles de contenir du cadmium.

#### **V.4. Effet saisonnier sur les teneurs en ETM dans le piton d'Akbou**

La variation saisonnière des concentrations en métaux lourds dans les eaux de surface met en évidence la dynamique complexe régissant ces composés. Au cours de la période d'étiage, une augmentation significative des concentrations de plomb, fer et cuivre est observée, phénomène qui pourrait être attribué à divers facteurs. La diminution du débit d'eau pendant cette période pourrait jouer un rôle prépondérant en restreignant la dilution des polluants, intensifiant ainsi leur présence dans le milieu aquatique.

A contrario, la période hivernale présente des diminutions notables de ces concentrations, à l'exception du zinc et du cadmium, dont le comportement distinct souligne la nécessité d'une analyse approfondie.

Ces observations soulignent l'influence complexe des conditions hydrologiques, climatiques et environnementales sur les cycles de concentration des éléments traces métalliques (ETM). Par conséquent, il est impératif de considérer ces facteurs interconnectés dans l'évaluation de la qualité de l'eau.



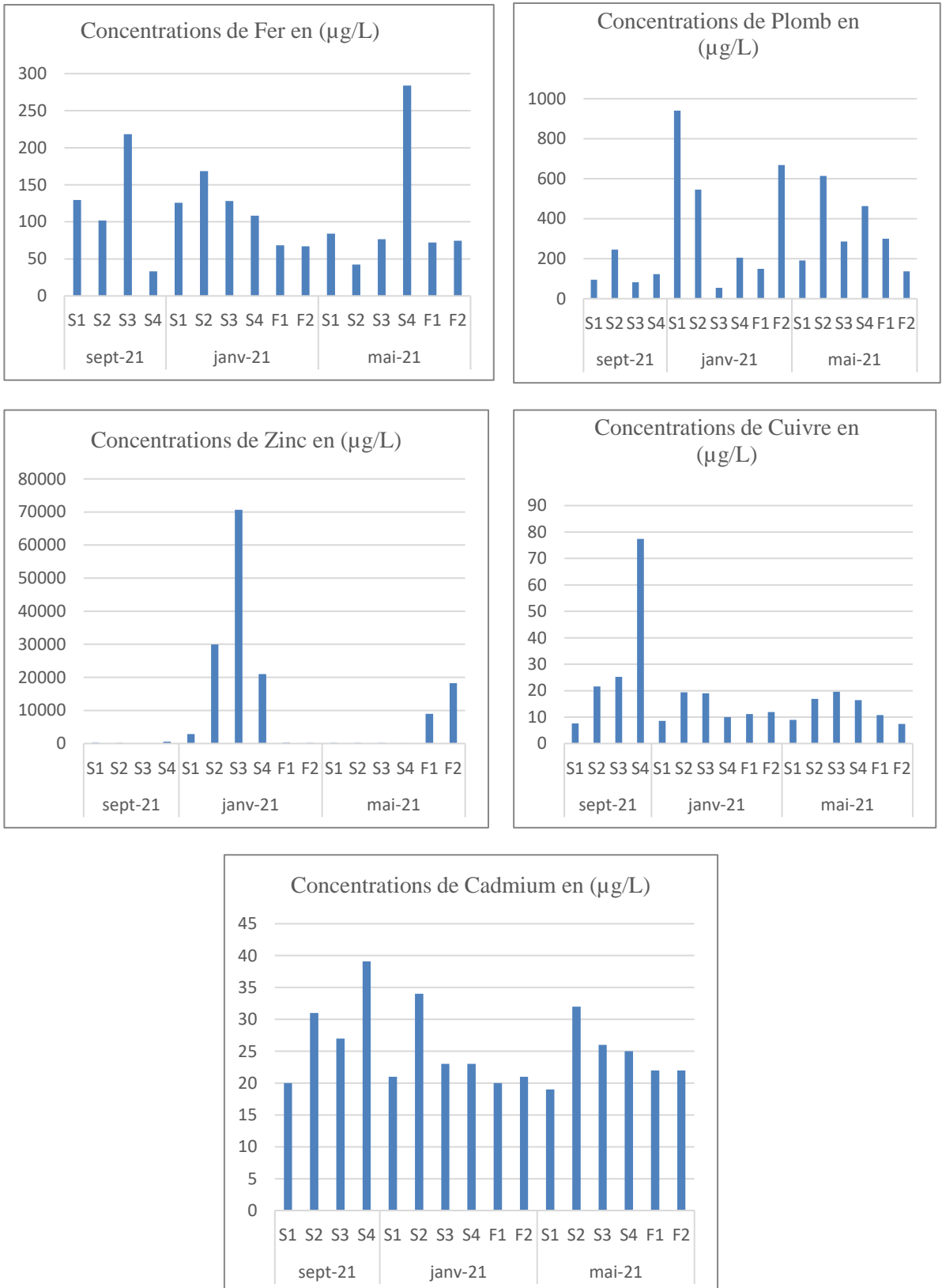


Figure 45: Teneurs en métaux lourds en ( $\mu\text{g/L}$ ) dans les eaux de surfaces et souterrains au niveau des carrières et l'industrie extractive au niveau du piton d'Akbou (Bejaïa)

## **V.5. Caractéristiques physicochimiques des sédiments**

Les résultats des analyses de pH, de conductivité électrique et La teneur totale en (CaCO<sub>3</sub>) sont consignés de manière exhaustive dans le tableau 10.

Les caractéristiques acido-basiques des sédiments se manifestent par un pH fondamentalement alcalin. En effet, au sein des quatre stations échantillonnées, les valeurs oscillent entre 7.1 et 7.37, présentant une moyenne de 7.22. La variabilité de la conductivité électrique de la solution sédimentaire s'étend de 528 à 1851 µS/cm, la valeur maximale étant enregistrée à la station 4 (S4). Les résultats de la teneur totale en (CaCO<sub>3</sub>) dans les sédiments sont consignés dans le tableau, démontrant une augmentation substantielle de la teneur en CaCO<sub>3</sub> de l'amont vers l'aval. Cette variation s'établit entre 23.41 et 66.90%, la valeur maximale étant observée à la station 2 (S 2).

### **V.5.1. Concentrations des ETM dans les sédiments**

Le tableau 10 présentant les concentrations en Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les sédiments révèle une tendance générale des concentrations d'ETM qui s'établit comme suit : Fe > Zn > Cu > Cd, avec des moyennes respectives de 10,242.5, 563.16, 15.85, et 3.04 ppm.

Les concentrations les plus élevées en Fe et C dont été enregistrées dans la station Sed 4, localisée en aval du piton d'akbou. En ce qui concerne le Zn, le Cu, des concentrations significatives ont été relevées dans S3, située à proximité des carrières d'Akbou et de la zone de l'industrie extractive. En revanche, la rétention la moins élevée de la plupart des métaux étudiés a été constatée dans la station S 2, positionnée au niveau de la rivière Boussellam. Il est à noter que les moyennes des concentrations de zinc, cuivre et cadmium dans les sédiments prélevés excèdent largement les valeurs de référence citées par Reimman et Caritat en 1998, suggérant une accumulation significative de ces métaux dans le lit sédimentaire.

Ces résultats soulignent l'importance de surveiller de près et d'une manière régulière les niveaux de contamination des sédiments fluviaux car elles peuvent être le siège de plusieurs processus hydrogéochimiques qui contribueraient encore à contaminer les eaux de surface et les eaux souterraines. Cependant, il est d'intérêt commun d'adopter des mesures de gestion environnementale appropriées aux sites industriels afin de préserver la qualité de l'écosystème aquatique.

## **V.6. Caractéristiques physicochimiques des sols**

Les quatre échantillons de sol prélevés dans les environs du piton exhibent un pH s'établissant dans la plage de neutre à alcalin, avec des valeurs oscillantes entre 7,79 et 8,59. En effet, le

maximum étant enregistré en aval à la station S4. La conductivité électrique de la solution de sol recueillie présente une variation allant de  $146 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à la station S1 à  $904 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à la station S2. En ce qui concerne la teneur totale en calcaire du sol, elle fluctue entre 23,21 % et 28,22 %, la valeur maximale étant enregistrée à la station S3, au niveau de la station de traitement (tableau10).

#### **V.6.1 Les concentrations des ETM dans le sol**

Les concentrations des Éléments Traces Métalliques (ETM) dans le sol sont présentées de manière exhaustive dans le tableau 9.

La tendance générale des concentrations peut être établie comme suit :  $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ , avec des moyennes respectives de  $9541.25 > 538.06 > 114.22 > 28.64 > 4.41$  ppm.

Les concentrations de fer dans le sol présentent une variabilité significative, s'étendant de 4120 à 21500 ppm. Les concentrations de zinc dans le sol exhibent une plage de variation allant de 214 à 790 ppm, avec un pic enregistré à la station 3. Le plomb affiche des valeurs substantielles fluctuant entre 90.35 et 140.9 ppm, la concentration maximale étant enregistrée à la station S4. Les concentrations de cuivre varient entre 16.9 et 37.8 ppm, avec la valeur maximale enregistrée à la station S2. Les concentrations de cadmium sont très proches, oscillant entre 4 et 4.9 ppm. Il est important de souligner que les moyennes des concentrations de zinc, plomb, cuivre et cadmium dans les sols collectés aux environs du piton d'Akbou surpassent les valeurs de référence citées par Reimman et Caritat en 1998.

Tableau 9 : Paramètres physicochimiques et concentrations des ETM dans les sédiments et les sols.

|                                   | Sédiments |        |        |        |         | Sols   |       |       |       |         |
|-----------------------------------|-----------|--------|--------|--------|---------|--------|-------|-------|-------|---------|
|                                   | S1        | S 2    | S 3    | S 4    | Moyenne | S1     | S2    | S3    | S4    | Moyenne |
| pH                                | 7.1       | 7.16   | 7.37   | 7.23   | 7.215   | 7.79   | 7.84  | 7.92  | 8.59  | 8.03    |
| EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 528       | 1681   | 1120   | 1851   | 1295    | 146    | 904   | 186   | 199   | 358.75  |
| CaCO <sub>3</sub> %               | 23.41     | 66.90  | 33.87  | 36.17  | 40.08   | 26.55  | 28.22 | 23.21 | 25.30 | 25.81   |
| Fe(ppm)                           | 11440     | 3625   | 9690   | 16215  | 10242.5 | 21500  | 7995  | 4550  | 4120  | 9541.25 |
| Pb (ppm)                          | /         | /      | /      | /      | /       | 108.25 | 117.4 | 90.35 | 140.9 | 114.22  |
| Zn (ppm)                          | 655       | 582.57 | 792.85 | 222.22 | 563.16  | 214.25 | 453.5 | 790   | 694.5 | 538.06  |
| Cu (ppm)                          | 14.89     | 13.382 | 19.07  | 16.08  | 15.85   | 31.5   | 37.8  | 28.25 | 16.9  | 28.61   |
| Cd (ppm)                          | 6.64      | 1.96   | 1.74   | 1.83   | 3.04    | 4.9    | 4.35  | 4     | 4.4   | 4.41    |

## V.7. Evaluation du degré de contamination des sédiments par les ETM

### V.7.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo)

Les valeurs de l'indice I-Géo calculées pour les ETM étudiés sont consignées dans la figure 46. La tendance de l'indice I-Géo dans les sédiments des oueds Sahel, Boussellam et Soummam est établie comme suit :  $Cd > Zn > Cu > Fe$ .

Ainsi, les valeurs de I-Géo montrent que les quatre échantillons de sédiment sont non contaminés par le fer et le cuivre ( $I\text{-Géo} < 0$ ), modérément à sévèrement contaminés par le zinc ( $2 < I\text{-Géo} < 4$ ). Quant au Cd, ses valeurs d'I-géo indiquent que nos sédiments fluviaux sont extrêmement contaminés ( $4 < I\text{-Géo}$ ).

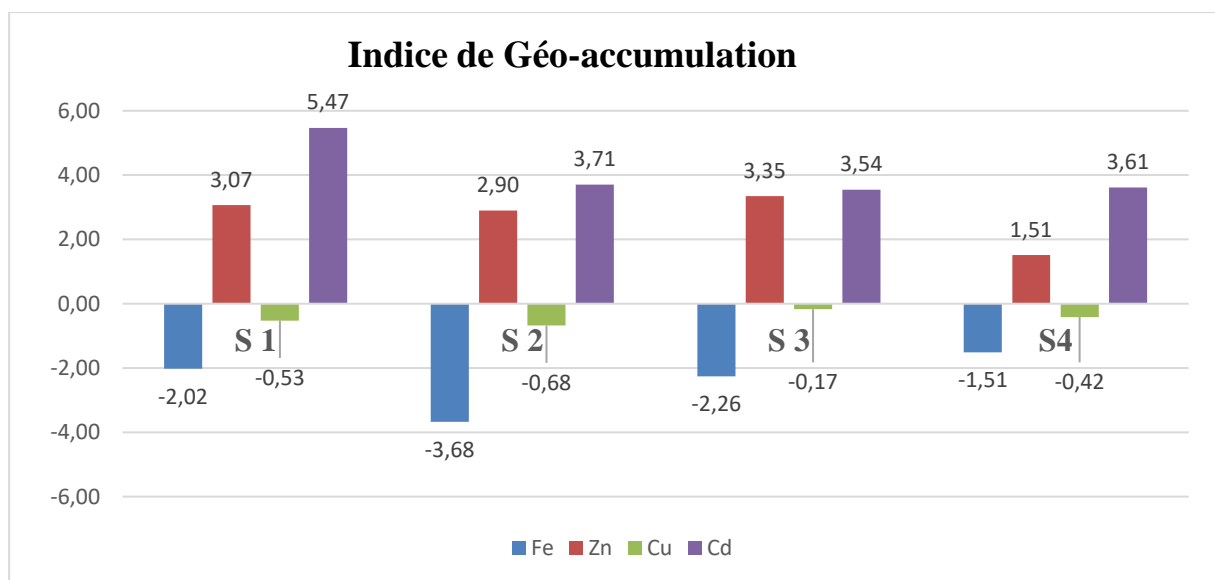


Figure 46 : Variation de l'indice de géo accumulation dans les sédiments.

### V.7.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI)

Les valeurs de IP des métaux dans les sédiments des stations sont représentées par la figure 47. Les échantillons des sédiments sont faiblement contaminés par le fer, indiqués par des valeurs de l'indice de pollution ( $IP \leq 1$ ), modérément contaminés en cuivre ( $1 < IP \leq 3$ ), et fortement contaminés en zinc et cadmium ( $IP > 3$ ).

La valeur moyenne IPI des quatre ETM dans les sédiments est de 8.69 ; elles sont fortement contaminées.

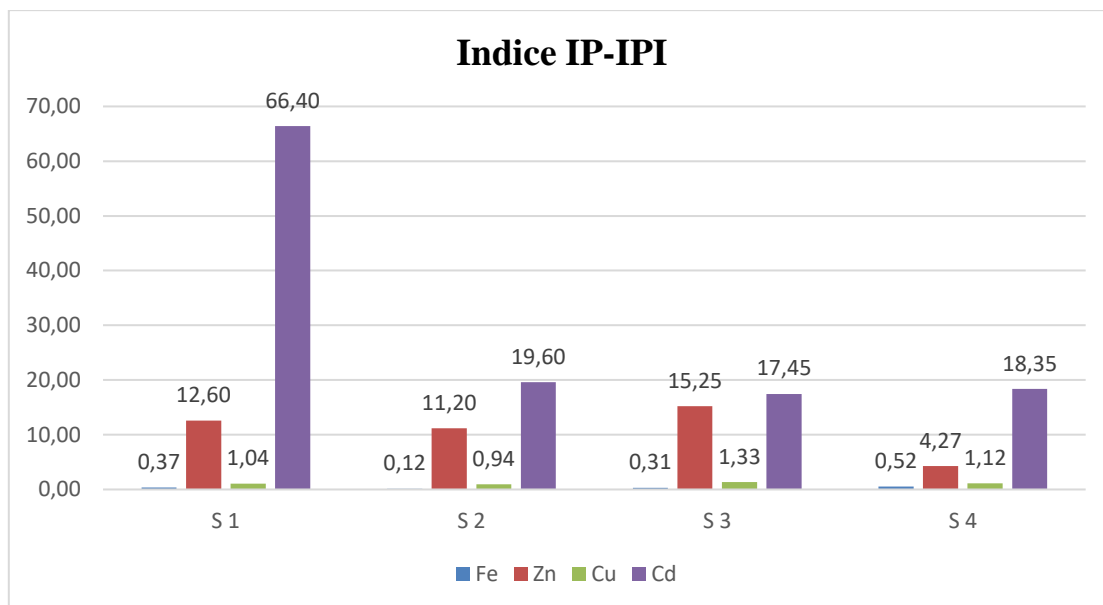


Figure 47 : Variation de l'indice de pollution dans les sédiments.

### V.7.3. L'indice de risque potentiel (RI)

Les valeurs de risque écologique des ETM des sédiments sont consignées sur la figure 48.

Les valeurs moyennes du coefficient de risque potentiel (RI) des teneurs en métaux dans les sédiments ont été classées dans l'ordre décroissant suivant : Cd > Zn > Cu. Le Cd présente un niveau de risque écologique extrêmement élevé (3654), Le Zn et le Cu dans les sédiments des oueds présentent un faible risque écologique.

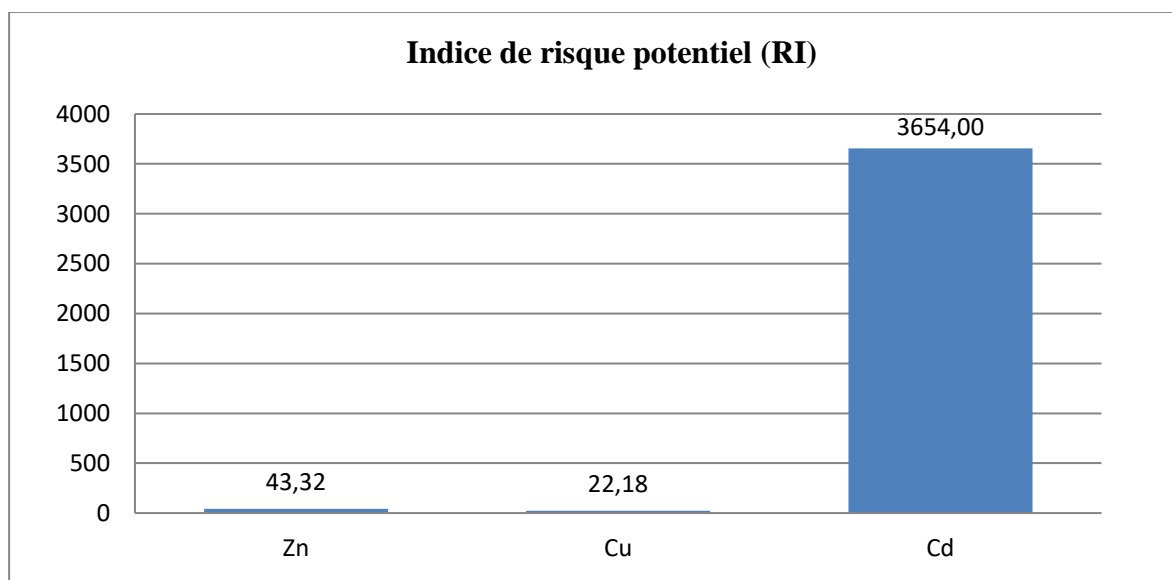


Figure 48 : Variation de l'indice de risque potentiel (RI) dans les sédiments.

## V.8. Evaluation du degré de contamination des sols par les ETM

### V.8.1. L'indice de Géo-accumulation (I-géo)

Les valeurs de l'indice I-Géo calculées pour les éléments traces métalliques (ETM) étudiés sont présentées dans la figure 49. On observe une tendance décroissante dans les échantillons de sols au voisinage de piton d'akbou comme suit :  $Cd > Zn > Pb > Cu > Fe$ . Les valeurs de I-Géo montrent que les quatre échantillons de sol sont non contaminés par le fer ( $I\text{-Géo} < 0$ ), modérément contaminés par le cuivre ( $0 < I\text{-Geo} \leq 1$ ) ; à l'exception de S4 qui est non contaminé, modérément à sévèrement contaminés par le plomb et le zinc ( $2 < I\text{-Geo} \leq 3$ ). Les valeurs de l'indice I-Géo pour le cadmium montrent une contamination sévère à extrême ( $I\text{-géo} > 4$ ).

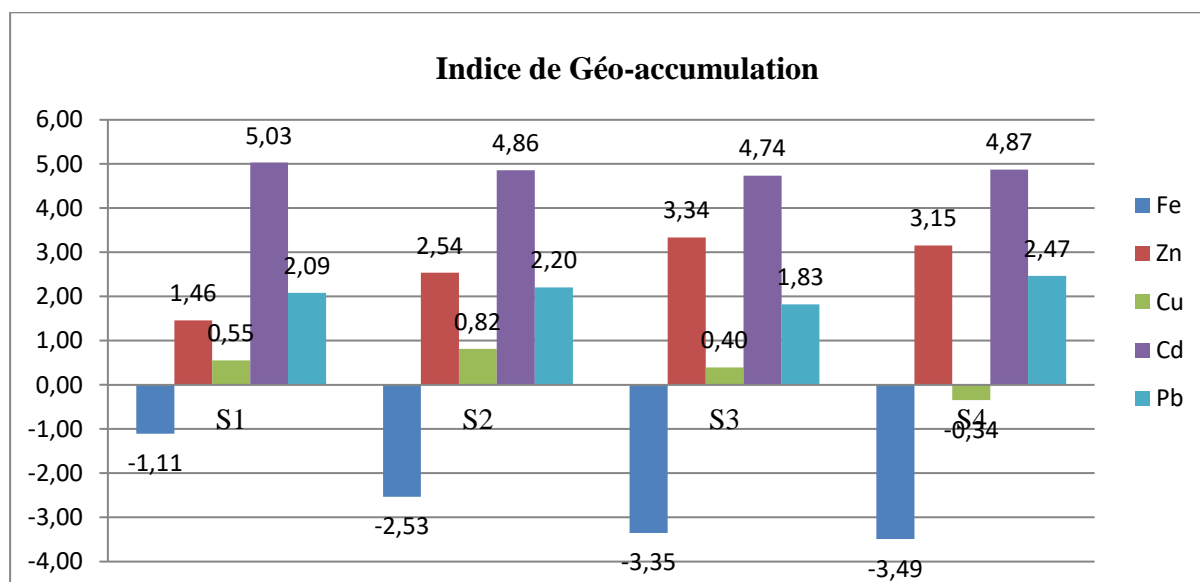


Figure 49 : Variation de l'indice de géo accumulation dans le sol.

### V.8.2. L'indice de pollution et l'indice de pollution intégré (IP-IPI)

D'après la figure 50, les quatre stations présentent une faible contamination en fer, indiquée par des valeurs de l'indice de pollution ( $IP \leq 1$ ). En revanche, elles sont modérément contaminées en cuivre ( $1 < IP \leq 3$ ) et fortement contaminées en plomb, zinc et en cadmium ( $IP > 3$ ).

La valeur moyenne de l'indice de pollution IPI pour les quatre métaux traces dans les sols est de 11,03, ce qui indique une forte contamination.

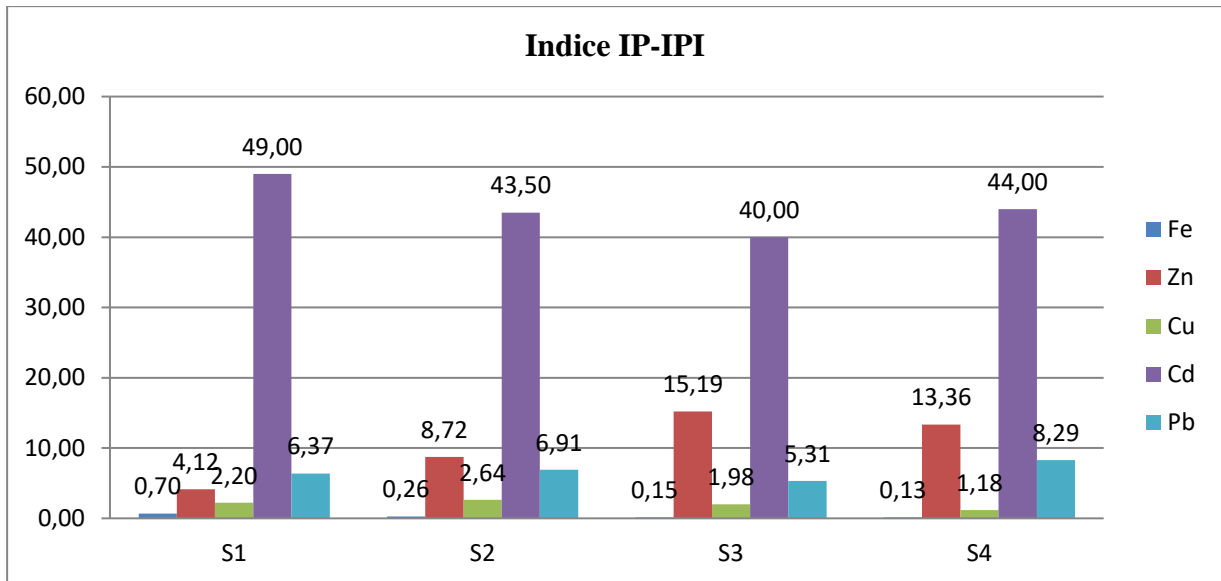


Figure 50 : Variation de l'indice de pollution dans le sol.

### V.8.3. L'indice de risque potentiel (RI)

Les valeurs de risque écologique des ETM dans le sol sont consignées sur la figure 51. Les résultats de l'indice de risque écologique potentiel pour chaque élément ( $E_i$ ) ainsi que l'indice de risque potentiel (RI) ont été calculés. Selon les moyennes du coefficient de risque potentiel (RI) des concentrations de métaux dans le sol, la classification est la suivante :  $Cd > Pb > Zn > Cu$ . Le cadmium et le plomb présentent des niveaux de risque écologique extrêmement élevés, tandis que le zinc et le cuivre dans le sol présentent un risque écologique faible.

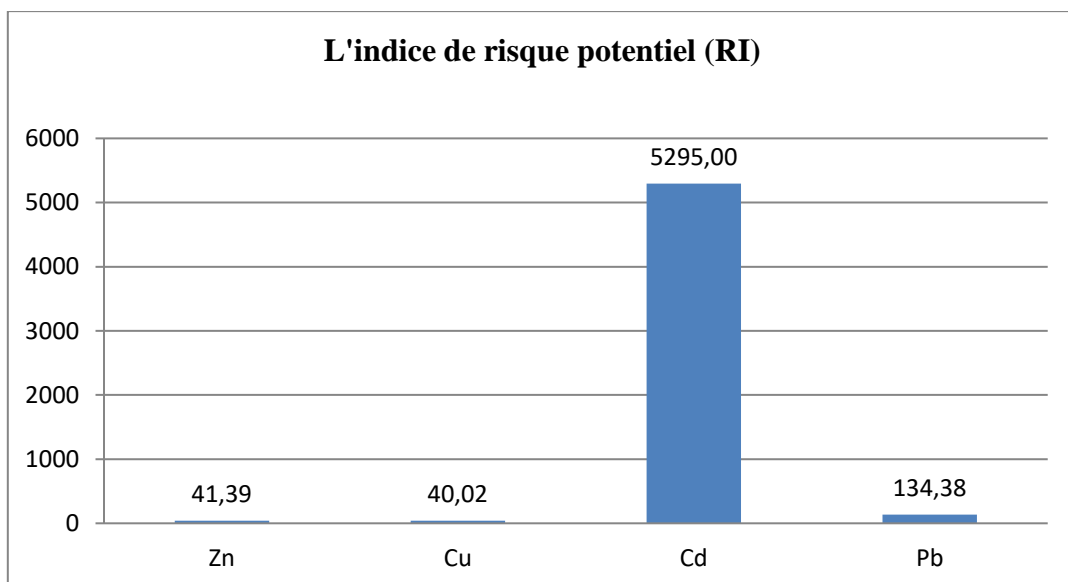


Figure 51 : Variation de l'indice de risque potentiel (RI) dans le sol.

D'après une comparaison des résultats obtenus à partir de trois indices de pollution différents, à savoir l'indice I-géo, le IP-IPI et le RI, on peut constater que les valeurs de l'indice I-géo



offrent une représentation plus précise des niveaux de contamination par rapport aux autres indices.

### **V.9. Identification de l'origine des ETM et évaluation globale de l'impact**

La vallée de la Soummam constitue un environnement fortement influencé par des activités humaines (Fig.52). Ces dernières engendrant une superposition suffisamment complexe de facteurs anthropiques et géogéniques qui contribuent à sa pollution et à sa dégradation. Il en sera compliqué d'isoler chaque source de pollution et évaluer l'impact des industries extractives au niveau du piton d'Akbou.

Bien que les opérations d'exploitation et d'abattage par explosifs aient cessées au niveau du piton, le traitement des granulats persiste au sein des stations situées au pied du piton d'Akbou. Ces industries extractives, comprenant les sablières, les gravières et les cimenteries, engendrent des impacts environnementaux notoirement réputés néfastes (Fig.53.A.B).

Parmi les observations notables dans la vallée de la Soummam, on note la modification et la chenalisation des cours d'eau (Fig.53.C). De plus, des conséquences telles que la réduction des surfaces cultivables et la modification du profil du sol sont observées. Des émissions de poussières minérales sédimentables, de gaz d'échappement et de polluants dans l'atmosphère ont été identifiées, contribuant à la pollution atmosphérique. Enfin, la présence de bruit généré par les machines et les vibrations, provoque une nuisance sonore (Kessasra,2015).

D'autre part, ces activités extractives et les opérations connexes ont le potentiel d'aggraver les concentrations minérales dans les matrices de l'eau et du sol. Le processus de lessivage des roches extraites, les activités de creusement, les processus d'érosion des versants des berges fluviales, ainsi que l'émission de poussières contribuent à la libération d'ions d'Éléments Traces Métalliques (ETM), modifiant ainsi le chimisme de l'eau par l'altération des concentrations de certains minéraux dans l'environnement (Fig.53.D.E.F).

Il est plausible de soutenir que les niveaux élevés de métaux lourds sont imputables aux rejets de déchets anthropogéniques dans l'eau, ainsi qu'aux dépôts de poussière et à la lixiviation provenant des batteries et du transport routier.

En sus de l'industrie extractive, la région d'Akbou présente d'autres sources de pollution anthropique en particulier au voisinage de la zone d'activités industrielles de Taharacht (Fig.53.B). Elle abrite une multitude de filières industrielles telles que les industries agroalimentaires, les huileries, les tanneries, les industries chimiques, l'industrie du plastique, l'industrie du textile. Bien que certaines usines sont équipées de stations d'épuration des eaux

usées, elles demeurent non opérationnelles et par conséquent les déversements dans l'oued Soummam sont de plus en plus visibles lors de nos campagnes de terrain (Fig.52).

Ajoutons à cela, l'important flux d'eaux usées d'origine urbaine et cela en l'absence d'une station d'épuration des eaux usées à Akbou. Il faut admettre que les décharges publiques et sauvages en sont également responsables, le lixiviat provenant de ces décharges sont hautement concentrées en Métaux lourds surtout.

En dernier lieu, malgré ce contexte industriel dominant, les pratiques agricoles dans la région demeurent pourvoyeuses de multiples contaminants de nature à dégrader l'eau et le sol. Cette dernière génère des effluents à forte charge polluante, contribuant ainsi de manière substantielle à la dégradation de l'environnement.

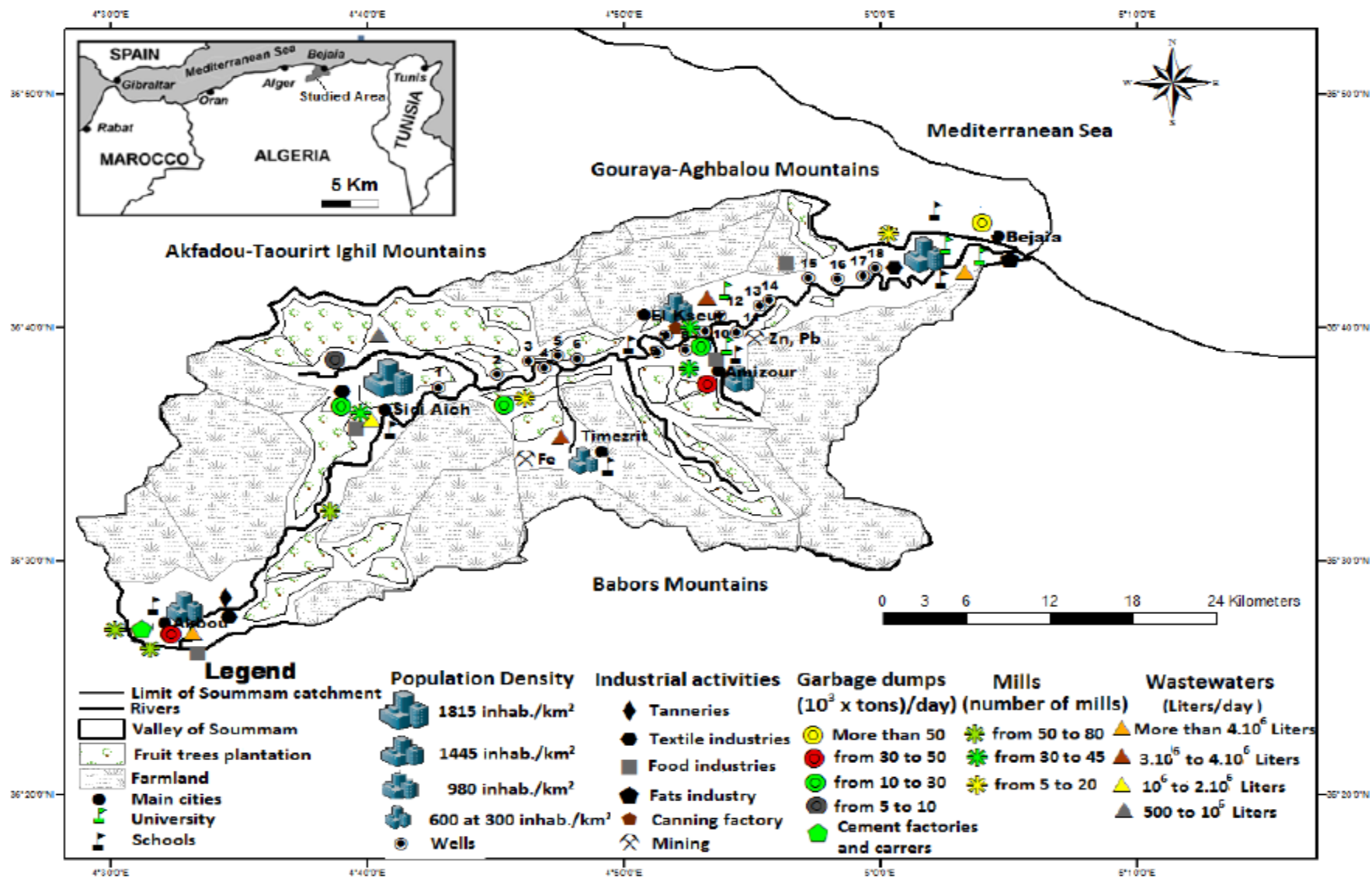


Figure 52 : Localisation des activités anthropiques de la vallée de la soummam (Benhamiche et al. ;2016)



Figure 53: Prises de vue des différents sites au voisinage du piton d'Akbou considérés dans cette étude : (A) station de concassage, (B) deux types d'industrie (extractive et alimentaire) au pied du piton, (C) chenalisation de la Soummam suite à l'exploitation des sables et gravier à Akbou, (D) le lit de l'oued Soummam se rétrécit en raison du dépôt aléatoire des tas de gravier, (E) et (F) l'extraction des matériaux gravières contribue à la dégradation de notre l'environnement.

## **V.10. Conclusion**

Les concentrations préoccupantes en métaux lourds dans l'environnement local du piton d'Akbou résultent de la combinaison de deux facteurs de pollution : un facteur naturel, lié au lessivage des formations géologiques par les conditions météorologiques, et un facteur anthropique, découlant de trois types de pollutions distinctes : La pollution d'origine industrielle extractive et minière, engendrée par l'exploitation et le traitement des roches dans les carrières, les cimenteries, les sablières, les gravières, entre autres. Elles résultent également des activités des zones et des unités industrielles qui génèrent divers déchets solides, liquides et gazeux.

La pollution domestique, émanant des eaux usées domestiques et des décharges non contrôlées et une pollution agricole due à l'utilisation d'intrants chimiques.

***Chapitre VI :***  
***Plan d'atténuation des***  
***impacts***

## **Chapitre VI : Plan d'atténuation des impacts**

### **VI.1. Introduction**

En Algérie, la Loi n° 14-05 du 24 Rabie Ethani 1435 correspondant au 24 février 2014 portant loi minière (Journal Officiel de la République Algérienne, n°18) réglemente l'activité et l'exploitation minières en imposant des normes adéquates pour garantir l'hygiène, la sécurité et la préservation de l'environnement. Les ingénieurs de la police des mines sont chargés de superviser le respect de ces normes et préparent des mesures de prévention des risques miniers. En cas de menace pour la sécurité publique ou l'environnement, le premier responsable de l'autorité publique locale (le wali) peut prendre des mesures conservatoires en collaboration avec l'agence nationale des activités minières. De plus, au terme du permis minier, le titulaire doit entreprendre, à ses frais, les travaux de restauration et de préservation exigés par les autorités compétentes, sous peine de sanctions. L'abandon d'installations minières sans autorisation préalable est strictement prohibé. Ces dispositions visent à garantir une exploitation minière responsable et respectueuse de l'environnement et de la sécurité publique.(Journal Officiel De La République Algérienne, 2014)

### **VI.2. Mesures d'atténuation pour la protection des ressources en eau**

La Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau (Journal Officiel de la République Algérienne, n°50) établit un cadre juridique pour la protection des ressources en eau en définissant des mesures de précaution visant à prévenir la pollution des écosystèmes aquatiques et de leurs ressources en eau. Elle institue d'abord un périmètre de protection rapprochée (PPR) où les activités potentiellement polluantes, telles que les dépôts, les installations industrielles ou agricoles, sont strictement réglementées voire interdites afin de réduire les risques de contamination des eaux, que ce soit de manière chronique ou accidentelle. Il faut rappeler qu'un périmètre de protection des eaux souterraines sert à protéger les eaux souterraines sur une certaine surface contre les pollutions ponctuelles en éloignant les sources potentielles de ces pollutions des points de captage. Ils s'avèrent insuffisants vis-à-vis des pollutions diffuses. Il est interdit d'y construire ou d'y procéder à des aménagements susceptibles de compromettre l'exploitation des eaux souterraines ou l'alimentation en eau potable. Il en existe trois types à savoir les périmètres de protection immédiate (PPI), les périmètres de protection rapprochée (PPR) et les périmètres de protection éloignée (PPE).



Au sein de ces périmètres de protection qualitative de classe PPR, toutes les activités, qu'elles soient agricoles ou industrielles, peuvent être soumises à des réglementations spécifiques ou même être interdites. Cette réglementation concerne notamment l'extraction de matériaux du sous-sol telle que les carrières qui modifie les conditions d'infiltration des précipitations, l'installation de canalisations d'eaux usées, de réservoirs et dépôts d'hydrocarbures, de stations-service, de centrales d'asphalte, ainsi que la construction d'infrastructures industrielles ou le dépôt de déchets. La réglementation prévoit donc la mise en place d'un périmètre de protection rapprochée qui a pour objectif d'empêcher :

- l'arrivée au captage d'eau souterraine de polluants en fortes concentrations, de liquides pouvant polluer les eaux (essence et dérivés); de germes et de virus pathogènes ;

- la pollution des eaux souterraines par suite de l'exécution de fouilles ou de travaux, ainsi que l'affaiblissement de la capacité de filtration naturelle du sol et du sous-sol ;

- la création de barrages souterrains modifiant les écoulements d'eau souterraine.

En outre, des mesures de contrôle particulières peuvent être mises en place pour surveiller et restreindre des activités susceptibles d'altérer la qualité de l'eau, telles que l'épandage d'effluents ou l'utilisation de produits chimiques agricoles. Même l'installation et l'exploitation de carrières sont soumises à des règles strictes dans le but de protéger les ressources en eau (Journal Officiel De La République Algérienne, 2005).

Il faut signaler que sur les deux sites industriels étudiés dans cette thèse, plusieurs champs captant sont exploités à leur aval. On citera les champs captants de la plaine d'oued Nil au niveau de la ferme ex. Bachelot près de Taher et en bas du village de Béni Metrane captant la nappe alluvionnaire composée de graviers, de sables et d'intercalations argileuses sur 40 m d'épaisseur, et les champs captants de la vallée de la Soummam principalement à Akbou, Biziou et Ouzellaguène captant la nappe alluviale sur d'environ 80 m d'épaisseur. Ces forages en activité sont destinés à l'alimentation en eau potable principalement et à l'irrigation en second lieu. Les risques de contamination des oueds et des nappes aquifères qui leur sont associées sont éminemment importants.

Pour prévenir toute contamination des eaux de surface et afin d'atténuer les impacts sur les ressources en eau au niveau des carrières d'El M'cif à Chekfa et du piton d'Akbou, plusieurs mesures sont recommandées. Les entreprises minières doivent mettre en place plusieurs mesures préventives conformément à la loi minière algérienne. Tout d'abord, l'exploitant devrait installer un équipement de débouillage et de déshuilage au sein de la station de lavage.



Ce dispositif fonctionne sur le principe de la décantation, permettant ainsi de purifier les eaux de lavage chargées en boue et en huile. Cette approche favorise le recyclage des eaux, réduisant ainsi la consommation globale et minimisant les rejets polluants dans l'environnement.

De plus, il est essentiel d'éliminer les risques de stagnation des eaux pluviales en favorisant la mise en place de réseaux de drainage naturels. Ces derniers facilitent l'écoulement adéquat des eaux de pluie, réduisant ainsi les risques d'inondations et de pollution associés (Fig .54). Cette démarche contribue également à préserver la qualité des eaux souterraines en limitant les infiltrations de contaminants provenant des eaux de surface. Sur le site de la carrière d'El M'cif, aucune installation n'est présente d'après nos observations de terrain.

En ce qui concerne la préservation des eaux souterraines, il est recommandé d'éviter les excavations profondes où les eaux de surface pourraient stagner, ainsi que l'épandage des eaux boueuses dans ces excavations. Les entreprises doivent également intégrer des unités de clarification des eaux dans les carrières, comprenant des cuves de récupération des eaux et des filtres presses pour la récupération des boues isolées des eaux de lavage (Arfaoui, 2009;Darkaoui, 2019) . Aucune de ces installations ne sont présentes sur les deux sites miniers.



Figure 54 : Installation des caniveaux dans un site minier (le secteur minier fer de lance du Katanga, la république démocratique du Congo) (source : [RDC: Le secteur minier, fer de lance du Katanga – Africotelegraph – Toute l'actualité africaine](#))

En outre, les exploitants doivent d'abord instaurer des pratiques visant à limiter les émissions de poussières et leur dispersion hors du site d'extraction et de traitement des matériaux. Cela

comprend l'entretien des routes d'accès, l'utilisation de sauterelles pour contrôler les émissions de poussières pendant les périodes venteuses, le stockage des granulats près des unités de concassage pour agir comme un écran contre les vents, la plantation d'arbres autour des sites de concassage, le bâchage des camions de transport, et l'arrêt des activités en cas de vents forts. De plus, il est essentiel de mettre en place un système efficace de collecte et d'évacuation des déchets produits par l'exploitation de la carrière, notamment pour les déchets métalliques, les huiles, les hydrocarbures et les déchets domestiques, afin de préserver la qualité des eaux souterraines et de surface en évitant toute contamination par infiltration.

### **VI.3. Mesures d'atténuation des impacts sur le sol**

Tout d'abord, il est essentiel d'éliminer les déchets existants par des moyens appropriés tels que l'achat du granulat et autres produits par des acquéreurs et clients agréés, l'utilisation de décharges agréées ou l'incinération. Ensuite, il est recommandé de mettre en place un plan de reboisement pour prévenir l'érosion du sol et maintenir sa fertilité. Bien que le site d'El M'cif soit situé dans une région naturellement boisée, il est important de reboiser les zones environnantes des carrières exploitées. Ce reboisement contribuera à restaurer l'écosystème local, à fournir une protection supplémentaire contre l'érosion, et à favoriser la régénération naturelle de la végétation(Fig .55) .

De plus, il est crucial de ne pas rejeter les déchets non biodégradables tels que les batteries, les vitres, les emballages métalliques, bouteilles et sacs en plastiques, qui pourraient entraver le recyclage de la matière organique, mais plutôt de les collecter et de les traiter de manière adéquate.

La gestion rationnelle des espaces forestiers est également nécessaire pour réduire les dommages aux écosystèmes et à la biodiversité. En ce qui concerne les terres végétales et stériles issues de l'exploitation, elles doivent être stockées sur des parcelles non exploitables et protégées contre l'érosion pour être réutilisées ultérieurement. Enfin, il est impératif de mettre en place des mesures pour réduire les émissions de poussières, éviter la contamination par les déchets liquides et les huiles, gérer efficacement les espaces de la carrière, et réhabiliter les terrains libérés de l'exploitation pour les rendre fertiles(Arfaoui, 2009;Darkaoui, 2019).



Figure 55 : La nécessité de reboisement pour restaurer les écosystèmes dégradés, de la carrière d'El M'cif à Chekfa.

#### **VI.4. Mesures d'atténuation de la pollution de l'air**

Pour atténuer la pollution de l'air causée par les émissions de poussières lors des opérations de traitement des matériaux, plusieurs mesures doivent être mises en place. Les exploitants doivent installer des installations équipées de systèmes de dépoussiérage pour maintenir les rejets de poussières en dessous de  $30 \text{ mg/m}^3$ , conformément aux normes établies. Des techniques telles que l'arrosage des voies de circulation et l'utilisation de micro-brouillard peuvent être utilisées pour réduire les émissions de poussières lors du passage des engins et camions. Il est également important de limiter la vitesse des camions le long des routes pour minimiser les émissions de poussières et de bruit, et de s'assurer que les camions sont correctement chargés et recouverts pendant le transport. En outre, un entretien régulier du matériel d'exploitation et un arrosage des stocks de matériaux et des stériles par temps venteux sont également recommandés pour réduire les émissions de poussières (Aliouche, 2008; Arfaoui, 2009; Darkaoui, 2019;).

## **VI.5. Le réaménagement et la réhabilitation des carrières et mines à ciel ouvert**

Le réaménagement et la réhabilitation des carrières et mines à ciel ouvert sont essentiels pour atténuer les impacts environnementaux de l'industrie minière.

Ces procédés ont pour objectif de ramener les sites miniers à leur état naturel ou à un état qui encourage une utilisation future positive, tout en limitant les impacts négatifs sur l'écosystème local. Le réaménagement implique souvent la restauration des sols, la réhabilitation des paysages et la création d'habitats pour la faune et la flore locales.

### **VI.5.1. La réhabilitation intégrée et systématique**

En présence d'une dégradation avancée, divers stress physiques, chimiques et biologiques entravent la régénération naturelle des forêts à un rythme compatible avec les besoins humains. Ainsi, il est impératif de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie de la mine dès le début de l'exploitation afin d'incorporer progressivement la remise en état et de préserver la qualité du sol. À titre d'exemple, la carrière de sable et de gravier Lone Star, située à Washington, adopte une approche novatrice en réhabilitant les zones exploitées au fur et à mesure de l'extraction. Cette méthode, intégrant la préparation, l'extraction et la réhabilitation, permet de réduire considérablement la manipulation de matériaux. En conséquence, elle favorise un rétablissement plus rapide de la biomasse et de l'activité microbiennes par rapport aux pratiques de stockage du sol (Le Roux, 2002; The department for the environment, 1996).

### **VI.5.2 L'utilisation du sol de couverture**

Dans de nombreux cas, restaurer la productivité du sol de surface est considéré comme la meilleure approche (Barnhisel & Hower, 1997). Cependant, le coût associé à l'importation de sol de couverture peut être prohibitif. Cette méthode est fréquemment utilisée pour végétaliser des substrats extrêmement toxiques, fortement acides ou basiques, qui sont inhospitaliers à toute vie végétale. En Nouvelle-Calédonie, plusieurs sites dénudés ont été recouverts avec de la terre fertile, principalement du sol d'alluvions.

Néanmoins, cette technique ne garantit pas toujours la stabilisation du sol car les racines ont tendance à se limiter à la couche superficielle. Dans certains contextes, comme celui des terrils de schiste houiller à Saint-Étienne (France), la végétalisation peut être effectuée sans l'ajout de terre végétale, afin de décourager la croissance de mauvaises herbes et de réduire les coûts. Dans ces cas, les déblais peuvent même être préférés au sol de couverture, surtout s'il a été entreposé pendant une période prolongée, ce qui pourrait entraîner une perte de sa microflore



et de sa microfaune, un lessivage des nutriments et une propension à devenir un terreau favorable aux mauvaises herbes(Le Roux, 2002).

### **VI.5.3. Une alternative au sol de couverture**

Cette approche implique l'utilisation d'espèces végétales capables de fixer l'azote directement sur le substrat brut(Moiroud et al., 1991). Des études de revégétalisation menées à la mine de Porto Trombetas (Brésil) ont démontré que les légumineuses nodulées, présentaient une croissance plus rapide que les légumineuses non nodulées. Dans ce contexte, il est recommandé d'utiliser des espèces d'arbres nodulées et mycorhizées, car les plantes mycorhizées, en raison de leur croissance améliorée et de leur capacité à exploiter les minéraux du sol, offrent une meilleure protection contre l'érosion. Cette approche favorise également une augmentation du taux de survie des plantes et facilite la succession écologique(Le Roux, 2002).

En d'autres endroits du monde, comme en Inde (Rajasthan), les champignons mycorhiziens sont considérés comme essentiels pour restaurer les sites dégradés(Rao & Tarafdar, 1998). En Floride, une préinoculation endomycorhizienne s'est avérée cruciale pour établir un écosystème forestier sur des mines de phosphate. De même, à la mine d'uranium Ranger en Australie, les problèmes d'établissement de certains eucalyptus ont été partiellement résolus grâce à leur mycorhization et à l'utilisation de litière d'eucalyptus.

### **VI.5.4. La décompaction du substrat**

Le substrat compacté des mines présente un déficit en réseau macroporeux, nécessaire pour favoriser la circulation de l'eau, l'aération du sol et le développement des racines. Dans de telles situations, il est préférable de repositionner les déblais en veillant à éviter la compaction initiale, plutôt que de tenter de corriger ce problème par la suite. Cependant, lorsque la compaction est inévitable, il est essentiel de la soulager. Un labourage profond, dépassant les 45 cm, favorisera la pénétration des racines, l'infiltration de l'eau et contribuera à prévenir l'érosion (Barnhisel&Hower, 1997 ; le roux, 2002; The department for the environment, 1996).

### **VI.5.5. L'amendement et la fertilisation**

En l'absence de sol de couverture, une option pour améliorer le substrat est d'épandre des boues provenant des stations d'épuration, ce qui peut favoriser l'établissement de la végétation en ajustant le pH du sol et en fournissant du carbone et de l'azote. Les déblais miniers sont souvent déficients en azote et en micro-organismes nécessaires pour sa conversion en une forme assimilable par les plantes. En plus de l'épandage de boues, l'utilisation de fertilisants et d'agents neutralisants est courante. Par exemple, sur certains sites comme Sudbury (Ontario) et Eneabba

(Australie), l'établissement de la végétation a été stimulé par l'application d'engrais et d'amendements. L'utilisation de légumineuses peut réduire la nécessité d'appliquer des fertilisants, car les bactéries fixatrices d'azote associées favorisent la croissance des plantes sur les sols dépourvus de matière organique. Dans d'autres régions, comme les mines de gypse du Rajasthan en Inde, la sélection d'arbres spécifiques est importante pour restaurer les cycles nutritifs sans recours à des amendements. En France, l'inoculation de plantes spécifiques a également amélioré considérablement le taux de survie des végétaux sur certains sites miniers (Barnhisel & Hower, 1997; le roux, 2002; Moiroud et al., 1991; Rao & Tarafdar, 1998; Sopper & Seaker, 1986; The department for the environment, 1996).

#### **VI.5.6. L'adapté de toxicité**

En réponse au grave problème de la phytotoxicité des sites miniers en Nouvelle-Calédonie, l'utilisation de plantes pionnières telles qu'*Acacia spirorbis* et *Casuarina collina*, qui sont indigènes et possèdent une grande résistance aux conditions de sol défavorables, est intégrée à la stratégie de revégétalisations. En Nouvelle-Calédonie, certaines plantes telles que des hyper accumulateurs de nickel, avec des concentrations en nickel dans leur masse sèche variant de 0,1 à 0,9 %. Elles offrent ainsi la possibilité d'être utilisées dans des processus de décontamination des sols par phyto-extraction (Brooks et al., 1998 ; le roux, 2002).

#### **VI.6. Remise en état de l'ancienne carrière de calcaire de Djebel Feriana**

Dans le cas de l'ancienne carrière de la Société Tuniso-Andalouse de Ciment Blanc (SOTACIB) de djbel Feriana (Tunisie centrale) (Fig.56), où la remise en état n'a pas été conduite au rythme de la dynamique des fronts et la grande fosse n'a pas été auto-remblayée, les principes suivants ont été retenus (Aloui, 1999) :

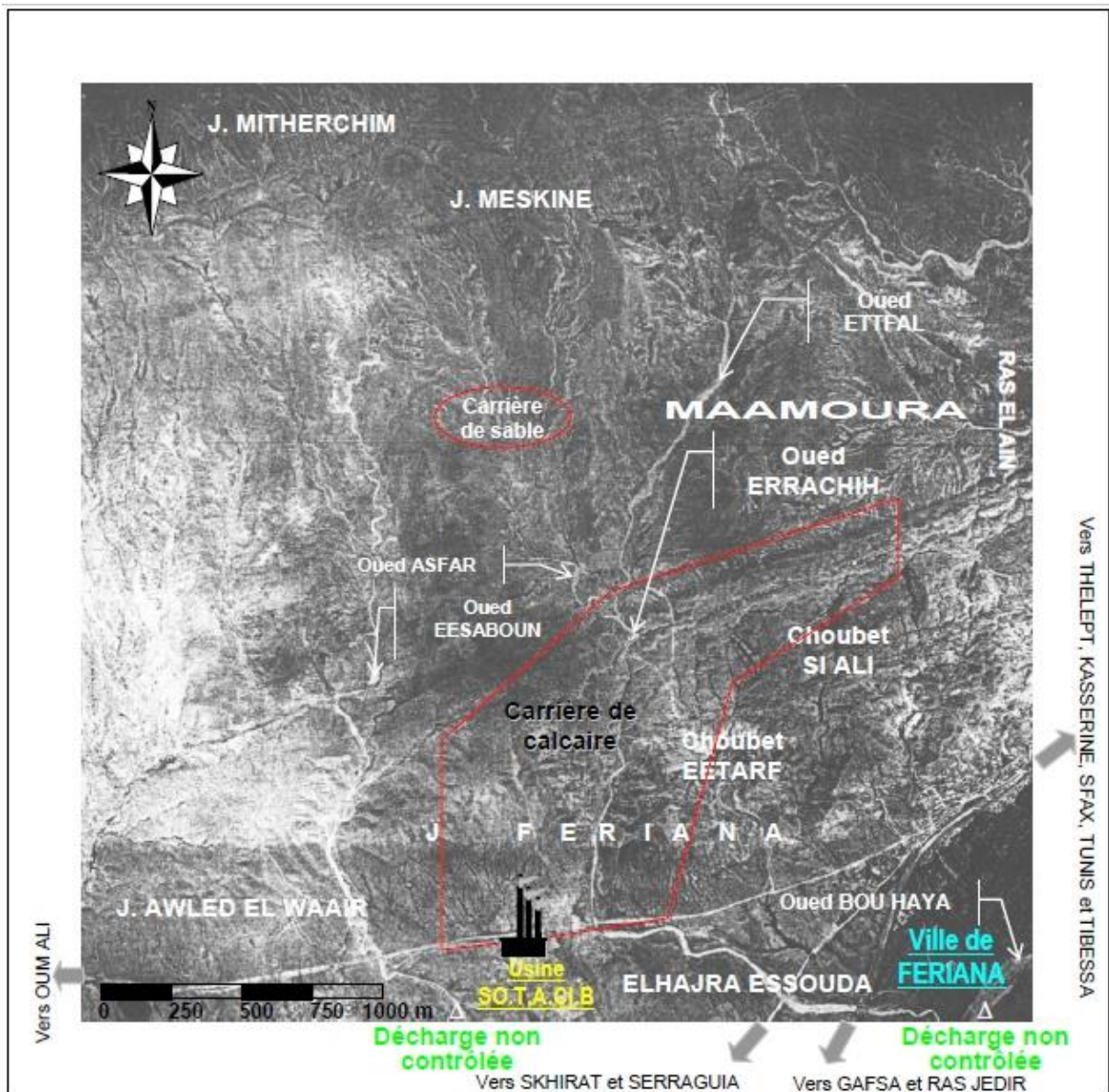


Figure 56 : Vue aérienne de djebel Feriana et les deux carrières de sable et de calcaire (Aloui,1999).

- Remblaiement partiel de la fosse voisine du sommet S791,9 m avec des matériaux provenant soit des verses, soit des stériles. Les blocs de calcaire stérile les plus grossiers ont été déversés en premier en fond de fosse, de manière à offrir un assis drainant, les matériaux fins constitués de produits de remplissage karstique et de calcaire en petits blocs ont été déposés en haut. Les abords de ce sommet ont été nettoyés et ses fronts de taille voisins ont été stabilisés ;
- L'ancienne verse sauvage située à proximité du dépôt d'explosifs, a été remodelée. Ses hauts ont été déchargés pour élargir la plate-forme et stabiliser le talus final. Ce dernier, a été aménagé en banquettes drainantes pour favoriser l'écoulement des eaux en périodes orageuses. Vers la base, des barrages d'atterrissement des fines en pied de la

verse ont été menés. Enfin, la verse est sécurisée par la construction de petits barrages de protection contre l'érosion régressive par le ravinement superficiel.

- Les remblais des pentes de quelques fronts de taille et des talus des deux verses ont été mis en place avec une pente adoucissante maximale de  $45^\circ$  (Fig.57). Le profil topographique ainsi reconstitué est très proche du profil initial, ce qui a permis de valoriser les stocks de stérile et de limiter considérablement l'impact paysager consécutif à l'exploitation même en vues rapprochées ;
- À la fin de l'année 1998, un projet pilote de reverdissement et de reboisement a été initié. Plus de 4000 plants calcicoles, notamment des pins d'Alep, du romarin et des eucalyptus, ont été implantés sur la plate-forme et les talus remodelés de l'ancienne verse. Les résultats ont été très encourageants (Fig.57).
- Les fronts en exploitation peuvent être réhabilités en se conformant aux schémas présentés dans la figure. Sur la rive gauche de l'oued ERRACHIH, les fronts de taille nécessitent une sécurisation et un dégagement. L'arrêt des excavations doit être effectué à une distance de 25 mètres de l'oued ERRACHIH pour protéger les fondations en aval.
- Concernant la verse sauvage de gros blocs sur la rive gauche de l'oued ERRACHIH, il est recommandé de la déplacer. Les blocs difficiles à manipuler devraient être stabilisés ou détruits par explosifs, puis réutilisés à d'autres fins. Si cette option est choisie, des mesures de sécurité supplémentaires doivent être prises en raison des risques liés à la fragmentation des roches et aux vibrations intenses(Aloui, 1999).

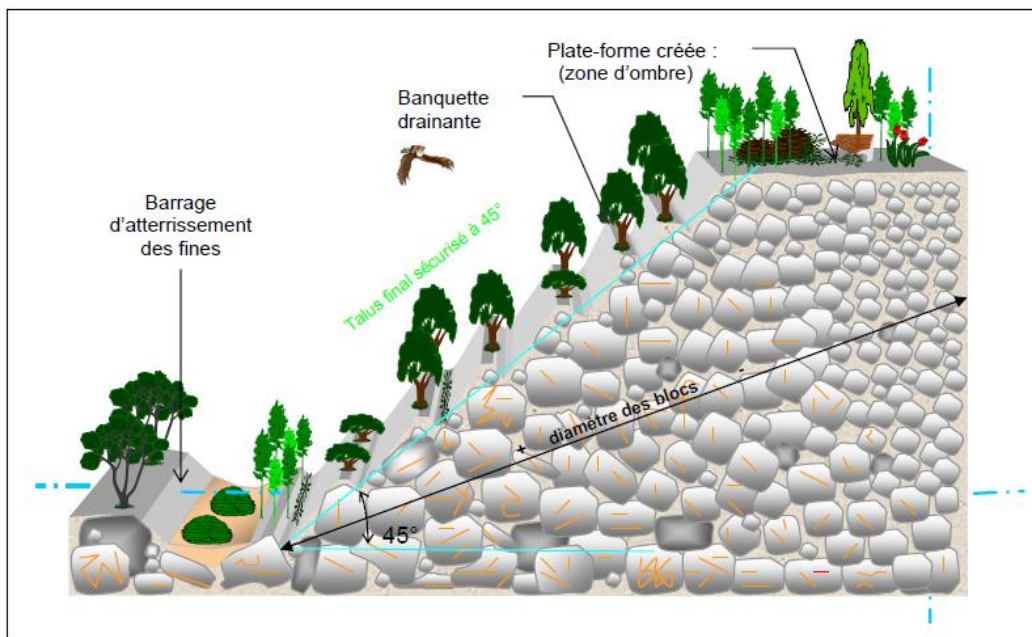


Figure 57 : Réhabilitation de l'ancienne verse (Aloui, 1999)



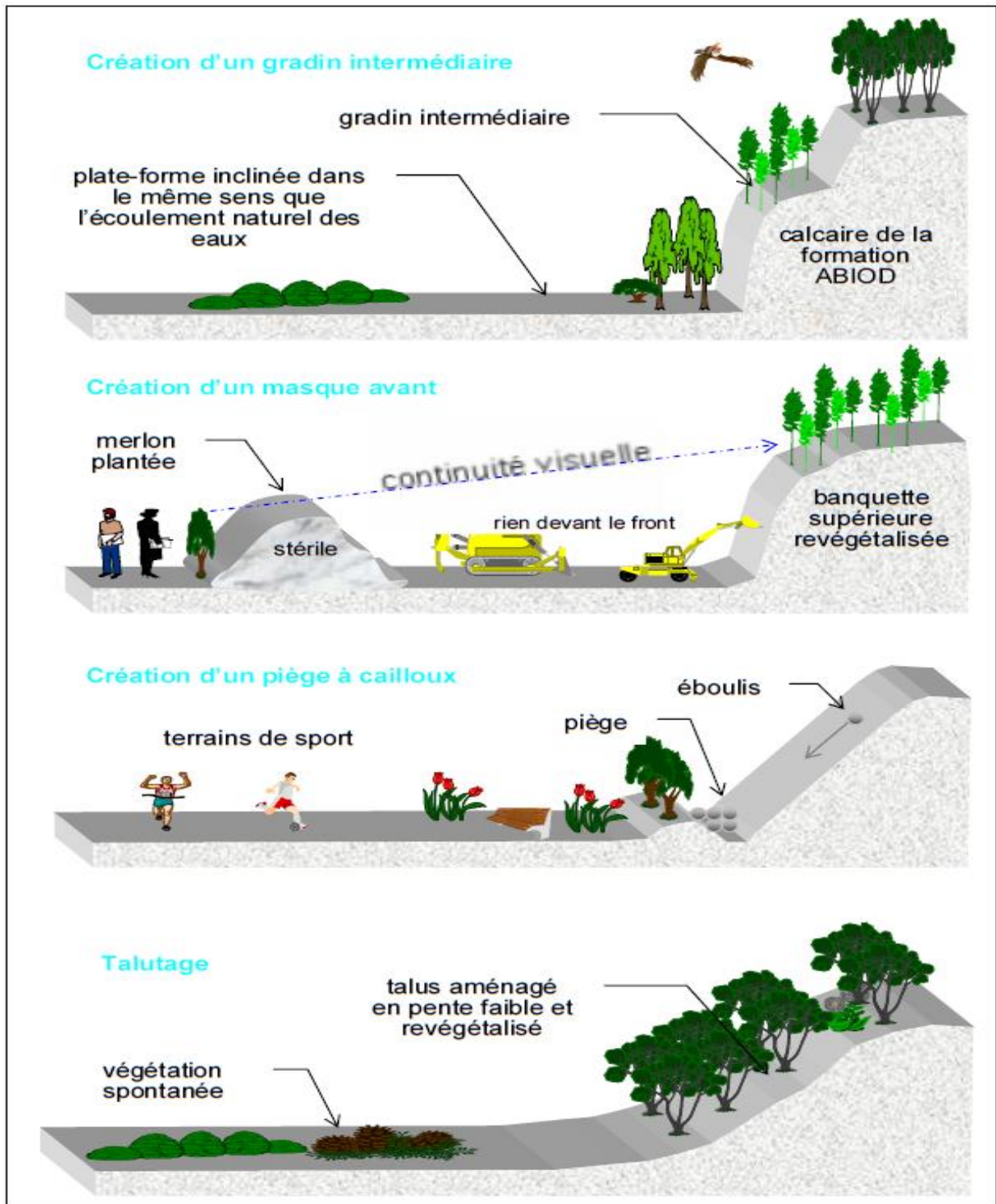


Figure 58 : Options de réaménagement paysager pour les Sites en Exploitation (Aloui, 1999)

### **VI.7. Un exemple de revégétalisation au Kenya : la carrière Bamburi**

Depuis 1954, la Bamburi Portland Cement Factory, située à environ dix kilomètres au nord de Mombasa, exploite du calcaire corallien fossile pour la production de ciment, sur une étendue de 1 200 hectares. Avec la perte de tout le sol de surface, l'entreprise s'est tournée vers la pisciculture et le reboisement, tenant compte des caractéristiques du sol calcaire et sablonneux ainsi que de la proximité de la nappe phréatique, légèrement salée. En 1971, le reboisement de 70 hectares de la « South Quarry » a débuté avec la plantation de *Casuarina equisetifolia*, une espèce bien adaptée aux sols pauvres et à la salinité. La densité de son bois permet une commercialisation aisée. Pour accélérer la décomposition des feuilles, des mille-pattes ont été introduits. Avec l'obtention de 10 cm d'humus, d'autres espèces ont spontanément émergé ou ont été introduites. Après vingt ans, une grande diversité floristique s'est développée, diversifiant la monoculture initiale de casuarinas avec des espèces telles que *Prosopis pallida*, *Conocarpus lancifolius* et *Azadirachta indica*. Après vingt-cinq ans, les casuarinas ont réussi à transformer les carrières hostiles en une forêt luxuriante, même en l'absence de sol au départ. Plus de 200 espèces de seconde génération, originaires de la forêt côtière, ont alors colonisé la région (Baumer et al., 1990; Le Roux, 2002).

### **VI.8. Conclusion**

Les lois algériennes sur l'exploitation minière et la protection des ressources en eau imposent des normes strictes pour préserver les écosystèmes fragiles et les ressources vitales. Les périmètres de protection rapprochée et les mesures spécifiques pour atténuer les impacts sur le sol et l'air sont décisifs. Le réaménagement des sites miniers est essentiel pour restaurer l'environnement. Ces initiatives reflètent l'engagement de l'Algérie envers la durabilité environnementale et un développement équilibré.

# *Conclusion générale*

## *Conclusion Générale*

En examinant de près les différents écosystèmes afin d'identifier l'impact des activités d'extraction de granulat, notre étude apporte plus d'éléments à la compréhension de l'influence de ce type d'exploitation non-métallique en Algérie. Cette démarche nous a permis d'aboutir à des probants résultats sur les changements environnementaux induits par l'exploitation des granulats, ce qui constitue une base essentielle pour l'élaboration de stratégies de gestion et de conservation plus efficaces.

En premier lieu, la carrière d'El M'cif à Chekfa (Sud-Est de Jijel), illustre parfaitement l'impact des activités humaines sur un environnement naturel jusque-là préservé. Les roches carbonatées à Chekfa se manifestent en affleurement sous la forme d'amas, au sein des encaissements schistophylladiques. L'influence combinée des processus d'exploitation des ressources naturelles, des conditions climatiques locales et des caractéristiques géologiques de la région a profondément altéré le milieu physique de cette carrière.

Les résultats des analyses des échantillons collectés lors des différentes campagnes mettent en évidence une tendance écologiquement problématique dans les concentrations des éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux de l'oued Aftis et de la source prélevée au niveau de la carrière d'El M'cif. Plus précisément, les concentrations de zinc, de plomb et de cadmium dans ces eaux dépassent largement les normes recommandées établies tant par la réglementation algérienne que par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Les analyses des sédiments prélevés dans l'oued Aftis révèlent une tendance générale des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) décroissante, classées comme suit :  $Fe > Zn > Cu > Cd$ . Il est ainsi observé que les concentrations moyennes de zinc, de cuivre et de cadmium dans les sédiments de l'oued Aftis excèdent les valeurs de référence établies par Riemann et Caritat (1998). Il en est de même pour les sols prélevés aux abords de la carrière, ils présentent une tendance générale de concentration en ETM, qui peut être établie comme suit :  $Fe > Zn > Pb > Cu > Cd$ . Dans ce cas, les concentrations de zinc, de plomb, de cuivre et de cadmium dans le sol excèdent les valeurs de référence définies par Riemann et Caritat (1998).

L'analyse des indices de pollution dans le sol et les sédiments nous offre une modélisation de la contamination induite par cette activité extractive. Après une évaluation minutieuse des résultats obtenus à partir de trois indices de pollution distincts, à savoir l'indice I-géo, le PI-IPI et le RI, il est évident que les valeurs de l'indice I-géo fournissent une représentation plus précise des niveaux de contamination par rapport aux autres indices. Les valeurs de l'indice de géo-

accumulation révèlent que les trois échantillons de sédiments ne sont pas contaminés par le fer et le cuivre ( $I\text{-géo} < 0$ ), mais sont modérément à sévèrement contaminés par le zinc ( $2 < I\text{-géo} < 4$ ). En ce qui concerne le cadmium, ses valeurs d' $I\text{-géo}$  indiquent qu'ils sont sévèrement à extrêmement contaminés ( $3 < I\text{-géo} < 4$ ). Les valeurs de l'indice de géo-accumulation dans le sol révèlent que la plupart des stations d'étude sont fortement à extrêmement contaminées par le cadmium ( $3 < I\text{-géo} < 4$ ), et modérément à sévèrement contaminées par le plomb ( $2 < I\text{-géo} < 3$ ). En revanche, les valeurs de l'indice  $I\text{-géo}$  pour le fer, le cuivre et le zinc dans la majorité des stations prélevées indiquent qu'ils ne sont pas contaminés.

L'exploitation de la carrière d'El M'cif à Chekfa présente un impact significatif sur l'environnement local. L'étude pétrographique et géochimique des roches révèle leur potentiel de libération d'éléments traces métalliques (ETM) lors de l'extraction à ciel ouvert, exacerbant ainsi les processus d'érosion et de lessivage des sols sous l'effet combiné des précipitations. Cette contamination des sédiments et des eaux est renforcée par la présence de manifestations karstiques au sein de la carrière, pouvant affecter les ressources en eau de surface et souterraines.

Les concentrations élevées de métaux lourds dans le bassin versant du Nil, dont fait partie la région étudiée, sont attribuées à diverses sources géologiques et anthropiques, accentuant la pollution des eaux. Les activités industrielles, notamment les installations de traitement de la carrière, contribuent également à cette contamination, avec des niveaux élevés de métaux lourds détectés dans les prélèvements d'eau à proximité de ces sites.

~~En conclusion,~~ l'exploitation de la carrière d'El M'cif entraîne une contamination généralisée des eaux, des sédiments et des sols par des métaux lourds, exacerbée par les conditions géologiques, climatiques et anthropiques de la région. Des mesures de gestion environnementale efficaces sont nécessaires pour atténuer ces impacts sur les écosystèmes locaux.

En second lieu, les carrières situées sur le site du "Piton" d'Akbou exploitent des calcaires liasique, les alluvions se trouvent le long des rives de l'oued Sahel-Soummam et contenant des matériaux fins à moyens tels que des calcaires, des grès et des conglomérats. Dans la zone d'Akbou-Takrietz, traversée par l'oued Soummam, constituée de différents matériaux. Trois sablières principales sont identifiées dans la région, chacune exploitée par une société différente.

Les données proviennent des campagnes d'échantillonnage menées dans les Oueds Sahel Boussellam, la Soummam et les eaux de forages près du piton d'Akbou. Les concentrations moyennes de métaux sont classées dans l'ordre décroissant suivant :  $Zn > Pb > Fe > Cd > Cu$ . En particulier, les niveaux de zinc, de plomb et de cadmium dans ces eaux de surface et souterraines dépassent les normes recommandées établies tant par la réglementation algérienne que par l'Organisation mondiale de la Santé.

Les analyses des Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les sédiments des Oueds Sahel Boussellam, la Soummam révèlent une tendance à la baisse des concentrations, avec un ordre décroissant établi comme suit  $Fe > Zn > Cu > Cd$ . Il est important de souligner que les concentrations moyennes de zinc, cuivre et cadmium dans les sédiments dépassent les valeurs de référence requises.

La répartition des concentrations peut être synthétisée ainsi :  $Fe > Zn > Pb > Cu > Cd$ . Il est essentiel de noter que les moyennes des concentrations de zinc, plomb, cuivre et cadmium dans les échantillons de sols prélevés près du piton d'Akbou dépassent les valeurs de référence établies.

Les valeurs de l'indice I-Géo fournissent une représentation plus précise des niveaux de contamination. Pour les quatre échantillons de sédiment, les valeurs d'I-Géo montrent une absence de contamination par le fer et le cuivre ( $I\text{-Géo} < 0$ ), tandis qu'ils sont modérément à sévèrement contaminés par le zinc ( $2 < I\text{-Géo} < 4$ ). En ce qui concerne le cadmium, les données d'I-Géo signalent une contamination extrême ( $I\text{-Géo} > 4$ ). En ce qui concerne les échantillons de sol, ils ne sont pas contaminés par le fer ( $I\text{-Géo} < 0$ ) et présentent une contamination modérée par le cuivre ( $0 < I\text{-Géo} \leq 1$ ), à l'exception de (S4), qui ne présente pas de contamination par le cuivre. Cependant, ils sont modérément à sévèrement contaminés par le plomb et le zinc ( $2 < I\text{-Géo} \leq 3$ ). Les valeurs d'I-Géo pour le cadmium révèlent une contamination allant de sévère à extrême ( $I\text{-Géo} > 4$ ).

La vallée de la Soummam subit une forte influence des activités humaines, créant une complexité de facteurs anthropiques et géogéniques contribuant à sa pollution et à sa détérioration. Il est difficile d'isoler chaque source de pollution et d'évaluer l'impact des industries extractives au niveau du piton d'Akbou. Bien que les opérations d'exploitation aient cessé, le traitement des granulats persiste aux stations situées au pied du piton, engendrant un impact environnemental assez néfaste. L'altération des cours d'eau, la réduction des surfaces cultivables et la pollution atmosphérique sont observées. De plus, les activités extractives ont

le potentiel d'aggraver les concentrations minérales dans l'eau et le sol, contribuant à la libération d'ions d'Éléments Traces Métalliques (ETM). Les niveaux élevés de métaux lourds peuvent être attribués aux rejets urbains et industriels et aux dépôts de poussière provenant d'autres sources de pollution dans la région d'Akbou.

Les résultats obtenus offrent une vision sur les concentrations en métaux lourds dans notre régions d'étude et de leur origine, ce qui peut orienter la mise en place de mesures de gestion environnementale pertinentes.

Notre travail de recherche dépeint une situation complexe où l'interaction de facteurs naturels et humains, ainsi que la diversité des sources de pollution, sont susceptibles d'entraîner une augmentation des niveaux de métaux lourds dans les différents compartiments de l'environnement

### **Perspectives**

Nous envisageons d'explorer davantage d'autres métaux lourds. Nous prévoyons également de mener une étude plus détaillée sur plusieurs aspects, tels que les vibrations, en utilisant des méthodes plus pertinentes pour évaluer leur impact. De plus, nous étudierons l'impact sur le paysage, la faune et la flore environnante, ainsi que les émissions atmosphériques et la poussière.

Nous envisageons de mener des études similaires dans des environnements semi-arides et arides. L'objectif est d'élargir notre champ de recherche pour déterminer si les comportements observés et la remobilisation des éléments se manifestent de manière similaire dans ces conditions climatiques différentes. Cette approche permettra également de réaliser une étude comparative approfondie.

# *Références bibliographiques*



- Afalfiz, A. 1990. Étude comparative para-génétique et géochimique des indices minéralisés à Fe, Pb, Zn, Cu, Ba de la partie occidentale du massif cristal-lophyllien de Petite Kabylie, Algérie. Mémoire de Magister, USTHB, 202 p.
- Aliouche, M. (2008). Exploitation des substances utiles à ciel ouvert et impact sur l'environnement ; Etude de cas dans l'Est Algérien (Les gisements de Djebel Salah, Région de Constantine). Mémoire de magister, université des frères mentouri, Constantine ,113 p.
- Aloui, T. (1999). Les carrières des matériaux carbonatés et siliceux de la SOTACIB au Jebel Feriana (Tunisie Centrale). Diplôme d'étude approfondis en géologie, université de Tunis II,176 p.
- Al-Saydeh, S. A., El-Naas, M. H., & Zaidi, S. J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: A comprehensive review. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 56, pp. 35–44). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
- and ecological risk assessment of heavy metals in street dust of Tehran,
- Angelova, R. A., Velichkova, R., & Alexandrova, S. (2020). Environmental impact of quarry activities: The case study of a gneiss deposit in the region of blagoevgrad. *Proceeding of 1st International conference on Environmental protection and disaster RISKS*. Az-buki National Publishing House. P 205-215.
- ANIREF. (2018). Monographie de la wilaya de jijel. Rapport, Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière,29 P.
- Arfaoui, N. (2009). Les poussières émises par l'exploitation des carrières : Caractérisations et Impacts sur l'Environnement (Cas de deux carrières à Djebel Oust). Mémoire de magistère, université de Tunis El manar.113 P.

## **B**

- Barnhisel, R. I., & Hower, J. M. (1997). Coal Surface Mine Reclamation in the Eastern United States: The Revegetation of Disturbed Lands to Hayland/Pasture or Cropland. *Advances in Agronomy*, 61(C), 233–275. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60665-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60665-3)
- Baumer, M., Darnofer, I., & Gundalino, S. (1990). Baobab farm LTD ou que faire d'une carrière après exploitation ? *Bois et Forêts des Tropiques*, 226 : 48-60.
- Belli, N., & Leghouchi, S. (2018). Assessment of lead and cadmium in groundwater sources used for drinking purposes in Jijel (Northeastern Algeria). *Global NEST Journal*, 20(2), 417–423.

- Belli, N., Mesbah, L., Chebab, S., Tekouk, M., & Leghouchi, E. (2010). Oxidative stress induced by co-exposition to lead and cadmium, two contaminants of the ground water of Nil wadi (Jijel-Algeria). *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(3), 289–301. <https://doi.org/10.7202/044690ar>
- Benhamiche, N., Sahi, L., Tahar, S., Bir, H., Madani, K., & Laignel, B. (2016). Spatial and temporal variability of groundwater quality of an Algerian aquifer: The case of Soummam Wadi. *Hydrological Sciences Journal*, 61(4), 775-792. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.966723>
- Bir, H., Allili-Ailane, C., Laignel, B., Adjeroud, N., & Madani, K. (2016). Particulate flow at the mouth of the Soummam watershed (Algeria). *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(1), 204–211. <https://doi.org/10.1002/ep.12210>
- Bizriche, S., & Benkerrou, N. (2012). Audit environnemental de la carrière d'agrégat SOMACOB-Akbou Wilaya de Bejaia. Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 108 p.
- Bouillin, J. P., Kornprobst, J., & Raoult, J. (1977). Données préliminaires sur le complexe volcano-sédimentaire de Rekkada Metletine (ex-TeXenna), en Petite Kabylie (Algérie). *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 805–813 p.
- Boulguerager, Z. (2019). Impact des rejets urbains et domestiques sur la qualité des eaux de l'Oued Boussellam, Sétif Nord-Est algérien Inventaire et mise en évidence de polluants et leurs conséquences sur l'environnement. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar – Annaba , 230 p.
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 9). Elsevier Ltd. ,1-26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Brooks, R., Chiarucci, A., & Jaffré, T. (1998). Revegetation and stabilisation of mine dumps and other degraded terrain. In : *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. 227–247p.
- Byizigiro, R. V., Biryabarema, M., & Rwanyiziri, G. (2020). Alleviating some Environmental Impacts resulting from Artisanal and Small-scale Mining Sector: A Critical Review. *Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment*, 3(1).1-19. <https://doi.org/10.4314/rjeste.v3i1.4>.

## C

- Clément, M. & Françoise, P. (2003). Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. *Tec & doc*, 387 p.

Coutelle, A. (1979). Étude géologique du sud-est de la Grande Kabylie et des Babors d'Akbou. Thèse de Doctorat Ès Sciences, Univ. Bretagne Occidentale, 567 p

## D

Darkaoui, A. (2019). Impacts environnementaux de l'exploitation des carrières dans les oasis d'Ouarzazate. Les écosystèmes oasiens ; transformations et perspectives de développement, Ouarzazate, Maroc.1-15.hal-02145406v1

Darwish, T., Faour, G., & Khawlie, M. (2004). Assessing soil degradation by landuse-cover change in coastal Lebanon. *Lebanese Science Journal* , 5(a), 45–59 p.

Dentoni, V., Grosso, B., Massacci, G., & Soddu, G. P. (2020). Visual impact evaluation of mines and quarries: the updated Lvi method. *Environmental Earth Sciences*, 79(5). 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8833-8>

Djellit, H. (1987). Evolution tectono métamorphique du socle kabyle et polarité de mise en place des nappes de flyschs en petite kabylie occidentale (Algérie). Thèse de doctorat, Université de paris, 206 p.

Durand Delga, M. (1955) : Etude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Algérie). Thèse Sciences Paris et Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2 série, N° 24, 533 p.

Dussert, M & Brives, M. (1928). Carte géologique d'El milia (N° 27, 1/50 000). Alger : le service géologique de l'Algérie.

## G

Glaçon, J. (1967). Recherche sur la géologie et les gîtes métallifères du Tell sétifien (Algérie). Publication du service de la carte géologique de l'Algérie, n°32(2), 751p.

Goix, S. (2013). Origine et impact des pollutions liées aux activités minières sur l'environnement et la santé, cas de Oruro (Bolivie). Thèse de doctorat, université de Paul Sabatier - Toulouse III. 319 p

Grujic, D., Hansen, T. H., Husted, S., Drinic, M., & Singh, B. R. (2018). Effect of nitrogen and zinc fertilization on zinc and iron bioavailability and chemical speciation in maize silage. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.012>

## H

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1001.

## J

Jamal, A., Delavar, M. A., Naderi, A., Nourieh, N., Medi, B., & Mahvi, A. H. (2019). Distribution and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding a lead and zinc smelting plant in Zanjan, Iran. *Human and Ecological Risk Assessment*, 25(4), 1018–1033. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1460191>

Journal Officiel de la République Algérienne (2014). Loi n° 14-05 du 24 Rabie Ethani 1435 correspondant au 24 février 2014 portant loi minière. *Journal Officiel de la République Algérienne* n°18, pp.3-29

Journal Officiel De La République Algérienne. (2005). Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. *Journal Officiel de la République Algérienne* n°60, pp.3-18.

## K

Kamani, H., Mahvi, A. H., Seyedsalehi, M., Jaafari, J., Hoseini, M., Safari, G. H., Dalvand, A., Aslani, H., Mirzaei, N., & Ashrafi, S. D. (2017). Contamination and ecological risk assessment of heavy metals in street dust of Tehran, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(12), 2675–2682. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1327-x>

Kessasra F. (2006) - Etude hydrogéologique sous l'aspect de la modélisation mathématique en vue d'une gestion rationnelle des écoulements souterrains de la vallée de la Soummam. Mémoire de Magistère en Sciences de la Terre, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 173 p.

Kessasra, F. (2015). Modélisation hydrogéologique des écoulements des eaux souterraines et de surface de la nappe des alluvions de la vallée de la Soummam (Nord-Est Algérie) Impacts sur l'environnement et les écosystèmes. Thèse de doctorat, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 454 p.

Kherbouche, F. (2015). Le néolithique tellien de la grotte de Gueldaman GLD1 (Babors d'Akbou, Algérie, VIII-V millénaire BP). Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II. 453P. <https://theses.hal.science/tel-01412880>

Krika, A., & Krika, F. (2017). Evaluation of the status of heavy metal pollution in surface water and sediments of the Nil River (North Eastern Algeria). *Pollution*, 3(2), 301–310. <https://doi.org/10.7508/pj.2017.02>

## L

Le Roux, christine. (2002). La réhabilitation des mines et carrières à ciel ouvert. Bois et forêts des tropiques, n° 272. Rapport, campus de Baillarguet. Montpellier Cedex 5, France.15 p.

Lehtihet, A. (1983). Étude hydrogéologique de la plaine alluviale de l'oued Nil (région de Jijel). Mémoire d'ingénieur d'État en hydrogéologie, Univ. Houari Boumédiene-Alger, Algérie, 60-65 p.

Lottermoser, B. G. (2010). Mine wastes: Characterization, treatment, environmental impacts. Third Edition, Springer,1-42. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>

## M

Mahmood, Q., Asif, M., Shaheen, S., Hayat, M. T., & Ali, S. (2018). Cadmium Contamination in Water and Soil. In *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants: From Physiology to Remediation* (pp. 141–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00006-1>

Manne, R., Kumaradoss, M. M. R. M., Iska, R. S. R., Devarajan, A., & Mekala, N. (2022). Water quality and risk assessment of copper content in drinking water stored in copper container. *Applied Water Science*, 12(3)1-8. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01542-x>

Moiroud, A., Capellano, A., & Danière, C. (1991). Un procédé exemplaire de réaménagement et de reverdissement des carrières : l'emploi des espèces fixatrices d'azote atmosphérique. Rapport.34 p.

Moniod, F. (1983). Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n°3 et 4.191-203.

Müller, G. (1969). Index of geo accumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2, 108–118.

## N

Nasirian, H., Nazmara, S., Mahvi, A. H., Hosseini, M., Shiri, L., & Vazirianzadeh, B. (2015). Assessment of Some Heavy Metals in the Shadegan and Hawr Al Hawizea Wetland Waters

from Iran. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(33).1-10  
<https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i1/53997>

## O

OMS. (2003). *Iron in Drinking-water, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*, 2nd ed. Vol. 2. Health criteria and other supporting information. World Health Organization, Geneva, 1-9 p.

OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organisation, 1-614 p.

## P

Parise, M. (2010). The impacts of quarrying in the Apulian karst (Italy). *Environmental Earth Sciences*, 0, 441–447. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0\\_68](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0_68)

PNE. (2010). *Plan National de l'Eau (2010) - Réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau. Rapport*.

## R

Raj, K., & Das, A. P. (2023). Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.02.001>

Ramasar. (2008). *Fiche Descriptive Ramsar de la Vallée de l'oued Soummam. Rapport, version 2006-2008*, 27 p .

Rao, A. V., & Tarafdar, J. C. (1998). Selection of plant species for rehabilitation of gypsum mine spoil in arid zone. *Journal of Arid Environments*, 39(4), 559–567. <https://doi.org/10.1006/JARE.1998.0409>

Reimann, C., & de Caritat, P. (1998). *Chemical elements in the environment: factsheets for the Geochemist and Environmental scientist*. Springer, 404 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72016-1>

Rodier, J., Legube B., Merlet N., Brunet R., (2009). *Analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9ème éd.)*. Dunod ,1600 p.

Rouikha, y. (2008). Etude géologique et géomécanique des roches carbonatées de la région de Chekfa-Chahna wilaya de Jijel. Mémoire de magister, Université de Jijel, 62 p.

## S

Salhi, M., Lahouas, M., Brahimi, A., Harikech, F., & Bourakoua, S. (2020). Etude des vibrations dues aux tirs de mines en carrière de calcaires d'El M'cif à Chekfa (wilaya de JIJEL). Rapport, S.A.R.L. Générale des mines, Boumerdès, 36 p.

Seklaoui, M., Boutaleb, A., Benali, H., Alligui, F., & Prochaska, W. (2016). Environmental assessment of mining industry solid pollution in the mercurial district of Azzaba, northeast Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5619-2>

Sopper, W., & Seaker, E. (1986). Development of microbial communities on sludge-amended mine land. *Innovative approaches to mined land reclamation*. Carlson C. L., Swisher J. H. (éd.). Carbondale, Etats-Unis, Southern Illinois University Press, 659-680 p.

## T

The department for the environment. (1996). *Mineral Planning Guidance: The Reclamation of Mineral Workings*. rapport. 53 p.

## V

Vysokomornaya, O. V., Kurilenko, E. Y., & Shcherbinina, A. A. (2015). major contaminants in industrial and domestic wastewater. *EDP Sciences*. 1-3. <https://doi.org/10.1051/C>

## Z

Zouggaghe, F., Mouni, L., & Tafer, M. (2014). Qualité biologique du réseau hydrographique du bassin versant de la Soummam (Nord de l'Algérie). *Larhyss Journal*, 17, 21–33 p.