

REPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة باجي مختار - عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA
BADJI MOKHTAR UNIVERSITY –ANNABA



Faculté des Sciences de la Terre
Département des Mines

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Mines

Spécialité : Mines et Environnement

THÈME

**Contribution à l'étude d'impact des carrières de granulats
d'Héliopolis- Guelma sur l'environnement : réhabilitation des sites
miniers et développement durable**

Par DJEDID Faten

Soutenue le 01/10/2025

Devant le jury :

Président	: CHETTIBI Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Rapporteur	: BOUNOUALA Mohamed	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Examineur	: IDRES Abdelaziz	Pr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Examineur	: AMARA Mourad	Pr. NSNN-Sidi Abdellah-Alger
Examineur	: MEKTI Zohir	Dr. Université Badji Mokhtar –Annaba
Examineur	: BOUABDALLAH Soufiane	Dr. Université Abderrahmane Mira – Bejaia

Année universitaire 2025/2026

Citation:

"Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants." – Antoine de Saint-Exupéry.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de patience et de persévérance, à mes chers parents pour leur soutien inconditionnel, à mes deux anges Ilyes et Anis, ainsi qu'à ma chère petite sœur Sara, sources d'amour et de motivation.

Faten Djedid

Remerciement

Je tiens à remercier sincèrement mon professeur encadrant, Mr. Mohamed Bounouala, pour son accompagnement, sa disponibilité et la valeur de ses conseils tout au long de ce travail.

J'exprime également ma profonde gratitude aux membres du jury : Pr. Mohamed Chettibi, président du jury, ainsi qu'à Pr. Idres Abdelaziz, Dr. Mekti Zohir, Pr. Amara Mourad et Dr. Bouabdalla Soufiane, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer cette thèse de Doctorat et d'y apporter leur intérêt.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont encouragé tout au long de cette expérience académique.

Faten Djedid

RÉSUMÉ

Le secteur de l'exploitation minière et des carrières a connu une expansion significative ces dernières années, en raison du développement industriel mondial, marqué par la construction de grands bâtiments et diverses infrastructures. Ces réalisations nécessitent des quantités importantes de gravier, extrait par l'exploitation des carrières. Toutefois, cette exploitation engendre des conséquences environnementales qui affectent négativement l'environnement et la santé humaine. Parmi ces impacts, on note les émissions de poussières minérales qui polluent l'air et la végétation, ainsi que le risque de contamination des ressources en eau, tant de surface que souterraines. Cette pollution est exacerbée par l'érosion des sols et les fouilles profondes qui exposent les couches internes du sol, permettant ainsi aux eaux de pluie d'entrer en contact avec les déchets des carrières, augmentant ainsi le risque de transfert des polluants et des toxines dans le sous-sol, ce qui entraîne une dégradation de la qualité des eaux souterraines (aquifère). Cela a des effets sévères sur la santé humaine et l'écosystème en général.

Dans cette recherche, nous avons examiné les méthodes d'exploitation de la carrière de gravier située dans la région d'Héliopolis, à Guelma, à l'Est de l'Algérie, dans le but de mettre en lumière la chaîne technologique responsable de la propagation de la pollution dans la région. Cependant, les analyses effectuées sur des échantillons de poussière prélevés des différentes opérations d'extraction telles que le tir à l'explosif, le concassage, le broyage et le criblage, ont révélé des concentrations variables des divers éléments chimiques de tailles différentes. En outre, nous avons constaté une forte proportion de calcite par rapport à d'autres éléments comme le dioxyde de silicium : cela signifie que ces substances minérales représentent une menace environnementale ainsi que leurs tailles inférieures à 10 micromètres et 2,5 micromètres (PM10, PM2.5) représentent une menace pour la santé respiratoire humaine, en particulier pour les travailleurs des carrières qui y sont exposés de manière plus importante que d'autres. L'exposition continue à la silice, à la dolomite et à la calcite peut entraîner des maladies respiratoires incurables et cancérogènes, d'autant plus que la zone étudiée se trouve à proximité d'une zone résidentielle, à seulement quelques mètres des stations de concassage.

De plus, les échantillons de plantes et d'arbres prélevés dans des exploitations agricoles très proches de la carrière ont montré l'impact de cette pollution par les poussières, qui recouvrent les feuilles, les empêchant de recevoir la lumière du soleil, ce qui entrave leur photosynthèse et ralentit leur croissance. En outre, les analyses des échantillons d'eau et de sol ont révélé la présence des mêmes éléments polluants. Par conséquent, il est impératif de prendre des mesures

urgentes pour atténuer les effets des poussières émises par la carrière, afin de réduire les impacts négatifs sur l'environnement et la santé, et d'encourager les projets de réhabilitation des sites miniers exploités, en vue de réaliser un développement vert et durable.

Mots clés :

Guelma (Héliopolis), Carrières de granulats, Poussières minérales, impacts environnementaux, Maladies respiratoires, Pollution atmosphérique.

ملخص

ان مجال التعدين واستغلال المحاجر قد عرف توسعا كبيرا في الآونة الأخيرة نظرا للتطور الصناعي الذي يشهده العالم من تشييد للبنى التحتية والبنى التحتية العمرانية المختلفة. هذه الإنجازات تتطلب كميات معتبرة من الحصى التي تستخرج من خلال استغلال المحاجر هذا الأخير الذي ينجر عنه اثار بيئية وخيمة تؤثر سلبا على المحيط و الصحة البشرية من انبعاثات للغبار المعدني الذي يلوث الهواء و الغطاء النباتي بالإضافة الى امكانية تلوث الموارد المائية السطحية و الجوفية عن طريق نقل هذا الغبار و بسبب انهيار التربة و الحفر العميقة التي تعري الطبقات الداخلية مما يسمح بتواصل مياه الامطار مع نفايات المحاجر مما يزيد من خطر نقل الملوثات و السموم الى باطن الأرض و بالتالي يؤدي الى تراجع جودة المياه الجوفية و هذا بدوره يؤدي الى عواقب وخيمة على الصحة البشرية و الحياة البيئية و البيئية بشكل عام.

في هذه الدراسة، استعرضنا طرق الاستخراج المستخدمة في محجر الحصى الواقع في منطقة هليوبوليس بقالمة، شرق الجزائر، بهدف توضيح السلسلة التكنولوجية المسؤولة عن انتشار التلوث. ومع ذلك، أظهرت التحاليل التي أجريت على عينات الغبار المأخوذة من أنشطة الاستخراج المختلفة، مثل التفجير، والتكسير، والطحن، والغرلة، تباين تراكيز العناصر الكيميائية المختلفة بحسب حجم الجسيمات فنجد عنصر الكالسيوم $CaCO_3$ بنسب عالية مقارنة بعناصر أخرى مثل ثاني أكسيد السيليكون ولكن هذا لا يعني خلوها من الخطر فحتى توجد هذه المواد الدقيقة التي لا يتجاوز حجمها 10 ميكرومتر و 2.5 ميكرومتر تشكل تهديدا للصحة التنفسية البشرية خاصة بالنسبة لعمال المحاجر المعرضون لهذا الغبار بشكل كبير من غيرهم. ان التعرض المستمر لغبار السيليكا والدولوميت والكالسيوم يسبب أمراض تنفسية مسرطنة غير قابلة للشفاء خاصة وان المنطقة المدروسة تقع ضمن منطقة سكنية لا تبعد الا بضعة أمتار عن محطات التكسير. علاوة على ذلك ان عينات النباتات والأشجار التي أحضرناها من مزارع قريبة جدا من المحجرة بينت مدى تأثيرها بالغبار الناتج عن عمليات تحضير الحصى الذي عمل على تغطية أوراقها بالغبار ومنعها من أشعة الشمس مما أعاق تركيبها الضوئي وتسبب في تراجع نموها. بالإضافة لكل ما سبق عينات المياه أيضا أثبتت تواجد نفس العناصر الملوثة وكذلك عينات التربة. و عليه كل التحاليل التي قمنا بها أسفرت على نفس النتائج لذا من الضروري القيام بالإجراءات المستعجلة للتخفيف من اثار الغبار المنبعث من المحجرة للتقليل من الاثار السلبية المترتبة عنه من تلوث للبيئة و تهديد للصحة و التشجيع على مشاريع إعادة التأهيل للمواقع المنجمية المستغلة لتحقيق تنمية خضراء مستدامة.

الكلمات المفتاحية:

قالمة (هليوبوليس)، محاجر الحصى، الغبار المعدني، الآثار البيئية، أمراض الجهاز التنفسي، تلوث الهواء.

ABSTRACT

The mining and quarrying sector has experienced significant expansion in recent years due to global industrial development, characterized by the construction of large buildings and various urban infrastructures. These projects require substantial amounts of gravel, which obtained through quarrying. However, this extraction process results in significant environmental damage, with detrimental effects on human health. Notable among these impacts are the emissions of mineral dust that pollute the air and vegetation, as well as the risk of contamination of surface and groundwater resources. Soil erosion and deep excavations expose inner soil layers, allowing rainwater to encounter quarry waste, thereby increasing the risk of pollutants and toxins seeping into the subsoil, degrading groundwater quality and exacerbating this pollution. This, in turn, has serious consequences for human health and the ecosystem.

In this study, we examined the extraction methods employed at the gravel quarry in the Heliopolis region of Guelma, in eastern Algeria, to elucidate the technological chain responsible for disseminating pollution. However, the tests done on dust samples taken from different extraction activities—like blasting, crushing, grinding, and screening—showed different amounts of various chemical elements in different particle sizes. For instance, we found a high presence of calcite oxide compared to other elements like silicon dioxide. However, this does not imply that these substances are without danger; even fine particles smaller than 10 micrometers and 2.5 micrometers (PM₁₀, PM_{2.5}) pose a threat to human respiratory health, particularly for quarry workers who are exposed to this dust more than others. Continuous exposure to silica, dolomite, and calcite dust can lead to incurable, carcinogenic respiratory diseases, especially since the studied area is located near a residential zone, just a few meters from the crushing stations.

Furthermore, plant and tree samples collected from agricultural areas next to the quarry showed the impact of dust pollution, which covers the leaves, preventing them from receiving sunlight, thereby hindering their photosynthesis and stunting their growth. Moreover, analyses of water and soil samples revealed the presence of the same pollutant elements. Therefore, all the analyses we conducted led to the same conclusions. It is imperative to take urgent measures to mitigate the effects of dust emissions from the quarry to reduce the negative impacts on the environment and health and to encourage rehabilitation projects for exploited mining sites, aiming to achieve sustainable green development.

Keywords:

Guelma (Heliopolis), Aggregate quarries, Mineral dust, Environmental impacts, Respiratory diseases, Air pollution.

Table des matières

Résumé	i
ملخص	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvi
Abréviations et sigles utilisés.....	xviii
INTRODUCTION GENERALE	xx

Chapitre I. Appréciation des conditions géologiques et minières

I.1-Introduction.....	1
I.2-Situation Géographique de la zone d`étude	1
I.2.1-Localisation de Guelma	1
I.2.2-Localisation Locale (d`Héliopolis).....	2
I.2.3-Localisation de la carrière d`Héliopolis.....	3
I.3-L`analyse de la géologie régionale	3
I.3.1-La géologie de Guelma	4
I.3.2-La géologie d`Héliopolis (Locale)	5
I.3.3-Des terrains favorables à l'aménagement et à la construction.....	7
I.3.4-Zone moyennement propice.....	7
I.3.5-Les terrains inadaptés.....	7

I.4-Analyse de la stratigraphie.....	7
I.4.1-Les formations les plus récentes de la région de Guelma	9
I.4.2-Les formations stratigraphiques les plus anciennes de la région : “le domaine allochtone	10
I.4.3-Le domaine para-autochtone	12
I.5-Le contexte structurel.....	13
I.5.1-La phase "atlasique" du fini-éocène.....	13
I.5.2-La phase inférieure du Miocène.....	13
I.5.3-La phase post-nappe (tectonique).....	13
I.6-Reconstitution géologique.....	14
I.7-Analyse des plans d’exploitation de carrière de Guelma.....	14
I.7.1-Présentation de la société CONSTRUB-Est (Ex GREPCO).....	14
I.7.2-Equipements de production.....	15
I.7.3-Mode d’ouverture.....	16
I.7.4-Extraction des matériaux.....	17
I.8-Equipements de traitement mécanique	18
I.8.1-La station NCPJ (150 T/H).....	18
I.8.2-Station DRAGON (250T/H)	19
I.8.3-L'installation ENCC (50 T)	19
I.9-Méthode de traitement mécanique.....	19
I.10-Conclusion.....	19

Chapitre II. Analyse d’impact de l’exploitation des carrières d’agrégats sur l’environnement

II.1-Introduction.....	21
II.2-Climatologie de la région.....	22
II.2.1-Analyses des directions de vents.....	22
II.2.2-Températures de la région d'étude.....	24
II.2.3- Etude de Précipitations.....	26
II.2.4-La Flore et Faune.....	29
II.2.5-Hydrogéologie et hydrologie de la région.....	29
II.2.6-Agriculture.....	30
II.3-Evaluation environnementale de la zone d'étude (Pollution de l'air, de l'eau et du sol)...	32
II.3.1-Pollution de l'air.....	32
II.3.2-Pollution de l'eau.....	35
II.3.3-Pollution de sol.....	37
II.3.4-Impact socio-économique.....	38
II.4- Conclusion.....	39

Chapitre III. Approches scientifiques sur la réhabilitation des sites miniers

III.1-Introduction.....	40
III.2-La réhabilitation des sites miniers.....	41
III.2.1-Cas des mines à ciel ouvert.....	42
III.2.1.1 La mine à ciel ouvert de pyrite« Lousal Portugal ».....	42
III.2.1.2- La restauration du site minier de « Kettara » au Maroc.....	45
III.2.1.3-Réhabilitation des mines de bauxite « Jarrah » Australie.....	46
III.2.1.3.1-Les travaux de la réhabilitation.....	47
III.2.1.4-Trois sites de mines d'or réhabilités dans le Sud-Ouest du « Ghana ».....	50

III.2.1.5-La restauration réussie des anciennes mines Amazoniennes...	50
III.2.1.5.1-Restauration	51
III.2.1.6-Le Retour de la Vie : Réhabilitation et Restauration Écologique dans la Forêt Atlantique...	53
III.2.1.7-Tentative de réhabilitation des mines de charbon dans les Appalaches...	57
III.2.2-Cas des carrières.....	59
III.2.2.1-Étude morphologique pour la restauration d'une carrière de sable siliceux en « Espagne ».....	59
III.2.2.1.1-Réhabilitation.....	60
III.2.2.2-La Carrière de Mercure d'Ismail à Azzaba, Skikda : Un Appel Pressant à la Réhabilitation.....	62
III.2.2.3-Transplantation d'Espèces Menacées de Prairies Sèches dans d'Anciennes Carrières de Basalte : Exemple des Collines de České Středohoří en République Tchèque	63
III.2.2.4-Réhabilitation des talus rocheux d'une carrière abandonnée à « Ningbo, Chine », par la phytoremédiation.....	63
III.2.2.5-Transformation d'une carrière de granulats abandonnée en une installation de niveau international, stade 19 Mai 1956-Annaba Algérie.....	65
III.2.2.6-Végétalisation progressive d'une carrière de granulats au fil des travaux d'exploitation, El Fedjoudj , Guelma, Algérie.....	66
III.3-Solution attendus pour la réhabilitation des sites d'exploitation des carrières : restauration, aménagement, ré végétation du site.....	67
III.4-Conclusion.....	69

Chapitre IV. Matériels et méthodes

IV.1-Introduction.....	71
IV.2-Caractérisations physico-chimique.....	72
IV.2.1-Evaluation de la qualité de l'air	72

IV.2.2-Evaluation de la qualité de l'eau	76
IV.2.3-Analyse de sol en utilisant le MEB.....	76
IV.2.4-Analyse de Flore.....	78
IV.3-Résultats et Discussion.....	78
IV.3.1-Evaluation de la qualité de l'air.....	78
IV.3.2-Characterisation physico-chimique de l'eau	90
IV.3.3-Résultats des observations de l'échantillon de sol à différents grossissements à l'aide de microscope électronique à balayage	96
IV.3.4-Résultats des Analyses des plantes environnantes	103
IV.4-Perspectives d'un développement durable (économique, social et écologique).....	107
IV.4.1-Dimension économique.....	107
IV.4.2-Aspects sociaux.....	108
IV.4.3-Considérations environnementales	108
IV.5-Conclusion.....	109
CONCLUSION GENERALE.....	110
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	112

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	page
Figure 1-	Carte géographique de la wilaya de Guelma.....	2
Figure 2-	Situation géographique de la commune d'Héliopolis, wilaya de Guelma.....	2
Figure 3-	la situation géographique de la carrière d`agrégats d`Héliopolis, Guelma (Google Earth, 2024).....	3
Figure 4-	carte géologique de Guelma (Office national de la géologie, 1988).....	5
Figure 5-	Carte géologique d'Héliopolis, (modifiée par (F.Djedid).....	6
Figure 6-	Structure de l'Algérie du Nord-Est d`après (Vila J M, 1980).....	8
Figure 7-	Carte géologique de la région de Guelma et ses environs selon (VilaJ M, 1980).....	9
Figure 8-	Équipements utilisés dans les opérations d`exploitation et de traitement des agrégats dans la carrière d`Héliopolis.....	16
Figure 9-	Méthode d`exploitation d`une carrière de granulats.....	17
Figure 10-	a :Rose des vents à Guelma (2004-2013), obtenue par l`ONM ; b : La rose des vents de la région de Guelma («Meteobleu», 2024).....	22
Figure 11-	Une carte montrant les variations de températures dans la région d'Héliopolis.....	24
Figure 12-	Représentation graphique de l`oscillation thermique de la région de Guelma (Normales Et Records Climatologiques À Guelma - Infoclimat, 2023).....	25
Figure 13-	Graphique de la température maximale (en degrés Celsius) enregistrée chaque jour au cours d'une année, du 1er janvier 2022 au 31 décembre 2022... ..	25
Figure 14-	Un diagramme à barres et un graphique linéaire représentant les différentes statistiques mensuelles de précipitations à Guelma au cours de la saison 2021-2023 (Normales Et Records Climatologiques à Guelma - Infoclimat, 2023).....	27
Figure 15-	La zone d'Héliopolis est entourée de terres agricoles (faune et flore).	32

Figure 16-Les particules de poussière produites par la carrière de granulats à Héliopolis (opérations de broyage)...	33
Figure 17-Le transport des roches exploitées entraîne une pollution de l'air	33
Figure 18-Cartographie illustrant l'identification des zones d'exposition aux poussières de la carrière d'Héliopolis (Google maps modifiée par F.Djedid)	34
Figure 19-Les images (a, b et c, d) illustrent l'impact de la poussière dispersée par les opérations d'exploitation des granulats sur les plantes et les arbres proches de la carrière d'Héliopolis	35
Figure 20-L'eau de pluie s'accumule au fond de la carrière de granulats Héliopolis, formant des mares.....	36
Figure 21-Déchets de carrière à Héliopolis	37
Figure 22-Planification de la réhabilitation des sites miniers à ciel ouvert (Ahirwal et al., 2016).....	42
Figure 23-Construction du site de réhabilitation à l'aide des excavateurs et des bulldozers (Sánchez Donoso et al., 2023).....	43
Figure 24-Mettre en oeuvre des procédures de couverture du sol et de remédiation du DMA (Sánchez Donoso et al., 2023).....	44
Figure 25-A gauche, le bassin versant du ruissellement DMA en 2020. À droite, une observation du même bassin en 2022 après la réhabilitation (Sánchez Donoso et al., 2023).....	45
Figure 26-Drainage minier acide engendré par les rejets de la mine de Kettara au Maroc (Lghoul et al., 2012).....	45
Figure 27-La mine à ciel ouvert de bauxite, située au Sud-Ouest de l'Australie (Majer et al, 2014)	47
Figure 28-Les scrapers remettent en place la terre arable (Koch J. M, 2007)	48
Figure 29-Disposer des troncs d'arbres dans les zones restaurées afin de créer un environnement propice aux animaux (Koch J. M, 2007).	49
Figure 30-(a) Position géographique de l'Amazonie avec une végétation légèrement verdâtre, la forêt représentée en vert foncé et la région des mines actives affichée en orange. (b) la photo d'une mine à ciel ouvert étudiée au Brésil (König et al., 2022)	51

Figure 31- Localisation de la forêt atlantique, aussi connue sous le nom de Mata Atlântica (Forests, 2024).....	54
Figure 32- Lantana Camara parmi les plantes destinées au reboisement du site (Interview & Clergeat, 2019).	55
Figure 33- Pour servir la forêt, tout le monde se réunissait pour désherber (Interview & Clergeat, 2019).....	56
Figure 34- La transformation étonnante du site après sa réhabilitation (Interview & Clergeat, 2019).....	56
Figure 35- le trou important de la mine à ciel ouvert de charbon située dans les Appalaches aux États-Unis (2021)	57
Figure 36- Le retrait du sommet d'une montagne au niveau de la mine de charbon dans les Appalaches, Etats-Unis (2021).....	58
Figure 37- la carrière abandonnée avant restauration (A - Carte topographique, B Diagramme fonctionnel de la zone impactée, Sud-Ouest (programme SURFER 5.1) Les distances sont exprimées en mètre (Duque et al., 1998).....	60
Figure 38- Évolution morphologique du versant (Duque et al., 1998).....	61
Figure 39- Proposition de traitement des sols contaminés par le mercure, diagramme représentant la désorption thermique (Negm et al., 2020)	62
Figure 40- "Humulus scandens" est l'une des plantes grimpances sélectionnées (Chen et al., 2012).....	64
Figure 41- La densité de croissance de la plante Humulus scandens : c'est la raison pour laquelle elle a été choisie en raison de sa caractéristique grimpance (Humulus Scandens (HUMJA)[Photos] EPPO Global Database, 2024).....	64
Figure 42- Stade 19 Mai 1956, Annaba, Algérie, (Google maps, 2024).....	65
Figure 43- Revegetation par plantation des oliviers au cours des opérations d'exploitation au niveau de la carrière des agrégats SAPAM, El Fedjoudj, Guelma (photographie par F.Djedid)	66
Figure 44- Positions des stations d'échantillonnage de poussière dans la carrière d'Héliopolis («Google Maps », 2024)	72

Figure 45-détecteur de la qualité de l'air : Le compteur de qualité de l'air : un appareil multifonctionnel de mesure de la qualité de l'air PCE-RCM 8. Marque : « Fambasis »	73
Figure 46 -Diffractomètre à rayons X de paillasse type BRUKER D2 PHASER.....	73
Figure 47 -Spectromètre de fluorescence S8 LION, machine à rayons X dispersifs Bruker AXS, Allemagne.....	74
Figure 48 -Microscope électronique à balayage PHILIPS / FEI model QUANTA 250.....	75
Figure 49- tamis à maille de 1 mm, laboratoire LAVAMINE.....	76
Figure 50- les deux échantillons représentatifs de sol et de poussière minérale de la carrière d'Héliopolis	77
Figure 51 - Inhalation de poussières de carrières	80
Figure 52- Observation de la poussière à l'aide de MEB à différents grossissements	83
Figure 53 -Observation de « a zone entière 1 » par MEB avec un grossissement de 50 µm.....	84
Figure 54 - eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon poussière « Zone entière 1 »	86
Figure 55 - Observation de 'la zone pointée 1' par MEB avec un grossissement de 50 µm... .	87
Figure 56- Spectres EDS de la zone nommé 'Pointée'	87
Figure 57-Images d'un échantillon de sol de la carrière d'Héliopolis, observé à différents niveaux de grossissement à l'aide d'un microscope électronique à balayage	97
Figure 58- une image agrandie de 200 micromètres par MEB d'un échantillon de sol extrait de la carrière d'Héliopolis (zone entière 2).....	98
Figure 59- Spectre d'émission X par MEB : Composition Éléments du Sol (zone entière 2).....	99
Figure 60- la partie analysée dite « zone pointée 2 » selon un grossissement de 200µm.....	101
Figure 61 - Spectre représentant les composons chimique de la zone nommée « pointée 2 »	102

Figure 62 - Concentrations d'oxyde de calcium (CaO) dans des échantillons végétaux près de la carrière d'agrégats d'Héliopolis.....	104
Figure 63 - Concentrations de la silice et l'aluminium dans les échantillons de flore à proximité de site.....	105
Figure 64 - Les poussières de carrière ont des répercussions sur les écosystèmes naturels... ..	106
Figure 65- L'ampleur des effets de l'aluminium sur les plantules de <i>Cajanus cajan</i> (Cruz F. J. R, 2023).....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Numéro
Tableau 1 -	le montant total de la production annuelle de cette carrière de 2008 à 2011.....	19
Tableau 2 -	Vitesses du vent (Kt) enregistrées pendant l`année 2021 dans la région de Guelma (Bilan Climatique Annuel, Station Guelma, 2021)	23
Tableau 3 -	Températures enregistrées en 2021 pour la région de Guelma, avec (températures maximales et minimales, ainsi que les limites maximales observées), Station Guelma	26
Tableau 4 -	Précipitations enregistrées pendant l`année 2021 dans la région de Guelma (Bilan Climatique Annuel, Station Guelma, 2021)	28
Tableau 5 -	Distribution de la Surface Agricole Utile fournie par la direction des services agricoles de la wilaya de Guelma.....	30
Tableau 6 -	Distribution des terres agricoles (Kouahla, 2012).....	31
Tableau 7 -	Distribution des terres de la commune d`Héliopolis.....	31
Tableau 8 -	L`abondance de l`élevage bovine.....	31
Tableau 9 -	Evolution démographique d`Héliopolis dans les périodes (1998, 2004, 2005), (source des données d`après monographie Guelma 2004)	38
Tableau 10 -	Estimation de la distribution de la population en fonction des tranches d`âge	39
Tableau 11 -	Pourcentages relatifs aux diverses méthodes de régénération (plantée et naturelle) et aux origines des espèces (indigènes et exotiques), ainsi qu`à leurs combinaisons et la densité de tiges pendant 2009-2017 (König et al., 2022)	50
Tableau 12 -	Résultats obtenus à l'aide du moniteur de qualité de l'air	79
Tableau 13 -	Résultat d`analyse de la poussière par DRX.....	81
Tableau 14-	L`éléments détectés dans les échantillons de poussière à l`aide d`une analyse par FRX	82
Tableau 15 -	Les résultats d'analyse des poussières « zone entière 1 » obtenus par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX).....	85
Tableau 16 -	Compositions de l`échantillon poussière (zone pointée 1) par EDX.....	88

Tableau 17 - récapitulatif des analyses des échantillons d'eau de deux sources naturelles (A et B)	90
Tableau 18 - eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon de sol «zone entière 2», carrière d'Héliopolis	100
Tableau 19 - eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon sol dite « pointée 2 »	102

ABRÉVIATIONS ET SIGLES UTILISÉS

Notation	Désignation
AFNOR	Association Française de Normalisation
AVC	Accidents vasculaires cérébraux
CE	Conductivité
CONSTRUB-EST	Société de construction et du bâtiment de l'Est
COVT	Composés Organiques Volatils Totaux
DEI	Détonation Électrique Instantanée
DMA	Drainage Minier Acide
DRM	Détonation à Retard Multiple
DRX	La Diffractométrie de Rayons X
EDX	La Spectroscopie à dispersion d'énergie à l'échelle nanométrique
FRX	La Fluorescence des Rayons
X GFW	Global Forest Watch
Ha	Hectare
HCHO	Formaldéhyde
HCO3-	La teneur en bicarbonate dans l'eau Hm ³ Hectomètre cube
HUM	Humidité ISO International Organization for Standardization
LAVAMINE	Laboratoire de valorisation des ressources minières et environnement
ONM	Office National de Météorologie
m/s	Mètres Par Seconde
MES	Les Matières En Suspension
Mp	Moi-Pliocène
N.A	Normes Algériennes

NTU	Nephelometric Turbidity Units
OMS	Organisation mondiale de la santé
PM	les particules en suspension dans l'air
PM 1	les particules dont le diamètre est égal ou inférieur à 1 micromètre (μm)
PM 10	les particules dont le diamètre est égal ou inférieur à 10 micromètre (μm)
PM 2, 5	les particules dont le diamètre est égal inférieur à 2.5 micromètres (μm)
PST	particules en suspension totale
q	Quatenaire
RPPN	Réserve Particulière du Patrimoine Naturel
WWF	World Wide Fund for Nature
$\mu\text{S/cm}$	Micro-siemens Par Centimètre
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
EPA	Environmental Protection Agency

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'expansion des activités industrielles a entraîné des problématiques environnementales mondiales, notamment une augmentation de la pollution de l'air, des sols et des eaux (Peša & Ross, 2021). Les activités minières, qu'elles soient à ciel ouvert ou souterraines, à différents stades d'exploitation, présentent des risques importants pour l'environnement et la santé publique. Les mines et les carrières à ciel ouvert produisent des émissions de poussières élevées et provoquent des transformations radicales de l'environnement, susceptibles d'affecter la santé du système respiratoire. Par ailleurs, ces activités engendrent des effets négatifs sur les organismes vivants et les habitats, notamment par la migration des écosystèmes et la détérioration des écosystèmes locaux.

A cet effet, des solutions possibles pour le secteur des mines et des carrières seraient de restaurer et de réhabiliter les anciennes carrières et les sites miniers à des projets durables, tels que des investissements dans des espaces récréatifs comme des piscines en plein air, des arènes sportives et d'autres installations communautaires. Ou bien, nous pouvons simplement les transformer en destinations touristiques dans le cadre du patrimoine industriel (Edwards & Coit, 1996). Cela pourrait profiter à la population locale et aider à réduire l'impact négatif des activités industrielles sur l'environnement. Il convient de noter que, pour de nombreux pays, tels que l'Algérie, l'exploitation de carrières est un secteur économique important (Boutemedjet et al, 2019). Au contraire, le fait d'exploiter des carrières entraîne une transformation significative de la nature physique et biologique de la zone des carrières. Elle entraîne la destruction de la flore et de la faune, ce qui diminue la diversité biologique et perturbe de manière irréversible les relations écologiques essentielles (Pinto et al, 2001).

Il convient de noter que la plupart des produits que nous utilisons dans notre vie quotidienne sont dérivés des industries extractives, et cette tendance est susceptible de se poursuivre à l'avenir.

Dans les grandes nations, l'extraction de gravier joue un rôle essentiel dans l'économie. Par exemple, aux États-Unis, les recettes provenant de la production de matériaux de construction, de gravier et de sable ont dépassé 30 milliards de dollars. Les agrégats ont généré plus de 20 milliards de dollars en 2022, selon le ministère de l'Intérieur et la Commission géologique des États-Unis.

Quoiqu'il en soit, les ressources minérales sont cruciales pour le développement, elles se trouvent dans divers secteurs tels que les transports, l'alimentation, le verre, la céramique et les produits de haute technologie (Chenot J, 2018). Il en va de même pour l'extraction du gravier, un domaine qui joue un rôle important dans nos vies mais qui engendre malheureusement des effets graves qu'il ne faut pas négliger.

Les résultats de l'étude ont soulevé des préoccupations au sujet de l'environnement dans la région, en particulier en ce qui concerne la pollution atmosphérique. Les données recueillies par le Moniteur de la qualité de l'air montrent que les particules fines, appelées PM, sont présentes en concentrations variables dans différentes stations à cause des poussières provenant des carrières. Il a été scientifiquement prouvé que l'inhalation de ces particules est extrêmement dangereuse et peut entraîner le développement de nombreuses maladies. En outre, les

températures élevées, avec des lectures estivales dépassant 45,5 degrés Celsius à Guelma et Héliopolis (, en particulier dans la partie sud de la municipalité d'Héliopolis, et la direction et l'intensité du vent, jouent un rôle important dans le transport de ces particules de poussière nocives vers les zones voisines. Cette situation exige une attention et des mesures immédiates pour protéger la santé et le bien-être de la collectivité.

Donc, L'objectif principal de notre recherche est d'évaluer les répercussions environnementales des opérations d'extraction de granulats, en particulier celles de la carrière d'agrégats à Héliopolis, Guelma, sur les écosystèmes locaux. Cet objectif vise à déterminer les polluants spécifiques résultant de cette activité et leurs effets sur la qualité du sol, de l'eau et de l'air. Pour ce faire, nous utiliserons des dispositifs modernes et efficaces, tels que des capteurs de qualité de l'air et des équipements de diffraction des rayons X (DRX), de fluorescence X (FRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB), en plus d'analyses précises en laboratoire, incluant des analyses physico-chimiques à partir d'échantillons d'eau, de sol et de plantes.

La présente étude, menée sur l'impact environnemental de l'extraction de granulats, comporte quatre volets scientifiques, à savoir :

- Le premier chapitre concerne une analyse des conditions géologiques et minières de l'ensemble de la zone d'étude, notamment la ville de Guelma et ses environs.

- Dans le deuxième volet, nous avons étudié en particulier les répercussions de l'exploitation des carrières d'agrégats sur l'environnement. Ainsi, plusieurs études de cas confirment l'existence des effets environnementaux liés à une source unique, à savoir les activités d'extraction.

- la troisième partie de cette thèse expose plusieurs cas de réhabilitation de sites miniers et de carrières à travers le monde, certains ayant rencontré des obstacles, tandis que d'autres ont été couronnés de succès en agissant par l'application de la réglementation d'un développement durable.

- Quant au dernier volet de cette recherche scientifique liée à l'impact environnemental, il était orienté à l'aspect pratique et aux analyses de laboratoire que nous avons effectuées pour mettre en évidence l'étendue de la pollution dans la zone étudiée d'Héliopolis Guelma, qui pourrait avoir pour origine les activités d'exploitation de la carrière de granulats. Nous chercherons à répondre à plusieurs questions environnementales, notamment :

Quelles sont les principales conséquences environnementales des opérations d'extraction de granulats sur les écosystèmes environnants, et comment ces conséquences affectent-elles les plantes locales ainsi que la santé humaine ? Quelles mesures peuvent être prises pour diminuer cette pollution, et comment peut-on changer cette situation désastreuse en une situation plus saine, plus bénéfique pour l'environnement et la société ?

Chapitre I. Appréciation des conditions géologiques et minières

- I.1 Introduction
- I.2 Situation Géographique de la zone d`étude
- I.3 L`analyse de la géologie régionale
- I.4 Les caractéristiques des terrains
- I.5 Analyse de la stratigraphie
- I.6 Le contexte structurel
- I.7 Reconstitution géologique
- I.8 Analyse des plans d`exploitation de carrière de Guelma
- I.9 Equipements de traitement mécanique
- I.10 Méthode de traitement mécanique
- I.11 Conclusion

I.1 Introduction

L'évaluation des conditions géologiques et minières du site minier à exploiter est l'un des éléments essentiels de tous les projets d'exploitation minière. L'objectif de cette évaluation est de repérer les caractéristiques spécifiques du site, comme ses structures géologiques. Il s'agit d'un moment essentiel avant de commencer toute autre activité dans le cadre du projet. En outre, elle facilite la détection des ressources minières existantes les plus significatives et l'analyse des conséquences environnementales liées à leur exploitation. La compréhension de ces caractéristiques géologiques et minéralogiques est également d'une grande importance, car elle permet de déterminer la meilleure méthode pour le forage ou l'exploitation minière. L'absence de l'une de ces données entraîne une inexactitude dans la connaissance de la réserve de roche, ce qui empêche d'atteindre la masse minérale désirée (Tyo & Zeitinova, 2023).

La structure de l'Algérie se compose de quatre régions s'étendant de l'Ouest à l'Est et du Nord au Sud. On trouve l'Atlas tellien, puis les hautes plaines et les plateaux. En ce qui concerne l'Atlas saharien, c'est une longue chaîne s'étendant du Nord-Est à l'extrême Sud-Ouest, et enfin le Sahara (Erg oriental et Erg occidental), Située dans le Sud du pays, elle possède de grandes ressources pétrolières et gazières. La faille sud-atlasique sépare l'Algérie en deux unités tectoniques principales. Le Nord de l'Algérie porte l'empreinte de la tectonique alpine, tandis que la plateforme saharienne est plutôt stable (Géologie De L'Algérie, 1994).

La région de Guelma se distingue par sa diversité géologique tout au long de l'Histoire. En utilisant une carte géologique de la région de Guelma, il est possible d'identifier la géologie de la région, de connaître les différentes catégories de roches présentes, de comprendre les évolutions de la composition géologique au fil du temps et éventuellement de trouver des indices sur les ressources naturelles disponibles dans cette région. Donc, Dans cette section importante de la thèse, nous mettrons en évidence les structures géologiques et les principales structures minérales les plus importantes qui caractérisent la zone d'étude de Guelma. En raison de l'extrême importance de la clarification préalable des risques environnementaux et géologiques avant de s'engager dans diverses opérations d'exploitation minière. L'identification de ces caractéristiques contribue également directement à résoudre la confusion liée à la disponibilité des ressources naturelles dans la région, comme les minéraux. Le but de tout cela est de révéler les caractéristiques de la région de Guelma et d'Héliopolis, où se situe la carrière de granulats qui fait l'objet de nos travaux de recherche. De plus, nous discuterons des principales techniques minières utilisées dans l'extraction du gravier.

I.2 Situation Géographique de la zone d'étude

I.2.1 Localisation de Guelma

Guelma est située au Nord-Est de l'Algérie. Elle est bordée au Nord par la wilaya d'Annaba et de Skikda, à l'Est, par la wilaya d'El Tarf, au sud, par la wilaya de Souk Ahras et d'Oum Bouaghi, et à l'Ouest, elle est limitée par Constantine comme nous observons dans la figure 1.

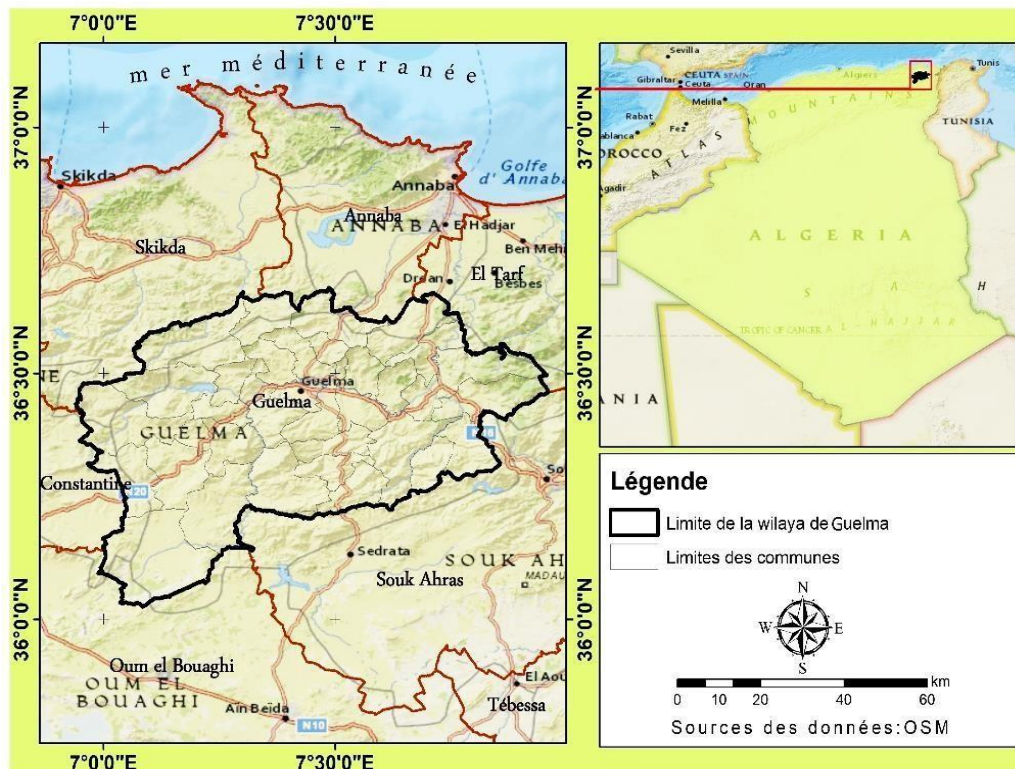


Figure 1-Carte géographique de la wilaya de Guelma

I.2.2 Localisation Locale (d'Héliopolis)

La ville d'Héliopolis est située au centre Nord de la wilaya de Guelma, bordée au Nord par et Bouati Mahmoud et au Nord-Est par Nechmaya. À l'Est se trouve Guelaat Bousbaa, à l' par El Fedjoudj, et elle est limitée au Sud par les villes de Guelma et au Sud-Est par Belkheir, comme montré dans la figure 2. Et elle s'étend sur une superficie de 76.87 Ouest km².

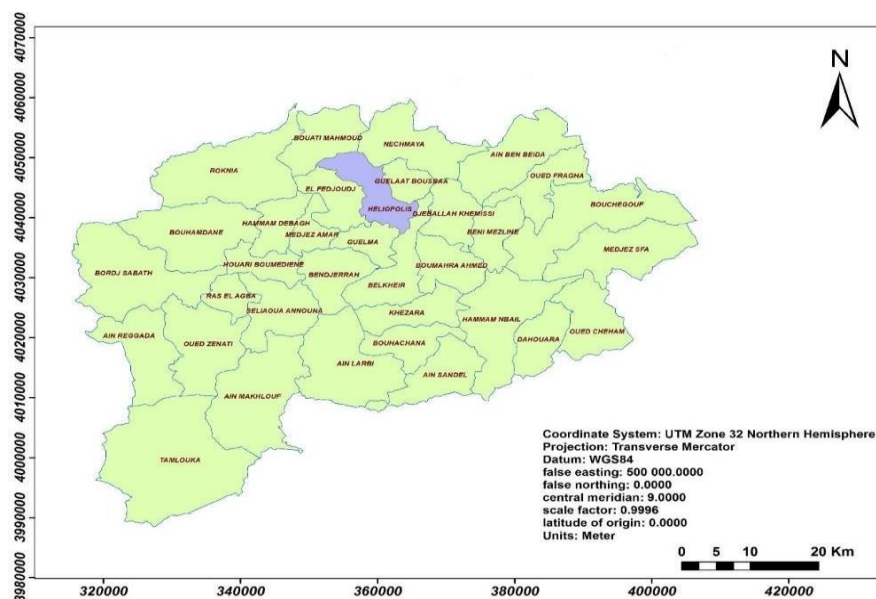


Figure 2-Situation géographique de la commune d'Héliopolis, wilaya de Guelma

I.2.3 Localisation de la carrière d'Héliopolis

La principale activité de l'unité de production d'agrégats, désormais appelée CONSTRUB-EST (Société de construction et du bâtiment de l'Est, EPE/SPA) consiste à fabriquer des agrégats pour les projets de construction et de travaux publics. Elle est située à Bouzitoune à une altitude de 362 mètres au-dessus du niveau de la mer ; le site où se situe le projet présente un terrain accidenté, environ 1 km Nord-Ouest de la ville d'Héliopolis (Kimour M, 2006). Au Nord de cette carrière se trouve Hammam Oued Ali. À l'Est, la ville d'Héliopolis est située avec Hammam Bradaa, tandis que la ville d'El Fedjoudj borde le côté Ouest de la carrière. Au Sud, on trouve la ville de Guelma comme nous constatons à la figure 3.

Les principales formations du site d'étude de Mechtet Bouzitoun sont constituées de calcaires et de calcaires marneux datant du Crétacé inférieur, comme l'a rapporté le bureau d'études qui a mené l'analyse, (Kouahla C, 2012).

En termes d'activité sismique la région où se trouve la carrière de granulats a été classée par le document technique réglementaire et la réglementation sismique algérienne comme étant une zone présentant une activité sismique modérée. (Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / Version 2003, 2003).



Figure 3 -la situation géographique de la carrière d'agrégats d'Héliopolis, Guelma (Google Earth, 2024)

I.3 L'analyse de la géologie régionale

L'Algérie est considérée comme un élément essentiel de l'Afrique du Nord, elle fait partie de la chaîne de montagnes des Maghrébides comme l'explique l'auteur Delga dans son livre, de la période tertiaire de la partie Sud de l'Espagne jusqu'au Calabro-sicilien (Delga M D, 1969). La ligne structurale présente des fissures indiquant la présence d'une couche géologique ancienne

formée entre les périodes secondaire et tertiaire. Cette ligne s'étend sur une distance de 2 000 kilomètres, d'Agadir au Maroc à Gabès en Tunisie (Faure-Muret & Choubert, 1971).

La région de Guelma est située dans le cadre géologique de l'Est de l'Algérie donc le cadre spatial de notre recherche appartient à la chaîne des Alpes orientales algériennes cette aire en particulier a déjà été le théâtre de mouvements tectoniques importants ayant conduit à la formation de plusieurs couches de terrains superposés datant du Miocène (VilaJ M, 1980).

I.3.1 La géologie de Guelma

D'après la carte géologique dans la figure 4 publiée par l'Office national géologique de la région de Guelma, la plupart de la région Nord-Est de crétacé supérieur et principalement sénonien en vert foncé dans la zone de Nechmaya et Guelaat Bousbaa. Dans la région Nord-Ouest, Le cénozoïque l'oligocène est réparti autour du Djebel Bezioun, ainsi que dans Djebel Aoura. Outre une large région du côté Est, comme le montre figure 4. Le cénozoïque miocène en orange foncé est présent dans les environs d'El Fedjoudj et la région d'étude Héliopolis, ainsi que dans le Nord d'Oued Seybouse et le Sud de Boumahra Ahmed.

En ce qui concerne la période Quaternaire, elle est principalement présente dans la zone de Guelma et ses environs, à Belkheir et au Nord d'Héliopolis, ainsi que le long de la ligne d'oued seybouse, avec quelques répartitions associées dans la partie Nord-Est.

Il y a des couches de sédiments du Crétacé inférieur depuis la période néocomienne, même si elles sont faibles, autour du sud de Djebel Aoura, jusqu'à l'ère vracono cénoomanien à l'extrémité ouest de la zone.

Sur la carte, le bleu pâle correspond à la période jurassique et est rare, à l'exception de la région Nord-Ouest, où se trouvent quelques dolomies noires (Cartes Géologiques Wilaya Guelma, 2022). Les plus anciennes formations géologiques sont concentrées dans la partie Sud-Est de la région et sont représentées par les couches de la période Trias en couleur mauve.

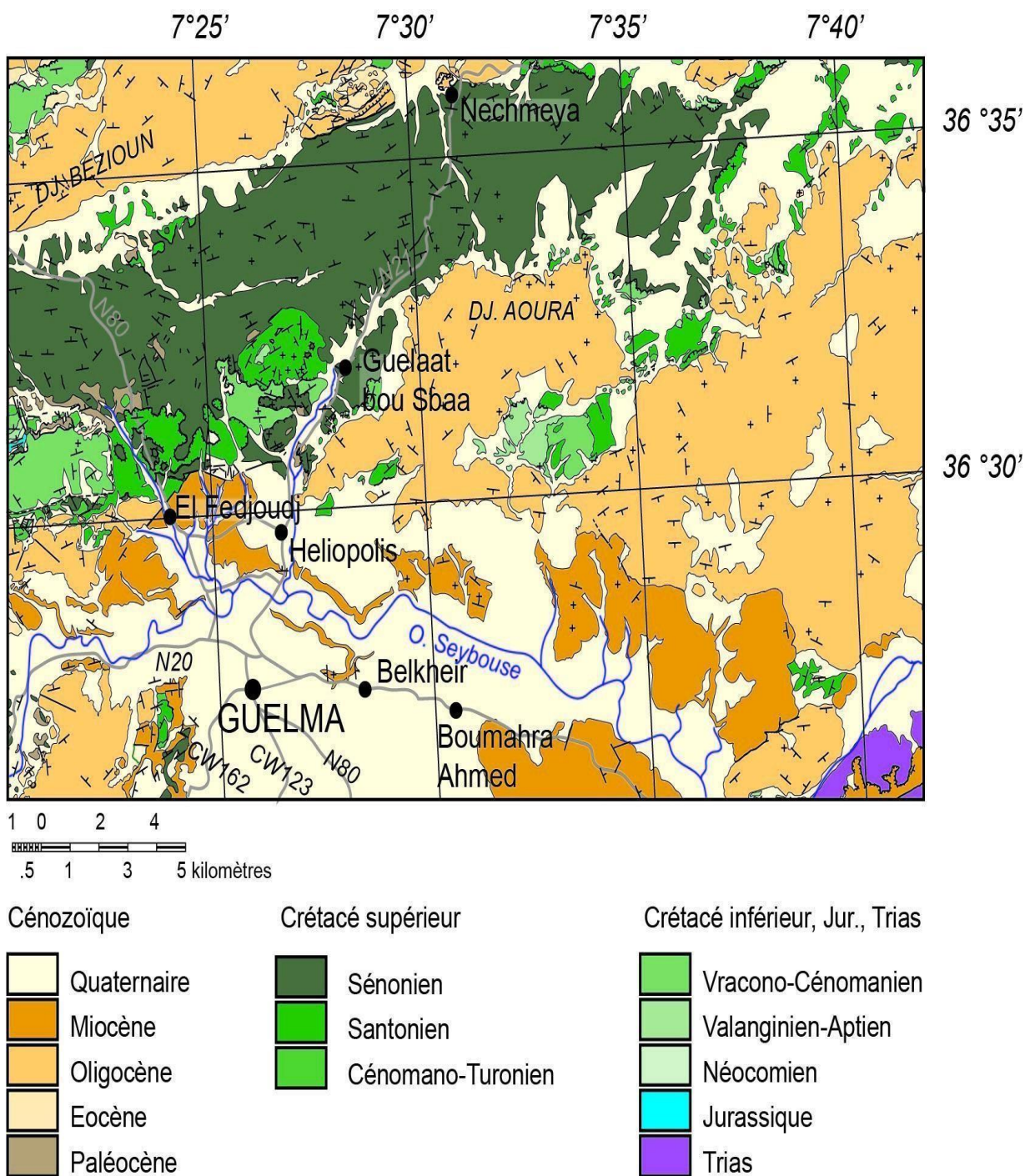


Figure 4-carte géologique de Guelma (Office national de la géologie, 1988)

I.3.2 La géologie d'Héliopolis (Locale)

Héliopolis présente une variété de formations géologiques sur différentes périodes, comme illustré sur la figure 5. Le côté Nord de la région est de l'Oligocène, tandis que vers le Sud, nous trouvons des zones quaternaires qui traversent les couches du Sénonien du Crétacé inférieur. La région est de la carrière de granulats d'Héliopolis est du Crétacé inférieur

santonien. L'emplacement d'Héliopolis est un plateau composé de roches de la période quaternaire. Des roches anciennes ont été découvertes à droite de la route nationale 21 lors des travaux d'excavation. Une prospection à 20 m de profondeur a révélé que les terres profondes sont constituées de formations du Paléocène moyen (grès argileux) et d'une couche de marnes modernes de 7 m d'épaisseur. Les collines des affleurements calcaires se trouvent au Nord- Ouest de la vallée, couvrant une surface légèrement plus grande que les niveaux de Sénonien du Crétacé inférieur (Kimour M, 2006).

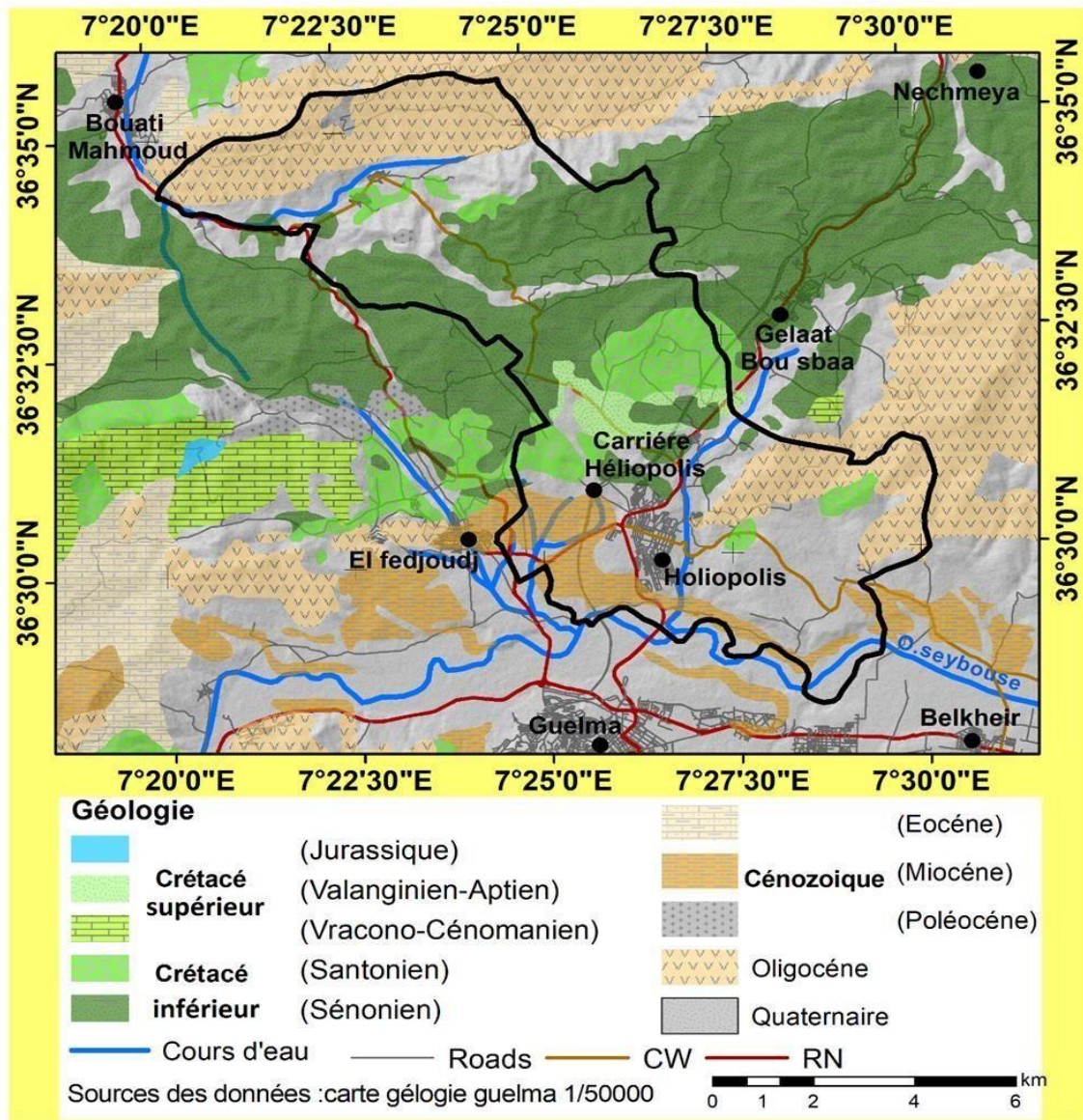


Figure 5-Carte géologique d'Héliopolis, (modifiée par (F.Djedid))

Concernant les caractéristiques des terrains, en général, les principales terres peuvent être classées en trois catégories distinctes, chacune selon sa composition naturelle : Tout d'abord, on trouve parmi elles :

I.3.3 Des terrains favorables à l'aménagement et à la construction

Ils se composent de blocs calcaires auxquels s'ajoutent de l'argile et du grès, recouverts d'une épaisse couche d'humus. Ces terrains sont principalement situés dans les secteurs Ouest et Nord de la ville.

I.3.4 Zone moyennement propice

Cette zone se compose d'un mélange d'argile et de marne, localisée à l'extrémité Sud-Est et à la partie nord-ouest de la zone d'étude. Cependant, elle est sujette à l'instabilité en raison des variations de débit d'eau.

I.3.5 Les terrains inadaptés

Ils sont considérés comme des terrains instables en raison de phénomènes tels que les mouvements de masse, les glissements, concernant ces compositions sont principalement constitués de marnes, d'argiles à gypse ou de marnes feuilletées sur des pentes très prononcées. Ils se trouvent principalement au sud de la zone d'étude, dominant l'Ouest de la Seybouse, ainsi que sur toute la façade Est de l'agglomération (Kouahla C, 2012).

I.4 Analyse de la stratigraphie

Le site d'étude Héliopolis Guelma est situé au sein du groupe géologique de Tell dans le Nord-Est de l'Algérie figure 6, plus précisément dans le bassin de Guelma. Dans cette discussion, nous explorerons sa définition sous différents angles. La région de Guelma est composée de multiples couches et de larges chevauchements, caractérisant ainsi une histoire géologique complexe (Zouak et al, 2014).

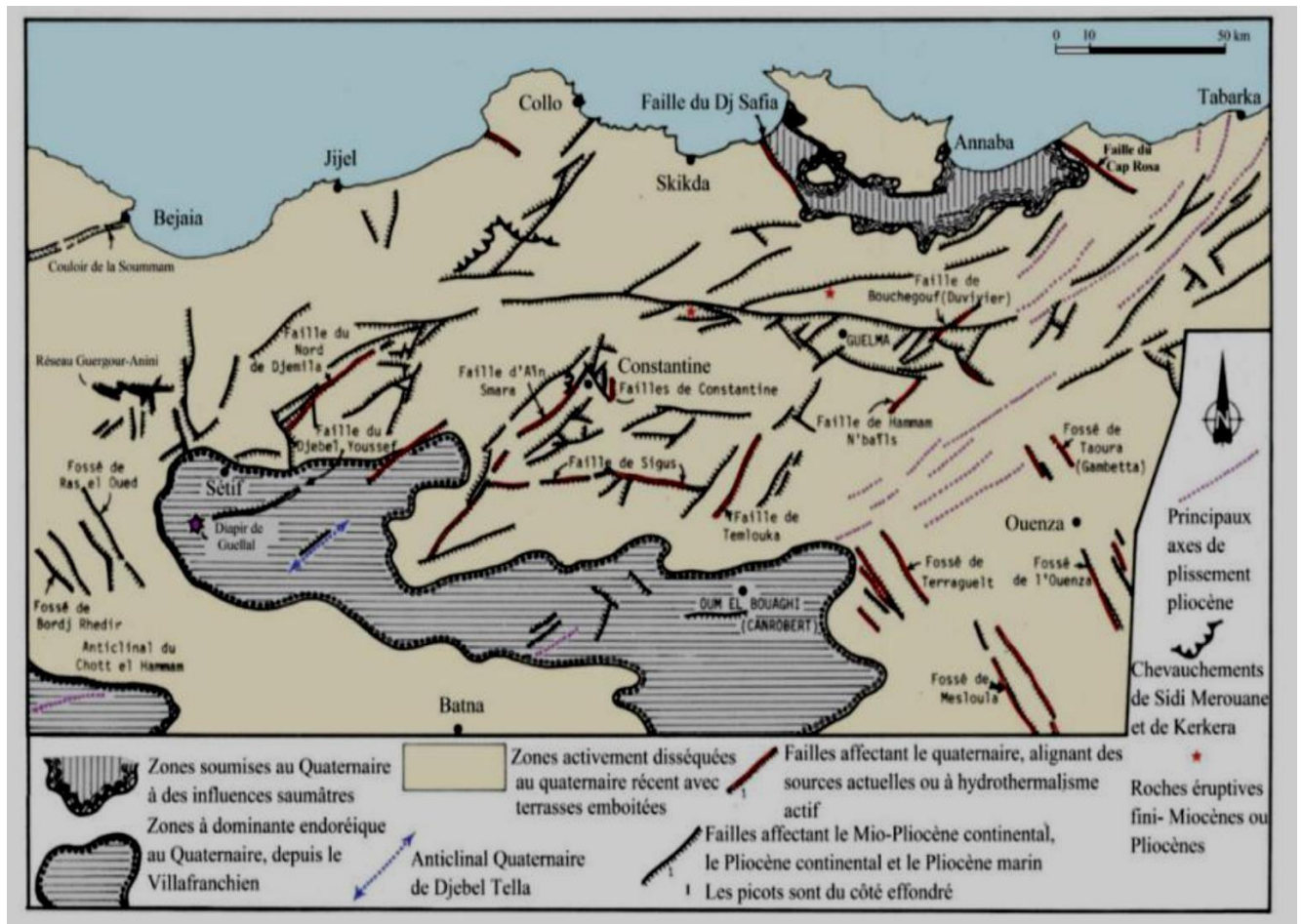


Figure 6-Structure de l'Algérie du Nord-Est d'après (Vila J M, 1980)

En plus de nombreuses autres datations et époques géologiques qui caractérisent ce domaine, que nous aborderons en détail dans cette partie importante de la thèse (Miocène marin transgressif indifférencié de la nappe tellienne et de leur avant pays allochtone, les nappes telliennes et les flyches mauritaniens, les nappes ultra telliennes... etc.).

Les études géophysique hydrologiques menées dans cette région ont mis en évidence que la structure prédominante dans la zone d'étude d'Héliopolis, ainsi que dans la plupart de ces zones, est constituée de calcaire, ce qui favorise la formation d'aquifères en raison de son avantage hydrogéologique (Mebarka, 2016). Il est bien établi que cette zone est célèbre pour ses activités minières substantielles, y compris l'exploitation de carrières de gravier, ce qui augmente le risque de contamination des eaux souterraines. Dans le même contexte, le calcaire néritique constitue les formations carbonatées du Groupe du Nord-Est. Cette section de El Fedjoudj et d'Héliopolis est principalement composée de calcaires biogéniques ou micritiques ainsi que de calcaires dolomitiques (Benmarce, 2016), et pourrait former un aquifère, comme l'explique l'auteur dans son article sur les définitions des eaux souterraines (Bakalowicz, & Mangin, 1980).

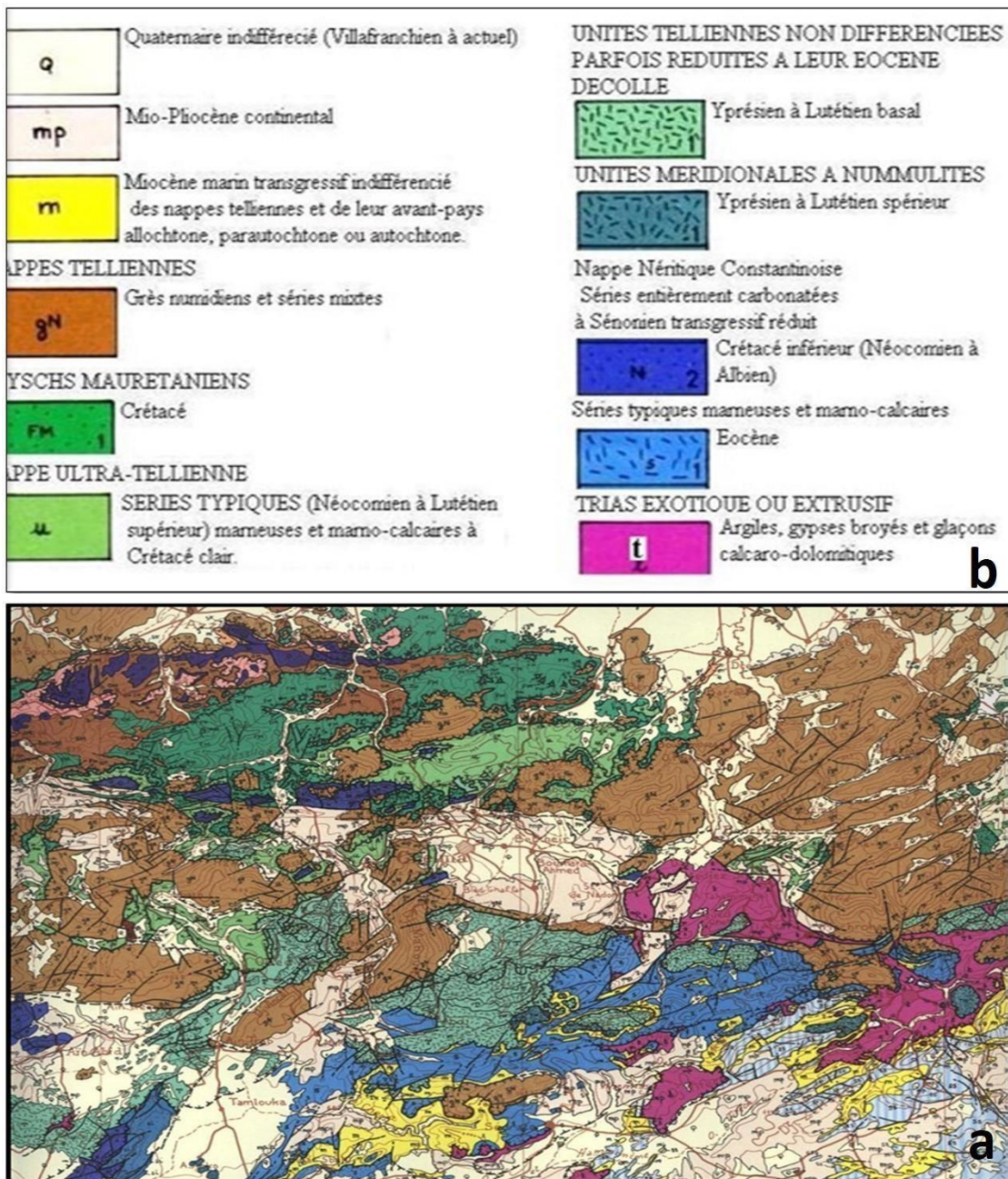


Figure 7-Carte géologique de la région de Guelma et ses environs selon (VilaJ M, 1980)

Les figures 6 et 7 au-dessus illustrent la diversité géologique de la région de Guelma. D'après Vila. Cette variété remonte à la période quaternaire (q) et moi-pliocène continentale (mp) ce comprend des zones telles que la région de Belkheir, Bouhamra Ahmed, certaines parties de la ville de Guelma, douar Bousbaa, Hammam Baradaa, et Héliopolis.

I.4.1 Les formations les plus récentes de la région de Guelma :

I.4.1.1 Quaternaire

Des dépôts quaternaires se trouvent dans l'oued Seybouse et correspondent aux terrasses décrites ci-dessous :

I.4.1.1.1 La terrasse basse

Les alluvions provenant du fond de la vallée de Seybouse forment la terrasse basse, connue sous le nom de Soltanien, et ont une épaisseur d'environ 15 mètres, composée de galets gris ou bruns, ainsi que de limon.

I.4.1.1.2 La terrasse médiane

Cette terrasse se trouve à 50 mètres d'altitude au niveau de l'oued, On y trouve du limon, du sable et des blocs roulés dans une matrice d'argile d'un beige foncé.

I.4.1.1.3 La terrasse supérieure (Saletien)

Selon (Vila J M, 1980) Ces formations s'étendent sur une pente au Djebel de Zamzuma au Nord, il est constitué de galets de RANA avec une grande taille et peut atteindre une épaisseur allant jusqu'à 100 mètres. Au Sud, il existe de vastes zones contenant des calcaires lacustres et des tufs datant du Pliocène supérieur au début du Quaternaire. Les croûtes calcaires que l'on retrouve également au cœur d'Héliopolis sont parfois tufeuses ou massives, caractérisées par une couleur grisâtre.

I.4.1.2 Mio-Pliocène

Plus au Sud de Guelma et à l'Est, on peut observer une dense séquence d'interstades composée de sable et de limon. Le Mio-Pliocène s'agit de couches minces d'argiles de couleur grise avec des intercalations de marno-calcaires et de gypse. Les argiles et les conglomérats rouges les recouvrent.

I.4.2 Les formations stratigraphiques les plus anciennes de la région : "le domaine allochtone"

I.4.2.1 La nappe numidienne

D'après (Lahondère et al, 1979) cette nappe elle compose les sommets des reliefs, notamment le Djebel Beni Mezline et Mahouna, en plus du Djebel Haouara. Elle se caractérise par la présence d'un faciès argileux et gréseux d'époque Oligocène.

I.4.2.2 La nappe des Flyschs

Les formations associées au domaine des flysch au niveau de Djebel Houara apparaissent sous la surface ou bien la composition argilo-gréseuse de la nappe numidienne Comme nous l'avons noté précédemment. Ces formations comprennent :

I.4.2.2.1 Sénonien

Selon (Vila J M, 1966), Ces formations sont du flysch et sont visibles sur les pentes occidentales de la route nationale 21. Il s'agit d'une série conglomératique argileuse d'une épaisseur d'environ 50 mètres, En ce qui concerne la microfaune, le chercheur Vila J M a signalé avoir retrouvé le type de (*Globotruncana Sheegansi*).

I.4.2.2.2 Cénomaniens – Turonien

Il est caractérisé par des niveaux de brèches claires bien définis, organisés en bancs avec des bandes de silice blanche. Ces strates sont datées par la présence de fossiles tels que *Globotruncana helvetica*, *Rotalipora* sp (Kimour M, 2006).

I.4.2.2.3 Crétacé inférieur

Ces formations sont localisées au sud de la pointe orientale du Djebel Debar. Le système de base, constitué de calcaires fins, est caractérisé par une série de biomicrites claires en petits bancs très plissés, contenant des *Nannoconus*.

I.4.2.3 La nappe tellienne

Elle se compose d'une importante succession de marnes, principalement issues du sillon. Cette formation se situe dans le domaine tellien externe, qui est principalement constitué de roches paléogènes. Donc il y a trois principales unités sont identifiables :

I.4.2.3.1 La nappe ultra-tellienne

C'est une série géologique caractérisée par la prédominance des photofacies. Le terme "ultra-tellien" désigne ces séries qui se superposent de manière inhabituelle à la période crétacée néritique constantinoise à Guelma, notamment à Douar Bouzitoun et au Djebel Debbar (Durand Delga, 1969).

I.4.2.3.1.1 La nappe ultra-tellienne du Djebel Haouara

Il s'agit souvent d'une alternance de marnes de couleur distinctive, beige jaunâtre, associées à du calcaire marneux. Quant à l'âge de la série, il se situe entre le Barrémien supérieur et le Sénonien inférieur. Ces affleurements s'étendent entre plusieurs forêts, dont la forêt de Beni Mezlin, la forêt de Beni Ahmed et le mont Hawara (Kimour M, 2006).

I.4.2.3.1.2 La nappe ultra-tellienne de Djebel Bousbaa

Il existe des types de micro-organismes notés des "microfaunes" répartis dans certaines zones comme l'orientale de la rivière Seybouse. Largement répandues autour du Djebel Bousbaa,

(C'était la raison pour laquelle elle était nommée la nappe de Bousbaa.), et en plus du Sud-Ouest de de Guelma et de Nador. Selon (Vila et al, 1968), on y trouve de nombreuses espèces, dont : *G.cf. Velascoensis* et *Truncorotalia Gr.* Concernant l'âge de cette série, elle remonte à Aptien et Lutétien.

I.4.2.3.2 Les unités telliennes sensu stricto (s.s) I.4.2.3.2.1 La nappe tellienne de Hammam Ouled Ali

D'après (Vila J M, 1971), on la distingue en notant la prédominance de taches sombres sur les surfaces des faciès, de sorte que la microfaune présente en son sein est représentée par : *Hedbergella Washitensis*, *Globotruncana stuartiformis* et *Rotalipora sp.* Cette couche est située sous la nappe ultra-tellienne de Bousbaa mentionnée précédemment, et sur les terres appartenant à la nappe néritique constantinoise, que nous expliquerons plus tard.

I.4.2.3.2.2 La nappe tellienne de la zone Sellaoua Announa et de Ras El Agba

Il fait partie du domaine tellien externe du paléogène, divisé en deux sous-classes :

I.4.2.3.2.2.1 L'unité tellienne à Globigérines

Cette unité se compose par des marnes noires avec des débris d'huîtres et des sphères jaunes carbonatées de Lutétien de niveau inférieur au niveau de Kef Errih, en plus des marnes du Paléocène elle continue des calcaires en bancs à Globigérines et a lumachelles d'un Yprésien (Benmarce, 2016).

I.4.2.3.2.2.2 L'unité tellienne à Nummulites

Cette unité, elle se constitue avec une forte série de marnes à sphères de couleur jaune de lutétien à huîtres environnant Djebel Bardou au-dessus des marnes noires du Paléogène et sur un calcaire massif à fossiles de Nummulites d'un Éocène (Wildi, 1983).

I.4.3 Le domaine para-autochtone se définit par les unités géologiques suivantes

I.4.3.1 La nappe néritique constantinoise

La néotectonique a fragmenté les affleurements de ces séries en massifs isolés avec des tailles diverses. L'auteur Vila Dans sa thèse (Vila J M, 1980), elle a étudié cette partie des massifs rocheux et les a divisés en plusieurs groupes, dont le groupe oriental A, qui inclut les zones d'Héliopolis, Hammam al-Maskoutine, Jebel Taya, et d'autres.

Ils sont de taille variable et proviennent de carbonates datant généralement de l'ère Mésozoïque (Zouak et al, 2014). Et à propos de Vila, nous en discuterons en détails. Donc il stratigraphie ces massifs à l'aide de microfaciès afin de mieux comprendre la structure géologique, on distingue :

I.4.3.1.1 Les massifs du groupe nord oriental

À la station de Nador on observe uniquement un corridor Jurassique-Crétacé avec des niveaux de Favreina Salevensis et F. Prusensis sur un ensemble de couches de grès rouge attribuées au Trias moyen et supérieur de la station.

Concernant Djebel El Kalaa : La présence de microfaciers Sabaudia minuta et Nautiloculina sont des signes qui indiquent Aptien. Les orbitales roulées et les melobecies sp se trouvent dans la partie inférieure du Cénomaniens Vraconien.

Héliopolis et douar Bouzitoune Et à côté de la piscine romaine d'Héliopolis : on trouve une série bien plus exhaustive où sont inscrites les dates

Aptien supérieur, vraconien -cenomanien inférieur, et senonien.

Quant au côté de Hammam Ouled Ali, sous les couches marno-calcaires de la série ultra-tellienne, une ouverture sur une série de faciès carbonatés biodétriques d'âge sénonien se dévoile

à l'Est de la station thermale de Hammam Ouled Ali.

Le côté Est de Djebel Debbar est principalement formé durant les périodes du Jurassique et du Crétacé. Les roches autochtones sont principalement carbonatées.

De haut en bas, on peut observer:

I.4.3.1.1.1 Les couches de silice

Elles sont concentrées dans les zones de friction entre les calcaires à silex du Sénonien supérieur et ceux de l'Éocène. Elles sont composées de roches riches en minéraux, mais présentant des couches fines en raison de silicates.

I.4.3.1.1.2 Calcaire organique massif

La présence de calcaires massifs à D'ARCH remonte au Campanien.

I.4.3.1.1.3 Les dolomites

Enfin, on trouve des dolomites cristallines noires centrées à la base, dont l'épaisseur dépasse les deux cents mètres.

I.5 Le contexte structural

I.5.1 La phase "atlasique" du fini-éocène

La structure de la zone d'étude de Guelma découle d'une série d'activités tectoniques.

Les différentes étapes mises en évidence peuvent être succinctement résumées comme suit :

Cette phase est à l'origine de la formation des flyschs et des nappes telliennes, marquant ainsi la conclusion d'un cycle sédimentaire important dans le bassin maghrébin, qui débute avec les dépôts du Trias supérieur jusqu'au Lutétien.

I.5.2 La phase inférieure du Miocène

Les couches telliennes sont transportées et s'effritent vers l'avant-pays. À cause de cette phase donc, elle est responsable de la naissance de l'édifice actuel et Le démantèlement de la région avancée.

I.5.3 La phase post-nappe (tectonique)

Le bassin de Guelma a connu plusieurs processus de remplissage en raison de la tectonique, la raison pour laquelle nous observons des sources thermiques localisées le long de failles directionnelles nord-est - sud-ouest. D'après (Vila J M, 1980) la région a connu une série de déformations depuis le Tortonien jusqu'à nos jours. En conséquence, ces événements ont créé un impressionnant réseau de failles de direction atlasique. La faille délimitant la limite nord du bassin de Guelma (Mio-Pliocène) s'étend selon un axe Est-Ouest, recoupant des failles plus petites.

I.6 Reconstitution géologique

Les événements qui ont donné naissance au bassin actuel de Guelma :

La formation actuelle de la zone est due à l'influence de la pression structurelle et à l'invasion marine du Miocène. Dans le sillon écaillé de Sellaoua, les unités telliennes allochtones se sont installées. Par la suite, les formations numides du Miocène supérieur apparaissent. La mer du Miocène se retire en même temps que les mouvements de réajustement structurel. Les terrasses se sont formées en raison de l'érosion continue au fil du temps (Origine et expansion du bassin au Miocène supérieur. Évolution du bassin et formation de la vallée de Seybouse au Plio-Quaternaire. Flux et érosion du bassin au Quaternaire. Les alluvions se déposent dans le Quaternaire récent).

I.7 Analyse des plans d'exploitation de carrière de Guelma

I.7.1 Présentation de la société CONSTRUB-Est (Ex GREPCO)

Dix ans après l'indépendance, l'entreprise REAL SIDER a commencé à préparer l'exploitation de la carrière de granulats et matériaux de construction d'Héliopolis à Guelma avec des tailles diversifiées (0/3, 5/8, 15/25 mm), en installant la station de concassage NCPJ et en construisant la station DRAGON, mise en service à la fin des années soixante-dix (Kimour M, 2006). Ces installations faisaient alors partie du groupe GREPCO, dont le nom a été changé par la suite en CONSTRUB-Est. Donc, Cette unité est constituée de :

- 1- Zone minière (zone à exploiter).
- 2- Service de gestion (comprend 5 bureaux)
- 3- Le service commercial (un seul bureau)
- 4- Matériel de travail.
- 5- Centre de maintenance pour les stations et les véhicules de l'unité (deux ateliers).
- 6- Au niveau du traitement, on peut observer des constructions en béton armé qui sont utilisées pour soutenir l'installation de concassage et les différents équipements qui y sont associé (Djeribi D, 2012).

Le gisement Bouzitoune est situé sur une surface de 30 hectares et 22 Ares (Kouahla C, 2012). Le territoire de cette région est bordé par des terres agricoles de toutes parts. Cela suscite des inquiétudes quant à la contamination de ces zones sensibles et très proches par diverses activités d'exploitation de carrières. Quant à la route d'accès, une piste de 1 000 m de long et 7 m de large permet d'atteindre le site.

Concernant le carburant utilisé, les différents mécanismes sont alimentés au diesel, ce qui entraîne une consommation moyenne de carburant de 1500 litres par jour. Concernant la consommation quotidienne d'huiles, les responsables ont indiqué qu'elle ne dépasse pas 50 litres par jour et 20 kilogrammes de graisses. L'utilisation de lubrifiants et d'huiles est essentielle, notamment pour l'entretien des machines et des installations de concassage. Ils sont livrés régulièrement sur place dans de grands fûts de 2000 litres. Concernant Les travaux d'entretien

s'effectuent principalement à l'extérieur, sauf en période de pluie. Il est recommandé d'effectuer les travaux d'entretien à l'intérieur pour éviter la pollution causée par les eaux de pluie, qui peuvent transporter dans le sol des résidus d'huile et des déchets mécaniques des machines.

L'un des inconvénients du site est l'épaisseur excessive de la couche de déchets de la nature argileuse, qui dépasse les deux mètres. La carrière a une forme de sac étroit et comprend six gradins dont un pont, un front de taille et un pied. Concernant les dimensions du gisement, il a une longueur de 920 m, une largeur de 600 m et une profondeur de 80 m. Les roches présentent une stabilité satisfaisante avec une fissuration moyenne (Kimour M, 2006).

I.7.2 Equipements de production

Les équipements de production (figure8) présents dans cette usine sont les suivants :

I.7.2.1 Matériel de travaux de préparation

La carrière dispose d'un seul bulldozer type de KOMATSU D155 A

I.7.2.2 Matériels de travaux d'extractions

La carrière d'Héliopolis elle est équipée d'une seule unité de forage de type (A/COPSO 17), un engin de forage A/COSPO 405, une pelle brise roche de type CAT 320 C et une autre pelle de type ENMTP 9210 ATLAS COPSO BM 1000, en plus d'une seule compresseur A/COPSO XRH350/ CAT H 130 S (Djeribi D, 2012).

I.7.2.3 Matériels des opérations de chargement

L'entreprise possède également deux chargeuses KOMATSU WA600 ainsi qu'une chargeuse CAT en condition moyenne.

I.7.2.4 Equipement de transport

Il y a trois Dumpers KOMATSU HD325 et deux Dumpers TEREX TA27.

I.7.2.5 Matériels de concassage et de traitement

Le système de traitement comprend une station complète DRAGON d'une capacité de 250 tonnes par heure, une station de concassage complète NCJP d'une capacité de 200 tonnes par heure, et une station ENCC 50 T/H pour le recyclage des produits en fractions.

I.7.2.6 Matériel de commercialisation

Le produit fini est commercialisé en utilisant les silos de stockage des stations DRAGON et NCJP, ainsi que le chargeur FOTON FL 956 F.



Figure 8 - Équipements utilisés dans les opérations d'exploitation et de traitement des agrégats dans la carrière d'Héliopolis

I.7.3 Mode d'ouverture

Dans notre cas, les opérations minières sont effectuées par la méthode à ciel ouvert comme marquer l'illustration dans la figure 9, ce mode d'exploitation nécessite une intervention mécanique conforme à des normes précises, depuis les niveaux supérieurs jusqu'à la base, à l'aide

de gradins dont les hauteurs varient d'une carrière à l'autre. En général, ces hauteurs varient de dix à quinze mètres au maximum en considérant les aspects positifs de cette méthode d'extraction, il est possible d'affirmer que, comparativement aux techniques d'exploitation minière souterraine, l'exploitation minière à ciel ouvert représente une approche plus rentable et plus exigeante en capital, favorisant une productivité supérieure (Arteaga et al., 2014). En revanche, du côté négatif, les impacts environnementaux qui en découlent sont plus prononcés par rapport à ceux de l'exploitation minière souterraine (Enrera R., 2022).

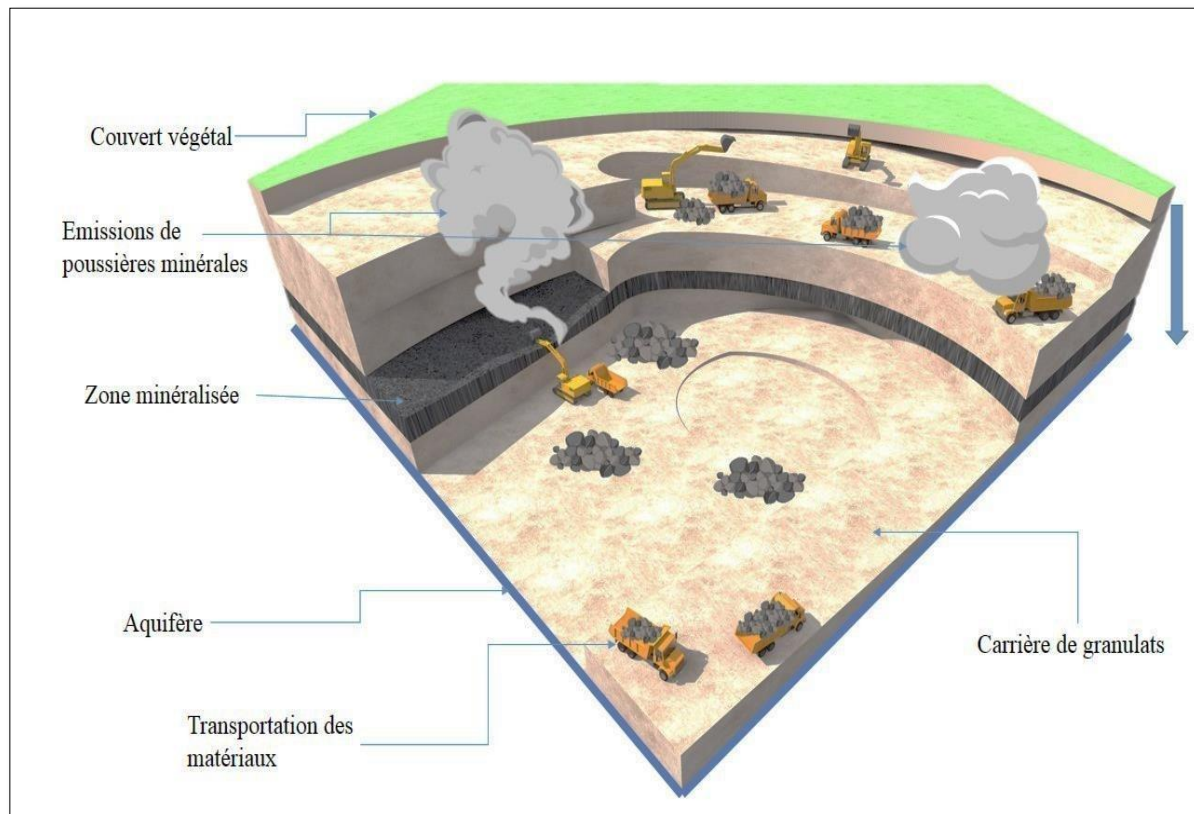


Figure 9 - Méthode d'exploitation d'une carrière de granulats

Dans notre cas, les opérations minières sont effectuées par la méthode à ciel ouvert comme marquer l'illustration dans la figure précédente, ce mode d'exploitation nécessite une intervention mécanique conforme à des normes précises, depuis les niveaux supérieurs jusqu'à la base, à l'aide de gradins dont les hauteurs varient d'une carrière à l'autre. En général, ces hauteurs varient de dix à quinze mètres au maximum en considérant les aspects positifs de cette méthode d'extraction, il est possible d'affirmer que, comparativement aux techniques d'exploitation minière souterraine, l'exploitation minière à ciel ouvert représente une approche plus rentable et plus exigeante en capital, favorisant une productivité supérieure (Arteaga et al., 2014). En revanche, du côté négatif, les impacts environnementaux qui en découlent sont plus prononcés par rapport à ceux de l'exploitation minière souterraine (Enrera R., 2022).

I.7.4 Extraction des matériaux

Cette méthode d'exploitation inclut les étapes suivantes :

I.7.4.1 Prospection/Découverte

Les opérations de découverte au niveau de la carrière d'agrégats d'Héliopolis sont menées à l'aide d'un bulldozer KOMATSU D155 A selon les nécessités des opérations d'exploitation (Djeribi D, 2012).

I.7.4.2 L'extraction

Le forage et le dynamitage sont des méthodes d'excavation utilisées pour briser la roche. Cela implique de creuser des trous à l'aide d'outils d'excavation spécialisés tels qu'un chariot de forage équipé d'un compacteur. Le processus suit un plan de tir approuvé par le Ministère des Mines et de l'Industrie ainsi que par le service de la wilaya de Guelma. Après le forage, la zone minéralisée est dynamitée pour obtenir des roches ayant des dimensions allant de 0 à 1500 mm. Les roches dépassant 1000 mm sont transportées pour être soumises à une procédure de débitage secondaire réalisée par une pelle brise-roche (rock crusher). Dans cette carrière de granulat, le mode de tir utilisé est électrique à DRM et DEI. Les caractéristiques essentielles des tirs effectués dans cette carrière sont tout d'abord le type de l'explosif utilisé est le MARMNIT III. En ce qui concerne la quantité d'explosifs, elle varie de 10 à 45 kg d'un trou à l'autre (Kouahla C, 2012).

Par ailleurs, la matière explosive est utilisée dès sa réception. Il est primordial de veiller à ce que le processus de tir soit entièrement achevé afin de garantir la sécurité. Ce qui concerne le front de taille il est constitué de 5 gradins de 18 m de hauteur.

I.7.4.3 Chargement

Le chargement de la roche abattue est effectué à l'aide de deux chargeurs à pneus de marque KOMATSU WA 600 et d'un autre chargeur CAT.

I.7.4.4 Transport

Cette opération implique l'utilisation de 2 camions TEREX TA 27 DUMPERS et 3 camions KOMATSU HD325 DUMPERS pour transporter la roche concassée jusqu'aux stations de concassage.

I.8 Equipements de traitement mécanique

Le traitement proprement dit est un processus mécanique comprenant trois installations de concassage. Commençons par décrire :

I.8.1 La station NCPJ (150 T/H)

Cette installation est constituée de trois stations :

I.8.1.1 Station primaire

Elle comprend un dispositif appelé goulotte, dont la mission est de guider et de diriger le flux des matériaux rocheux à travers le concasseur afin d'assurer un écoulement fluide des roches et d'éviter les colmatages. Elle inclut également un concasseur à mâchoires et, enfin, trois bandes transporteuses pour acheminer les roches concassées.

I.8.1.2 Station secondaire

Concernant cette station elle comprend un tapis transporteur vibrant pour les pierres, un crible, en plus d'un broyeur rotatif (giratoire).

I.8.1.3 Station tertiaire

Quant à la troisième station, elle est composée de quatre tapis transporteurs de pierres, en plus

d'un concasseur rotatif, de deux cribles et de six trémies de stockage.

I.8.2 Station DRAGON (250T/H)

Cette machine est constituée de deux stations fondamentales :

I.8.2.1 Station primaire

Celle-là comprend une goulotte de déchargement de roches, un tablier minéral, un crible, un concasseur à mâchoires et trois bandes transporteuses de roches.

I.8.2.2 Station secondaires

Quatre convoyeurs à bande, deux tamis et un broyeur font partie de cette station.

I.8.3 L'installation ENCC (50 T)

Comprend un appareil vibreur, six convoyeurs à bandes, un crible et un broyeur giratoire. Cette installation vise à recycler les granulométries de 15/30 et 30/60.

I.9 Méthode de traitement mécanique

Au début du traitement mécanique des granulats, il est nécessaire de procéder à une présélection qualitative afin d'éliminer les substances stériles. Par la suite, on procède au concassage primaire, où les roches de tailles allant de 0 à 1000 mm seront acheminées dans le flux de la station primaire. Elles seront ensuite passées par une cible secondaire, puis un premier criblage, puis un second pour obtenir les granulométries nécessaires pour les produits finaux. Fréquemment, des particules plus grandes que celles des mailles du premier criblage sont recyclées (Djeribi D, 2012).

Le tableau ci-dessous présente le montant total de la production annuelle de cette carrière de 2008 à 2011. Malheureusement, nous n'avons pas pu obtenir les statistiques les plus récentes en raison d'explications peu convaincantes de la part des autorités concernées.

Tableau 1 - le montant total de la production annuelle de cette carrière d'Héliopolis de 2008 à 2011

Année	Production (T)
2008	193074.48
2009	222892.06
2010	216472.84
2011	161746.5

I.10 Conclusion

Guelma et ses environs présentent des formations géologiques diversifiées en raison des nombreuses activités tectoniques qu'ils ont subies. En effet, la zone d'étude est située dans la

région externe des Maghrébides, dans l'Est de l'Algérie, une région qui a connu, au fil du temps, diverses formations géologiques et périodes allant du Trias au Quaternaire.

La région représente une dépression de bassin qui s'étend d'Est en Ouest, où s'accumulent des dépôts tertiaires et quaternaires. L'ensemble du bassin est constitué de marnes et de carbonates méso cénozoïques, avec une sédimentation en mer ouverte dans le domaine pélagique. La présente étude porte sur des formations néritiques constantinoises, notamment les zones d'affleurement situées à Djebel Débar, Hammam Ouled Ali et Nador, ainsi que sur notre zone d'étude, Héliopolis (Vila J. M., 1980 ; Kimour, M., 2006 ; Benmarce, 2016). Le mode d'exploitation de la carrière Héliopolis s'effectue à ciel ouvert, ou en surface, au moyen de machines lourdes et d'engins dédiés à l'extraction des roches et à leur transport vers les stations de traitement (concassage et broyage), afin de produire des pierres de gravier répondant aux exigences relatives à la taille et à la qualité.

Chapitre II. Analyse d'impact de l'exploitation des carrières d'agrégats sur l'environnement

II.1 Introduction

II.2 Climatologie de la région

II.3 Evaluation environnementale de la zone d'étude (Pollution de l'air, de l'eau et du sol)

II.4 Conclusion

II.1 Introduction

Pour accéder aux agrégats sous terre, presque toute la flore naturelle, la couche arable et le sous-sol doivent être enlevés lors de l'excavation des fosses des carrières. Le processus d'exploitation minière à ciel ouvert implique le forage, le dynamitage, le chargement et le transport, les pelles et les chargeurs frontaux sont utilisés pour les tâches de chargement dans les grandes mines à ciel ouvert (Guljahon Jaqsilikovna et al, 2023). Ces activités détruisent les écosystèmes aquatiques et végétaux, ce qui contribue à une perte majeure de biodiversité en plus de l'extinction des espèces animales existantes. De plus, la poussière, le bruit, et l'eau contaminée ont un impact négatif sur les écosystèmes voisins. La possibilité d'une contamination de l'environnement, y compris des sols et des sources d'eau, par des métaux lourds est très probable, comme l'ont démontré les analyses réalisées par les chercheurs dans l'article (Foughalia et al, 2023). Il a été prouvé qu'il existe une forte probabilité que les eaux de surface soient polluées par des éléments dangereux tels que le cadmium, le cuivre et le zinc, ce qui est également attribuable à la nature de la composition géologique de la zone exploitée.

La circulation des eaux de surface et souterraines peut être perturbée par les carrières d'agrégats, ce qui peut interrompre la recharge naturelle en eau. Par conséquent, la quantité et la qualité de l'eau potable disponible pour les humains et la faune sauvage à proximité peuvent diminuer.

Dans ce chapitre, nous discuterons de l'évaluation des effets des carrières d'agrégats sur l'environnement. Parmi les impacts, on trouve la libération de particules fines de PM_{2,5} et PM₁₀, qui, lorsqu'elles sont inhalées, peuvent causer des affections respiratoires graves telles que la silicose et le cancer du poumon et d'autres maladies de peau et de vision (Aleksandrova & Timofeeva, 2021), Ainsi, la production de granulats dans les carrières peut entraîner des émissions et des préjudices pour l'environnement et l'habitat naturel (faune et flore). Les effets sonores, également perçus comme une source de pollution néfaste, sont engendrés durant les travaux d'extraction, le transport des matériaux et diverses opérations de traitement (Çubukçu et al., 2012).

En outre, les phénomènes vibratoire et bruits produit par la propagation des ondes de choc à travers le massif rocheux est obtenu par les opérations de dynamitage. Il est essentiel de considérer les conséquences des vibrations transmises au sol en raison de leur influence sur les personnes, les structures et la terre. Dès lors, les opérations de dynamitage provoquent des vibrations sismiques qui présentent un danger pour la sécurité des bâtiments à proximité et pour l'environnement (Chrzan, 2023).

II.2 Climatologie de la région

II.2.1 Analyse des directions de vents

La région de Guelma connaît un climat continental, les gelées sont assez fréquentes, principalement entre novembre et la fin de mars. Les vents soufflent généralement dans deux directions distinctes, avec une vitesse moyenne annuelle enregistrée à la station de Guelma de **7.7** km/h en 2022. La vitesse maximale du vent enregistrée a été de 46.5 km/h le 17 août (Climat GUELMA- Données Climatiques, 2021).

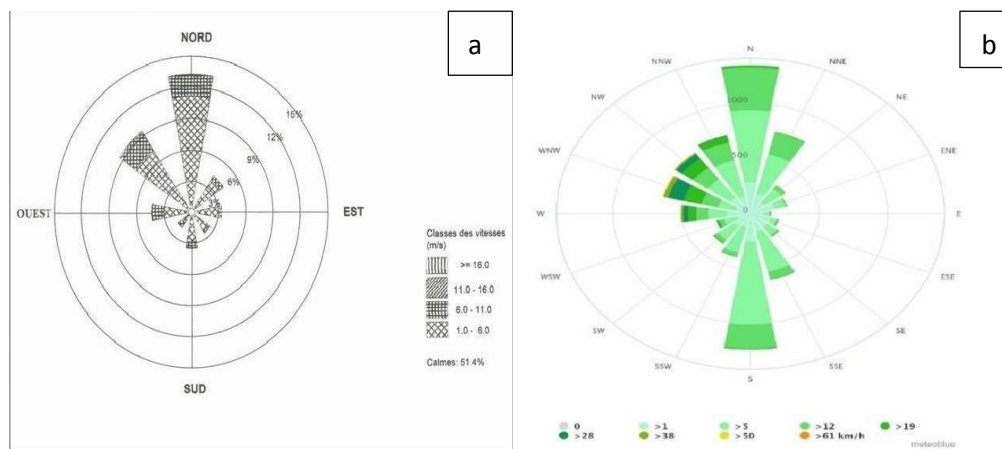


Figure 10- a: Rose des vents à Guelma (2004-2013), obtenue par l'ONM ; b : La rose des vents de la région de Guelma (« Blue Weather », 2024)

Dans la rose des vents présentée à la figure 10a, on peut observer quatre directions principales : Nord, Est, Sud. Et Ouest. Les pourcentages de direction des vents sont répartis au centre avec des motifs différents pour représenter différentes classes de vitesses du vent, exprimées en mètres par seconde (m/s). On retrouve ces classes de vitesses à droite de l'image.

- Les zones paisibles (sans vent) représentent 51,4% du total.
- Les vents de 1,0 à 6,0 m/s.
- Un damier est utilisé pour représenter les vents de 6.0 à 11.0 m/s.
- Un motif en treillis indique la vitesse des vents de 11.0 à 16.0 m/s.
- Les taux près de chaque direction (Nord, Est, Sud, Ouest) indiquent la vitesse du vent.

La figure 10b montre la fréquence du vent par direction et vitesse (9 km/h), la direction principale est le Nord (N), le secteur le plus long et le plus fréquent, (5 à 20 km), en plus de Sud (S) est une direction secondaire importante.

Selon Tableau 2, des fluctuations dans la vitesse moyenne du vent tout au long de l'année 2021 dans la région de Guelma en Algérie sont observées, avec des moyennes mensuelles variant de 2,5 à 3,7. Les vitesses maximales du vent varient également, allant de 26,1 à 48,7.

Tableau 2 - Vitesses du vent (Kt) enregistrées pendant l'année 2021 dans la région de Guelma (Bilan Climatique Annuel, Station Guelma, 2021) :

Année	Mois	Moyenne	haut	Date	Direction
2021	1	3.7	40.9	8	Ouest
2021	2	3.2	48.7	6	Sud-sud-ouest
2021	3	2.5	28.7	16	Nord-Ouest
2021	4	2.7	26.1	18	Nord-Ouest
2021	5	3.1	33.0	1	Nord-nord-est
2021	6	3.7	33.0	28	Nord-Ouest
2021	7	3.3	27.0	7	Est-nord-est.
2021	8	3.5	35.7	31	Nord-nord-est
2021	9	3.2	37.4	17	Nord-nord-est
2021	10	3.1	27.0	13	Nord-Ouest
2021	11	3.5	30.4	27	Ouest
2021	12	3.6	38.3	5	Ouest
2021		3.2	48.7	Février	Nord-ouest

Les vitesses du vent présentent des variations tout au long de l'année 2021. La vitesse moyenne du vent la plus élevée, 3,7, a été enregistrée en janvier, tandis que la moyenne la plus basse, 2,5, a été enregistrée en mars. Le 6 février, la vitesse du vent la plus élevée, 48,7, a été observée, indiquant la possibilité de vents forts au cours de ce mois. De plus, les directions du vent montrent une diversité, avec les directions prédominantes étant le Nord-Ouest, le Nord-Est et l'Ouest, indiquant la possibilité de vents forts au cours de ce mois. De plus, les directions du vent montrent une diversité, avec les directions prédominantes étant le Nord-Ouest, le Nord-Est et l'Ouest.

II.2.2 Températures de la région d'étude

Les températures sont diminuées par le vent du nord, tandis que le vent du sud les fait monter figure 11. Le taux d'humidité relative varie considérablement tout au long de la journée, passant de 70 % le matin à 45 % l'après-midi. Ces variations sont également observées entre les saisons, en hiver et en été.

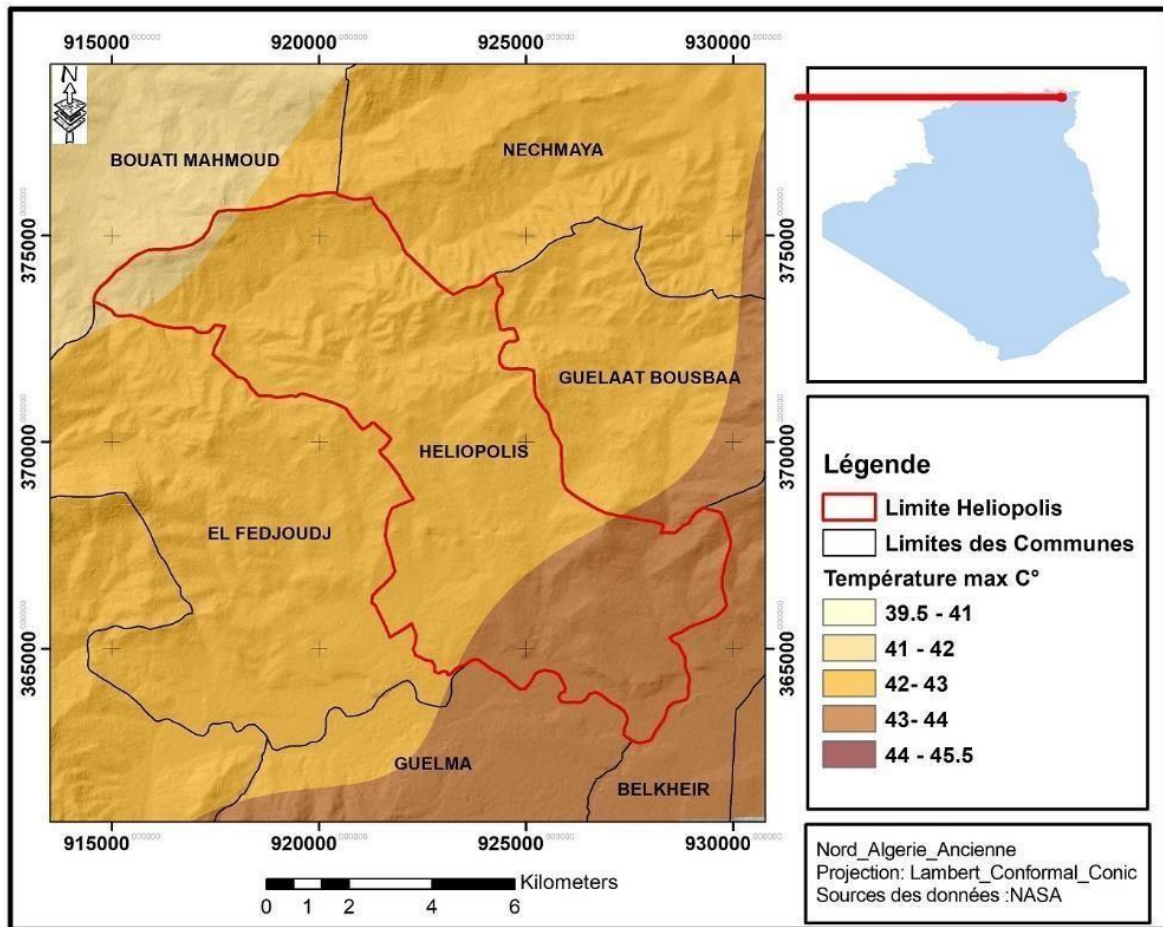


Figure 11 - Une carte montrant les variations de températures dans la région d'Héliopolis

En moyenne annuelle en 2022, l'humidité a été enregistrée à 56.5 %. Le climat à Héliopolis varie entre le froid et l'humidité en hiver et la chaleur et la sécheresse en été figure 11. À partir de juin, la température augmente progressivement pour atteindre son maximum en août, dépassant les 45 degrés Celsius. Le 17 août 2022, la température la plus élevée enregistrée a atteint 46 C, avant de diminuer en septembre.

Selon le site de Infoclimat, La représentation graphique et le schéma à barres des températures à Guelma présentés dans la figure 12, comparés mois par mois pendant la période 2021/2023.

Les plus hautes températures de l'année sont enregistrées durant l'été (juin, juillet, août), parfois dépassant 46 °C. En hiver, les températures minimales sont les plus basses (décembre, janvier, février), avec des températures allant jusqu'à 0 degré Celsius.

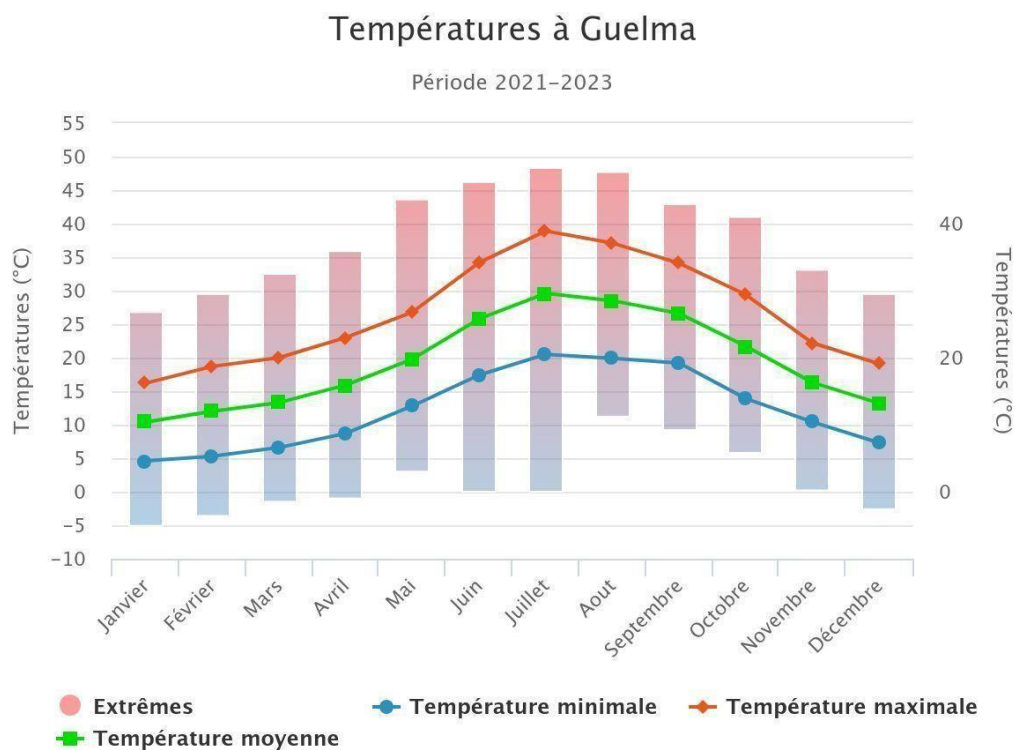


Figure 12 -Représentation graphique de l'oscillation thermique de la région de Guelma (Normales Et Records Climatologiques À Guelma - Infoclimat, 2023)

Les températures dans la région d'Héliopolis varient tout au long de l'année et augmentent généralement et atteignent leur apogée pendant les mois d'été. Les températures les plus élevées ont été enregistrées en juillet et août. La ligne bleue du diagramme dans la figure 13 représente les variations constantes des températures extrêmes, les périodes de chaleur extrême et les périodes de froid. Il suggère qu'il y a une variation naturelle des températures saisonnières tout au long de l'année.

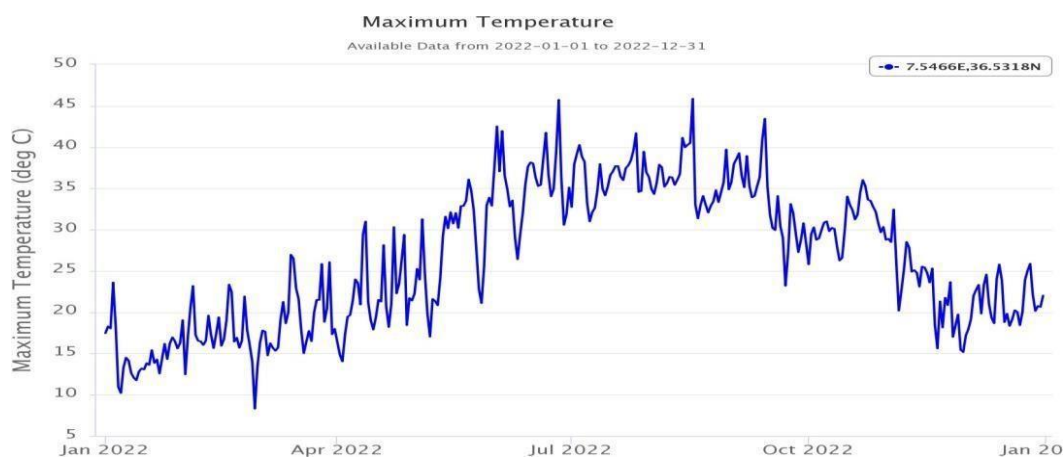


Figure 13 - Graphique de la température maximale (en degrés Celsius) enregistrée chaque jour au cours d'une année, du 1^{er} janvier 2022 au 31 décembre 2022, (Infoclimat, 2023)

- Selon Tableau 3 de températures enregistrées en 2022 station Guelma, température maximale moyenne mensuelle (max moyenne) : varie de 17,4°C à 38,5°C (janvier) à 38,5°C (août). Température minimale moyenne mensuelle (min moyenne): varie de 5,2°C à 20,9°C (janvier) à 20,9°C (août).

Tableau 3 - Températures enregistrées en 2021 pour la région de Guelma, avec (températures

Année	Mois	température maximale moyenne	température minimale moyenne	Moyenne	Haute	Date	Faible	Date	Max \geq 32	Min \leq 0
2021	1	17.4	5.2	11.1	25.7	30	0.2	19	0	0
2021	2	21.1	5.8	12.9	28.0	6	-1.3	16	0	1
2021	3	19.2	5.7	12.1	25.9	29	1.4	26	0	0
2021	4	22.5	8.3	15.1	31.9	26	2.5	19	0	0
2021	5	28.1	12.4	19.9	36.3	22	6.8	21	7	0
2021	6	33.5	17.5	25.0	44.2	19	11.3	8	16	0
2021	7	37.8	18.9	28.1	45.1	31	15.0	18	25	0
2021	8	38.5	20.9	29.1	47.7	9	16.6	22	29	0
2021	9	34.1	19.5	26.0	42.9	25	14.2	30	22	0
2021	10	25.4	12.6	18.4	35.4	3	8.1	15	1	0
2021	11	20.2	9.5	14.3	28.8	1	3.3	30	0	0
2021	12	17.8	5.6	10.9	23.2	24	0.4	15	0	0
		26.3	11.8	18.6	47.7	Aout	-1.3	Février	100	1

II.2.3 Etude de Précipitations

Concernant le graphique illustré dans la figure 14 il détaille les précipitations dans la région de Guelma pour la période 2021 à 2023. La ligne orange représente la quantité de pluie enregistrée au cours d'une journée, qui a atteint son maximum au mois de mai, et le minimum c'était au mois de juillet selon la représentation graphique publiée par le site « *Infoclimat, 2023* ». Les barres de couleur bleue représentent la quantité de pluie par mois. On peut constater que les mois de mai, janvier et novembre, en plus de décembre, ont eu la plus grande quantité de précipitations.

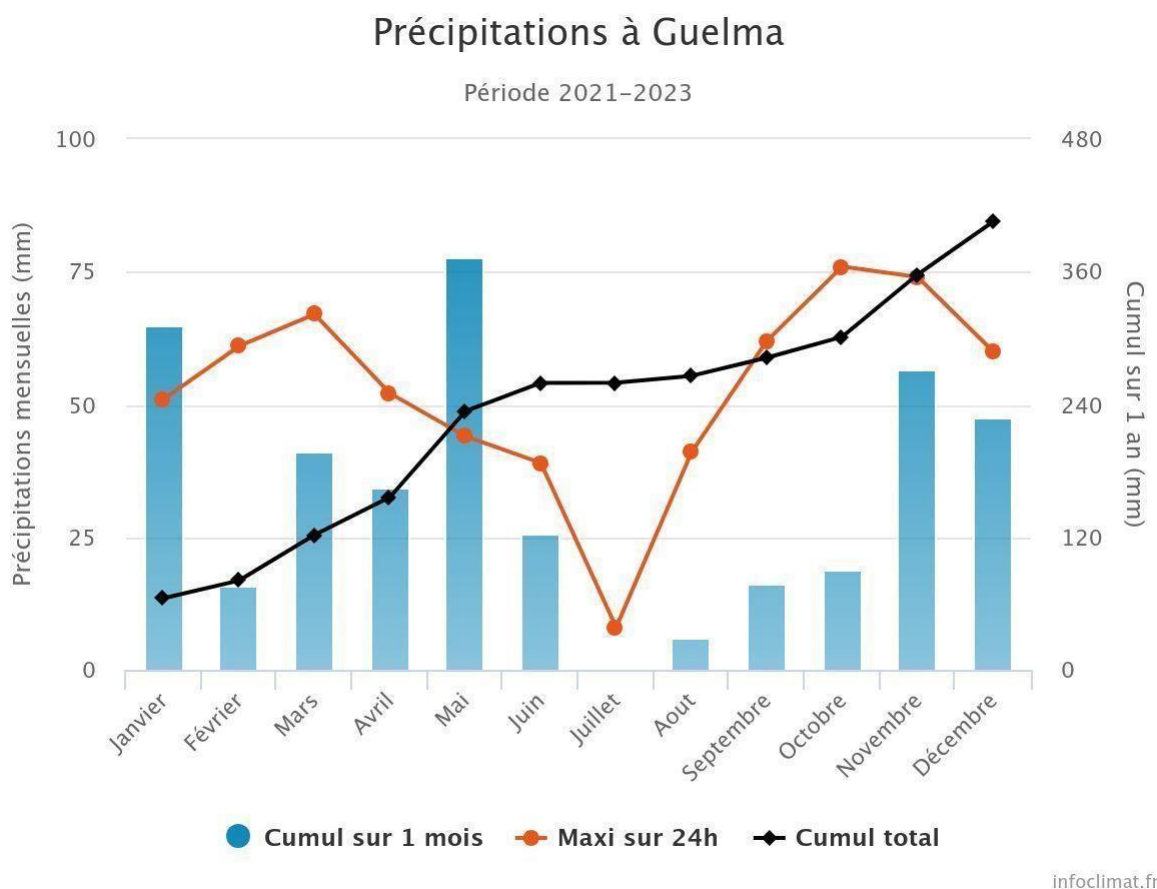


Figure 14- Un diagramme à barres et un graphique linéaire représentant les différentes statistiques mensuelles de précipitations à Guelma au cours de la saison 2021-2023, (*Normales Et Records Climatologiques à Guelma - Infoclimat, 2023*).

La ligne de couleur foncée représente la quantité totale de précipitations sur 12 mois. Elle montre une tendance à la hausse, le chiffre cumulé dépassant 360 mm certaines années, notamment pendant la saison automnale.

Les données officielles mentionnées dans le tableau 4 illustrent les variations saisonnières des précipitations au cours de l'année 2021 dans la région de Guelma, en Algérie. Les relevés effectués à la station météorologique la plus proche de la carrière d'Héliopolis révèlent que les mois de mars, janvier, décembre et avril ont enregistré les quantités de pluie les plus importantes, dépassant chacun les 45 mm en 2021. Cette observation témoigne de précipitations significatives pendant cette période par rapport aux mois de juin et de juillet, où les quantités de pluie sont nettement moindres, respectivement seulement 2,4 mm et 0 mm ceci indique une période de sécheresse.

Les moyennes quotidiennes des précipitations varient d'un mois à l'autre, allant de 1,2 mm en juin à 22,4 mm en mars, le mois de juillet étant le plus sec.

Tableau 4 - Précipitations enregistrées pendant l'année 2021 dans la région de Guelma (Bilan Climatique Annuel, Station Guelma, 2021.

Année	Mois	totale	Jour d'observation maximum	Date	Les jours de pluie sont révolus		
					2	2	20
2021	1	52.8	9.9	16	17	7	0
2021	2	14.4	6.6	1	12	2	0
2021	3	60.4	22.4	21	13	5	2
2021	4	47.4	13.0	16	11	7	0
2021	5	24.6	15.0	6	6	3	0
2021	6	2.4	1.2	26	4	0	0
2021	7	0.0	0.0	1	0	0	0
2021	8	3.0	2.0	25	3	1	0
2021	9	21.2	19.0	21	3	2	0
2021	10	18.0	6.6	25	11	4	0
2021	11	24.6	10.4	29	13	3	0
2021	12	50.0	14.4	6	18	5	0
		318.9	22.4	MAR	111	39	2

II.2.4 La Flore et Faune

II.2.4.1 Flore locale

Elle est constituée de chênes liège, de bruyères, de chênes zeen, d'arbustes, d'Eucalyptus, de lentisque, de Cyprès, de filaire, de pin d'Alep, de Myrte et de pin maritime. Les forêts et les terres forestières dans la wilaya de Guelma couvrent une superficie totale de 117 584,67 hectares, dont 803,58 hectares sont des forêts privées. Le maquis s'étend sur une superficie de 70 033,3 ha. Zone forestière de 32765,79 hectares. Les terres nues s'étendent sur une superficie de 13 982 ha.

Six (06) espèces d'arbres sont présentes dans le périmètre forestier de proximité, ce qui inclut :

- Chêne-liège : une superficie de 18 485,05 hectares.
- Les eucalyptus couvrent une superficie de 3 530,00 hectares.
- Le chêne Zain occupe une superficie de 2 201,00 hectares.
- Le pin d'Alep couvre une superficie de 5 715,50 hectares.
- Pin : 1 638,00 hectares.
- Cyprès occupe une superficie de 1 019,00 hectares. (Le site officiel du ministère de l'Intérieur, des collectivités locales et de l'aménagement du territoire).

II.2.4.2 Faune de la région d'étude Héliopolis

La faune terrestre de la région reflète celle typique de la forêt Algérienne, comprenant des animaux tels que le sanglier, le chacal, etc. Parmi les espèces qui caractérisent la région, on trouve le lièvre, le genet, la palombe, le lopin sauvage et la perdrix rouge (Kouahla C, 2012).

II.2.5 Hydrogéologie et hydrologie de la région

II.2.5.1 Le système hydrique (cours d'eau et eaux de surface)

La zone d'étude possède un fort potentiel en termes d'eaux de surface, l'eau dans le bassin de Guelma est généralement dure, présentant des niveaux de minéralisation variant de substantiels à excessifs, comme le soulignent des recherches intéressantes menées par (Benmarce et al., 2023). La qualité de l'eau se détériore progressivement lorsqu'elle s'écoule dans la direction du débit des eaux souterraines, ce qui suggère l'implication de processus complexes impliquant des interactions eau-roche et divers mécanismes d'échange le long de son parcours depuis la zone de recharge amont jusqu'à la zone de décharge, impactant ainsi la teneur en minéraux de l'eau. Parmi les vallées les plus importantes qui caractérisent la région, on retrouve le bassin versant de la rivière Seybouse, qui est le deuxième plus grand bassin en Algérie (Baaloudj et al., 2024). On trouve également oued El Maleh, oued Sharaf et oued Bouhamdan.

La partie nord de la commune d'Héliopolis est traversée d'est en ouest par l'oued El Hammem, un affluent de l'oued Seybouse ; ce dernier, qui traverse le sud de la commune d'Héliopolis, a un débit estimé à 408 millions de mètres cubes par an. Oued Boudraa rejoint Oued Seybouse après avoir traversé les environs de Guelaat Bousbaa et coule au sud de la zone urbaine secondaire de Hammem Boudraa.

La région de Guelma possède plusieurs ressources en eau, notamment : les eaux de surface, telles que le barrage de Bouhamdan, situé dans la commune de Hammam El Dabbagh, avec une capacité de 184,3 Hm³, ainsi que les barrages de Majaz Al-Bakar, dans la municipalité d'Ain Makhoulouf, avec une capacité de 2,86 Hm³, et le barrage Jivata Stone dans la ville de Nashmaya, avec une capacité de 0.44 Hm³. Pour ce qui est des sources naturelles, la région compte plus de 1 000 sources réparties à travers son territoire.

II.2.5.2 Eaux souterraines

La région de Guelma abonde en plusieurs sources thermales significatives, réputées pour leurs vertus thérapeutiques, attirant des touristes venant de toutes parts, y compris de l'étranger (Maizi, 2021). En ce qui concerne les eaux souterraines, la zone est composée de cinq nappes principales :

- Une couche alluviale qui englobe trois communes (Guelma, Belkheir et Boumahra Ahmed).
- La couche calcaire du Crétacé supérieur dans la plaine de Tamlouka.
- Une couche de calcaire à Hammam Bradaa, qui se trouve entre les villes d'Héliopolis et de Guelaat Bou Sbaa,
- La couche d'oued Halia.
 - La nappe de la plaine de Bouchegouf.

II.2.6 Agriculture

Les zones agricoles de la wilaya de Guelma occupent la plus grande partie de la superficie, totalisant 72 pour cent elle produit une variété de légumes et de fruits, comme le blé dur, les agrumes, les pommes de terre, les tomates, les pois secs, etc (Agriculture, 2021).

Concernant La commune d'Héliopolis se caractérise par être une zone connue pour son activité pastorale et agricole, notamment la culture généralisée de céréales et la sylviculture à grande échelle (Sources des données de la commune Héliopolis). Comme nous observons dans les tableaux 5, 6 et 7 et 8 ci-dessous.

Tableau 5 - Distribution de la Surface Agricole Utile fournie par la direction des services agricoles de la wilaya de Guelma

Culture (Ha)	Terre en jachère(Ha)	Verger(Ha)
2191	1410.64	465.36

Tableau 6- Distribution des terres agricoles (Kouahla C, 2012)

Parcage et parcours(Ha)	Terre improductives(Ha)	S.A.U	S.A.T
794	257	4072	5118

Tableau 7 - Distribution des terres de la commune d'Héliopolis

Foret	S.A.T	Terre urbain	Totale commune
2020	5118	462	7687

Tableau 8 - L'abondance de l'élevage bovine

Ovins	Bovins	Caprins	Totale
548.18	36	44.22	628.4
87.25%	5.71%	7.04%	100%

De plus, en se basant sur les données précédemment évoquées dans le tableau 8, il est évident que la commune d'Héliopolis, notre zone d'étude, est principalement définie comme une zone pastorale, avec un pourcentage notable de 87,25 % par rapport aux autres activités.

Les forêts et les terres forestières dans la wilaya de Guelma couvrent une superficie totale de 117584,67 hectares. Dont 803,58 hectares sont des forêts privées.

Le maquis s'étend sur une superficie de 70033,33 ha. Zone forestières e 32765,79 hectares. Les autres terres improductives s'étendent sur une superficie de 13 982 ha.

Six (06) espèces d'arbres sont présentes dans le périmètre forestier de proximité, ce qui inclut :

- Chêne-liège : une superficie de 18 485,05 hectares.
- Les eucalyptus couvrent une superficie de 3 530,00 hectares.
- Le chêne Zain occupe une superficie de 2 201,00 hectares.
- Le pin d'Alep couvre une superficie de 5 715,50 hectares.
- Pin : 1 638,00 hectares.
- Cyprès occupe une superficie de 1019,00 hectares.

II.3 Evaluation environnementale de la zone d'étude (Pollution de l'air, de l'eau et du sol)

L'image ci-dessous figure 15 montre à quel point la zone d'étude est splendide, loin des effets néfastes des carrières, et que la région de Guelma est également célèbre pour sa diversité de légumes et de fruits.



Figure 15 - La zone d'Héliopolis est entourée de terres agricoles (faune et flore).

II.3.1 Pollution de l'air

Comme nous pouvons l'observer dans les figures suivantes (16 et 17), les travaux d'extraction de granulats entraînent d'importantes émissions de poussières, depuis le décapage des morts-terrains jusqu'à la commercialisation du produit final et son transport, que ce soit par camions ou par l'exportation via des navires portuaires. Les poussières minérales émises lors de l'exploitation des carrières de granulats ou les particules en suspension dans l'air (PM) varient en taille, de sorte que nous disposons des particules en suspension totale (PST) qui font référence aux poussières de moins de 100 micromètres de diamètre (Huang et al., 2014). Les grosses particules ont tendance à se déposer rapidement par rapport aux plus petites (PM10, PM2.5), qui sont plus nocives et peuvent être transportées sur de grandes distances en fonction de la vitesse et de la direction du vent. Les experts confirment que les concentrations autorisées de particules fines (PM) au niveau des carrières sont insuffisantes et ne répondent pas à l'objectif de maintien d'un air pur, de sorte que la poussière minérale est considérée comme dangereuse. En effet, la plupart des mesures prises pour réduire ses effets graves sont inefficaces (*Dust / Air Quality | Gravel Watch Ontario, 2024*) La carrière d'agrégats d'Héliopolis comprend plusieurs opérations de traitement de gravier qui produisent de la pollution atmosphérique. Cette pollution s'est propagée aux plantes et arbres voisins, changeant leur couleur et diminuant leur productivité. La poussière minérale qui recouvre les plantes et les arbres dans cette zone les empêche de croître naturellement et bloque la lumière du soleil, ce qui a un impact majeur sur la photosynthèse, comme le prouvent des

investigations physiques et chimiques. Cette richesse végétale, exposée aux diverses émissions de poussières résultant des activités des carrières, est menacée de disparition, car elle est devenue exposée aux maladies, et donc la mort inévitable sera son sort, ce qui crée une raréfaction des récoltes et une baisse de leur qualité (Zohir M, 2018).



Figure 16- Les particules de poussière produites par la carrière de granulats à Héliopolis (Opérations de broyage)



Figure 17- Le transport des roches exploitées entraîne une pollution de l'air.

Selon La figure 18, nous pouvons observer une carte illustrant la distance entre la carrière et les zones résidentielles avoisinantes, mettant également en évidence la proximité immédiate des zones agricoles affectées par la poussière émise par la carrière. De plus, elle indique les emplacements des institutions éducatives, notamment des écoles dont les élèves sont particulièrement sensibles à la poussière. L'inhalation de poussière entraîne des dommages permanents à diverses parties du corps humain par le biais de l'échange d'air dans le système respiratoire. Les enfants sont plus exposés à l'air pollué que les adultes, car ils inhalent l'air plus rapidement que les adultes et absorbent ainsi une grande quantité de toxines, ce qui met leur vie en danger de décès précoce (Amnuaylojaroen & Parasin, 2023).

Parmi les éléments retrouvés dans les poussières de la carrière d'Héliopolis, la silice cristalline. Malheureusement, cet élément est considéré comme cancérigène (Aleksandrova & Timofeeva, 2021), en plus d'une variété d'oxydes minéraux. Donc, il est nécessaire de réduire la poussière lors des travaux d'extraction et des traitements des granulats par pulvérisation d'eau, par exemple (Razakamanantsoa, A. 2021). La carrière de granulats d'Héliopolis est bordée du côté Est par la centrale de béton ENGOA, la ferme Bilal et d'autres terres agricoles. En progressant vers le Nord, on trouve une autre exploitation agricole et deux maisons, tandis que le périmètre ouest est marqué par une carrière de roche Rockwell. Enfin, du côté Sud, la carrière est adjacente à la ville d'Héliopolis.

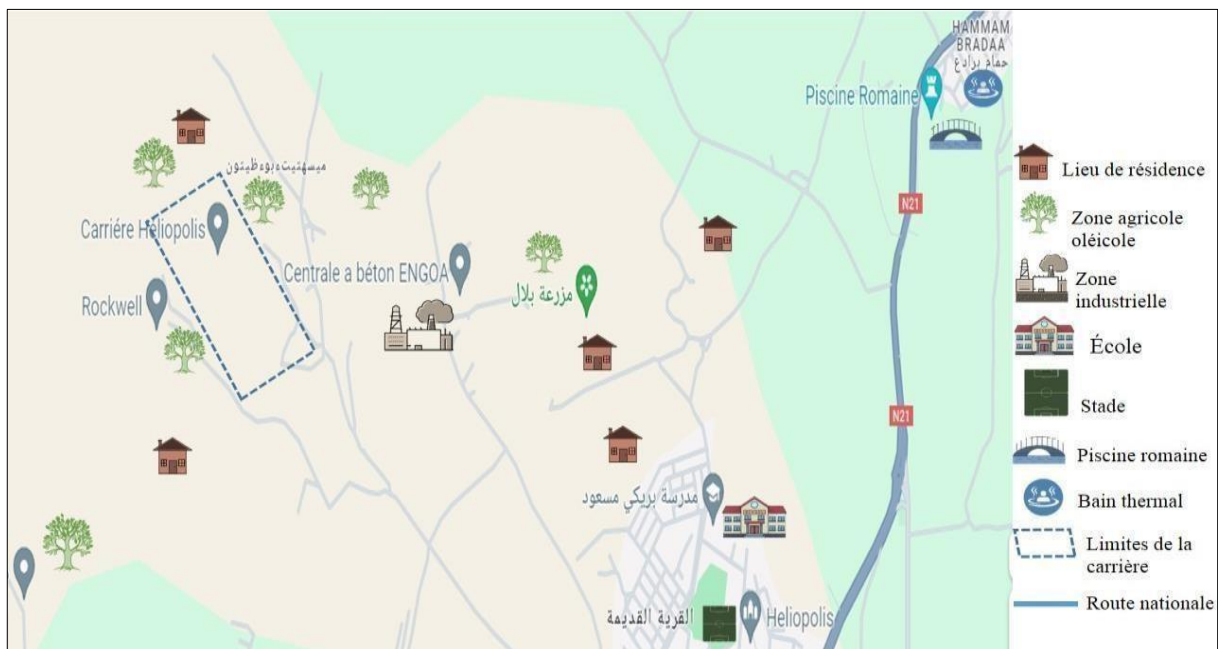


Figure 18- Cartographie illustrant l'identification des zones d'exposition aux poussières de la carrière d'Héliopolis (Google maps modifiée par F.Djedid)

Sur les photos ci-jointes figure 19 (a et b), l'effet de la poussière de carrière sur le pin est évident à l'œil nu.



Figure 19 - Les images (a, b et c, d) illustrent l'impact de la poussière dispersée par les opérations d'exploitation des granulats sur les plantes et les arbres proches de la carrière d'Héliopolis

Les poussières minérales ont plusieurs effets négatifs sur notre quotidien, en particulier pour ceux qui habitent à proximité d'une carrière ou d'une source de pollution atmosphérique en général, notamment :

Les émissions polluées constituent une source de nuisance et de pollution. Par exemple, il est dangereux de manger à l'extérieur à cause de l'air pollué, et il devient nécessaire de fermer les fenêtres pour empêcher la poussière de pénétrer dans la maison, ce qui empêche le renouvellement de l'air et entraîne une pollution de l'air intérieur. De plus, Les habitants ne font même plus sécher les vêtements dehors de peur que ces petites particules ne collent au tissu, provoquant des allergies cutanées chez ceux qui les portent (Zohir M, 2018). Par conséquent, ces facteurs ont conduit à la migration de la majeure partie de la population de la région.

II.3.2 Pollution de l'eau

Parce que les eaux de surface s'écoulent dans les fosses des carrières à ciel ouvert et s'y accumulent, entraînant ainsi un contact avec des toxines, ces zones représentent une menace pour les eaux souterraines. Les communautés qui dépendent des eaux souterraines pour leur approvisionnement en eau rencontrent des difficultés et des coûts supplémentaires, car le traitement nécessite davantage de temps et d'argent. L'Ontario par exemple a été confrontée à un cas de contamination de l'eau par la bactérie *E. coli* à Walkerton, entraînant des décès et des incapacités permanentes (*Drinking Water Contamination in Walkerton*,

Ontario : Positive Resolutions From a Tragic Event, 2003). L'eau près des aquifères présente un risque significatif, car les aquitards perforés peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'eau de surface destinée à la consommation humaine et au traitement des aliments. En 2000, cet événement a entraîné la mort de plusieurs personnes et la maladie de plus de deux mille autres (Salvadori et al., 2009).

Pour notre cas d'étude À Héliopolis Guelma, situé dans l'Est de l'Algérie, il existe un risque potentiel de détérioration de la qualité de l'eau en raison des émissions de poussière minérale provenant de la carrière d'agrégats. Cette pollution peut affecter directement les eaux de surface et causer des dommages à l'aquifère. Par conséquent, la qualité de l'eau dans les puits résidentiels à proximité pourrait être compromise. Donc, l'extraction des minéraux se fait par le biais de l'exploitation minière de carrières, ce qui conduit à la formation de grandes excavations qui ne sont pas correctement restaurées ou réhabilitées. Cette situation représente une menace pour l'environnement dans toutes ses dimensions. Les précipitations remplissent ces excavations, comme nous pouvons le remarquer dans la figure 20.



Figure 20 - L'eau de pluie s'accumule au fond de la carrière de granulats Héliopolis, formant des mares

Les eaux de pluie inondent ces trous et ces vides, ce qui conduit à la formation de bassins inadaptés à la baignade et renfermant de nombreux dangers pouvant entraîner la noyade, tels que des chutes abruptes et des rochers rugueux, en plus de leur profondeur. L'eau ainsi que la présence de vestiges d'équipements submergés et de déchets industriels se contaminent et peuvent causer des problèmes cutanés et respiratoires menaçant la santé humaine. Les déchets de carrière interagissent avec les eaux de surface, s'infiltrant dans le sol et contribuant à la production d'eau souterraine polluée (Eyankware & Akakuru, 2022). Comme le montre la figure 21, la mauvaise élimination des déchets de carrière pose des risques environnementaux significatifs. Lorsque les travailleurs laissent des déchets dans les carrières sans les traiter de manière responsable, cela peut entraîner divers impacts négatifs.

Cela inclut la contamination des eaux de surface et du sol, ainsi que le potentiel de lixiviation de substances nocives dans les eaux souterraines. Des méthodes d'élimination appropriées sont cruciales pour atténuer ces risques environnementaux et assurer la gestion durable des déchets de carrière (Sreekala et al., 2023).



Figure 21 - Déchets de carrière à Héliopolis

En complément de ce qui a été évoqué précédemment, il convient de souligner que de nombreuses études ont démontré que divers types de pollution, notamment la pollution de l'eau dans la vallée du Seybous, ont un impact négatif significatif sur la nature sensible de la région de Guelma (Asma, 2015 ; Bahroun et al., 2023 ; Gueroui et al., 2024). De plus, les activités industrielles situées au cœur des zones agricoles et résidentielles contribuent également à d'autres formes de pollution, mettant ainsi en danger l'environnement et la santé humaine. Par exemple, les eaux de pluie inondent ces trous et ces vides, ce qui conduit à la formation de bassins inadaptés à la baignade et renfermant de nombreux dangers pouvant entraîner la noyade, tels que des chutes abruptes et des rochers rugueux, en plus de leur profondeur. L'eau ainsi que la présence de vestiges d'équipements submergés et de déchets industriels se contaminent et peuvent causer des problèmes cutanés et respiratoires menaçant la santé humaine.

II.3.3 Pollution de sol

Étant donné le rôle vital que jouent les plantes dans la stabilisation du sol (Opondo et al., 2022), parmi les conséquences des activités d'extraction se trouvent la dégradation généralisée des terres et une perte significative de la couverture végétale. Ainsi, un sol non pollué joue un rôle crucial dans le soutien de la vie écologique et le maintien d'une production alimentaire robuste. Il agit en tant que conservateur de l'eau et de la vie. La contamination du sol par des substances telles que les métaux lourds et les déchets industriels conduit inévitablement à une augmentation des décès prématurés et contribue à la transmission de maladies. La pollution du sol restreint la présence de micro-organismes, entraînant une augmentation de la toxicité. Par conséquent, il est probable que le sol contaminé serve de

source de contamination des eaux souterraines à l'avenir (Münzel et al., 2022).

II.3.4 Impact socio-économique

Avant de pouvoir cerner les impacts socio-économiques les plus significatifs engendrés par l'exploitation des carrières de granulats, il est essentiel de saisir les dynamiques démographiques au sein de la commune d'Héliopolis.

La croissance démographique à Héliopolis a été remarquable au fil du temps, ce phénomène étant attribué à divers facteurs favorables à la coexistence dans cette zone, tels que les opportunités d'emploi, les projets d'investissement, même s'ils sont modestes, et c'est ce que nous constatons à travers les statistiques présentées dans le tableau 9 suivant.

Tableau 9 - Evolution démographique d'Héliopolis dans les périodes (1998, 2004, 2005),
(source des données d'après monographie Guelma 2004)

En 1998	22.605 habitants
En 2004	26.327 habitants
En 2005	26.806 habitants

Grâce aux données contenues dans le tableau 10 précédent, nous pouvons estimer la répartition par âge de la population de la commune d'Héliopolis. Par exemple, la tranche d'âge des enfants de 11 ans et moins, y compris les nourrissons, représente une proportion importante, dépassant 6 300 personnes en 2018. Cela indique la possibilité que ce groupe sensible soit affecté par les différentes formes de pollution présentes dans la région. De plus, le groupe des personnes âgées de soixante ans et plus avec 2051 personnes, ce groupe constitue sans aucun doute le groupe le plus vulnérable aux maladies chroniques, dont la prévalence est en augmentation. Leur immunité diminuant, ils sont donc plus sensibles aux maladies respiratoires et à d'autres affections résultant de la pollution environnementale (Hertz-Picciotto et al., 2007). Sans parler des naissances prématurées dues à la pollution de l'air, notamment à l'inhalation de particules fines PM10 et PM2,5, de dioxyde d'azote et de dioxyde de carbone (Kim et al., 2018 ; Guan et al., 2016).

On peut affirmer que les projets d'exploitation des carrières ont à la fois des effets positifs et négatifs sur la société. D'une part, elles offrent des emplois indispensables aux jeunes de la région, ce qui constitue un facteur significatif pour stimuler l'économie locale. D'autre part, les effets anthropiques négatifs de l'exploitation des carrières ne peuvent être ignorés. Les opérations de forage et de concassage et de broyage émettent des émissions nocives, causant une pollution sonore et des changements significatifs dans l'environnement environnant. Les conséquences de telles activités peuvent être désastreuses, impactant la santé et la sécurité humaines car de temps en temps, des accidents mortels surviennent dans les carrières en raison du non-respect des mesures de sécurité nécessaires ou des conditions d'exploitation. Donc, ces accidents du travail de chutes des rochers par exemple durant les travaux de tir entraînent parfois la perte de vies innocentes (Mashau & Mhlongo, 2020). Par conséquent, nous devons tenir compte des impacts négatifs de l'exploitation de carrières et nous efforcer

de trouver des moyens de les atténuer. En agissant ainsi, nous pouvons garantir que nous trouvons un équilibre entre la croissance économique et la conservation de l'environnement (Langer & Arbogast, 2002).

Tableau 10- Estimation de la distribution de la population en fonction des tranches d'âge

	0-5 ans	6-11 ans	12-14 ans	15-17 ans	18+59 ans	60 ans et +	Totale
2008	2589	3346	1740	1415	12842	1648	23581
2013	2717	3414	1776	1403	14365	1840	25516
2018	2849	3470	1806	1381	16052	2051	27610
2024	3123	3540	1843	1293	19985	2544	32328

Un des dangers associés aux carrières à ciel ouvert est le risque de chute. Ces mines attirent souvent des aventuriers et des athlètes qui apprécient l'escalade des parois, mais ils ignorent que ces parois peuvent être instables en raison des explosions nécessaires à l'extraction des pierres d'agrégat. Tomber de ces parois peut entraîner la mort ou une paralysie permanente (Dellero & Kharim, 2013).

II.4 Conclusion

La zone d'étude, Guelma, bénéficie d'un climat relativement modéré, avec une saison des pluies qui s'étend sur plusieurs mois. En décembre, janvier et février, des fluctuations sont observées dans la quantité de pluie au cours de l'année. En ce qui concerne la température, elle a dépassé quarante degrés durant la saison estivale. De plus, la température diurne a enregistré une valeur minimale de - 1,3 °C en février 2021. Le climat particulier de la région de Guelma en fait l'une des meilleures zones agricoles de l'Algérie orientale. Elle se distingue également par sa flore et sa faune diversifiée. Elle a également d'une diversité démographique, dominée par la tranche des jeunes, avec une densité de population attendue de 19 985 habitants en 2024 pour la tranche d'âge de 18 à 59 ans. Tous les groupes d'âge qui composent la structure sociétale de Guelma et Héliopolis sont exposés aux divers effets secondaires des activités d'exploitation des carrières. Les carrières, bien qu'elles possèdent des caractéristiques uniques, sont toutes responsables de la dégradation des écosystèmes, en particulier dans les zones écologiquement sensibles (air, eau et sol). Les diverses opérations préparatoires aux agrégats entraînent des émissions importantes de poussières, dues à l'utilisation d'explosifs pour fragmenter les roches agrégées et aux opérations de concassage et de broyage. Ce qui entraîne le rejet de PM10, de PM 2,5, de dioxyde de carbone, d'oxydes de soufre et de divers métaux. Ainsi, le transport de matériaux par des moteurs diesel contribue de façon significative à la pollution associée aux activités d'extraction. (Bascompta et al., 2022).

Chapitre III. Approches scientifiques sur la réhabilitation des sites miniers

III.1 Introduction

III.2 La réhabilitation des sites miniers

III.3 Solutions attendues pour la réhabilitation des sites d'exploitation
des carrières : restauration, aménagement, ré végétation du site

III.4 Conclusion

III.1 Introduction

Avez-vous déjà songé à ce qui advient des carrières à ciel ouvert qui sont laissées abandonnées et exposées ? Sont-elles abandonnées à la dégradation sans aucune intervention pour les restaurer ? Quelle est l'ampleur des dommages causés à l'environnement local et à la communauté ? Ces carrières abandonnées peuvent-elles être transformées en ressources utiles, même après l'épuisement de leurs réserves minérales (Blair J, 2019) ?

Le développement industriel actuel observé à l'échelle mondiale et l'augmentation de la demande en matières premières de construction ont naturellement entraîné une croissance des projets miniers et des carrières à travers le monde (Krausmann et al., 2009). Cette expansion a conduit à une intensification des effets négatifs de ces activités, mettant en évidence des impacts tels que la déformation des panoramas et la perturbation des systèmes environnementaux. Il est important de noter que la dernière décennie a vu une attention accrue portée aux projets de recherche évaluant les impacts environnementaux des mines et des carrières. Cette prise de conscience encourage la mise en place de projets écologiques et d'autres initiatives d'investissement visant à préserver l'environnement, à servir la population et à atténuer les effets secondaires de ces activités (McKenna et al., 2020). Contrairement au passé où les carrières sont restées abandonnées sans aucune opération de restauration, et c'est ce que les auteurs expliquent dans l'article (Cullen et al., 1998). Une fois l'exploitation terminée, les mines à ciel ouvert ont été abandonnées, en attente de réhabilitation. Les carrières et les mines à ciel ouvert représentent des dangers pour la sécurité du public ainsi que des problèmes de sécurité pour leurs propriétaires (PortC. M., 2013).

La restauration des sites miniers se distingue des autres projets de restauration dans divers domaines, en raison des changements significatifs survenus sur le terrain dues aux travaux de l'exploitation (les travaux de tir utilisant des explosives, les préparations mécaniques des matériaux y compris concassage, broyage et criblage). L'extraction continue de minéraux dans les carrières et les mines à ciel ouvert entraîne la formation de grands cratères et par conséquent provoque une dégradation des sols, ce qui a des répercussions négatives sur les écosystèmes et les paysages. Afin de remédier à ce problème et de réduire les impacts négatifs dans les carrières et les mines à ciel ouvert abandonnées, il est également possible de mettre en œuvre des projets de réhabilitation des sites ou les travaux ne sont pas encore achevés, il est possible d'entreprendre des opérations de restauration simultanément aux opérations d'exploitation, permettant ainsi de gagner du temps et de minimiser rapidement les effets négatifs. Il convient de mettre en exergue l'importance des environnements de carrière et de leur évolution, tout en encourageant l'adoption de techniques visant à restaurer ces habitats et à les rendre propices à la faune et non à des fins agricoles ou récréatives uniquement (Cullen et al., 1998). La réhabilitation de la carrière peut être effectuée aussi par rebouchage ou remblayage en utilisant des matériaux inertes provenant de l'extérieur. Le terme "inerte" désigne tout déchet qui ne subit aucune altération et ne déclenche ni combustion ni décomposition, ce qui en fait une substance non menaçante pour l'environnement ou les organismes vivants (Dutoit, n.d.).

Parmi les impacts anthropiques de l'exploitation minière à ciel ouvert sur l'environnement, notamment dans le cas de l'extraction de métaux lourds tels que le fer, pyrite le phosphate et l'or, on observe le phénomène du drainage minier acide. Il s'agit d'une réaction chimique entre l'eau, l'oxygène et les composés sulfates, résultant en une solution fortement acide avec une concentration élevée de métaux lourds ; donc lorsque les conditions suivantes se présentent dans l'environnement : oxydation des sulfates de fer, hydrolyse du fer ferrique et oxydation du fer ferreux et oxydation amplifiée des ions sulfatés de fer, le DMA se formera (Kalin et al., 2006). Ce phénomène est considéré comme l'un des effets les plus dangereux de ce secteur, entraînant la détérioration de divers aspects de l'environnement, notamment la qualité de l'eau, l'empoisonnement des plantes, et constituant une menace pour la santé humaine et la biodiversité. Certaines études se sont penchées sur l'importance des micro-organismes dans leur contribution à la restauration des sites miniers. Elles ont démontré leur capacité à dissoudre par oxydation les sulfures métalliques, contribuant ainsi à la formation de drains miniers avec un pH inférieur à 4. La présence de ces micro-organismes contribue à réduire les polluants de l'eau. Ce processus est appelé traitement biologique (Bruneel et al., 2019). Donc, la réhabilitation des sites miniers reste la solution adéquate pour minimiser ces impacts négatifs.

Dans ce chapitre de la thèse, nous examinerons les méthodes dominantes utilisées dans la réhabilitation minière. Nous aborderons également les avantages des efforts de restauration des mines à ciel ouvert en fournissant plusieurs exemples concrets et efficaces qui ont réussi dans ce domaine. De ce fait, ces pratiques contribuent à la conservation à long terme de l'environnement et de la vie humaine.

III.2 La réhabilitation des sites miniers

Toutes les activités minières ou d'exploitation doivent être assorties de stratégies visant à restaurer les sites concernés dans le futur. Dans ce qui suit, nous présenterons un schéma illustrant les principales méthodes de réhabilitation des zones altérées à la suite de diverses opérations minières figure 22.

Les aspects les plus importants qui servent à la restauration de l'environnement et sont considérés comme des éléments cruciaux pour la restauration de l'environnement :

- Les systèmes législatifs.
- Évaluation des risques environnementaux.
- Évaluation environnementale.
- Planification environnementale.
- Investissement financier et répartition des intérêts.
- Techniques de production propres.
- Reconstitution des ressources.
- Restaurer et reconstruire les écosystèmes sur les résidus miniers rocheux (Ahirwal et al., 2016).

- Effectuer des mesures pour améliorer la qualité du sol, comme l'aération et l'ajout de matière organique.
- Optimisez le pH du sol afin d'assurer une croissance optimale des plantes
- Revégétalisation : commencez à planter des arbres et des plants locaux qui s'adaptent à l'environnement local. Surveiller et gérer la croissance de la végétation.

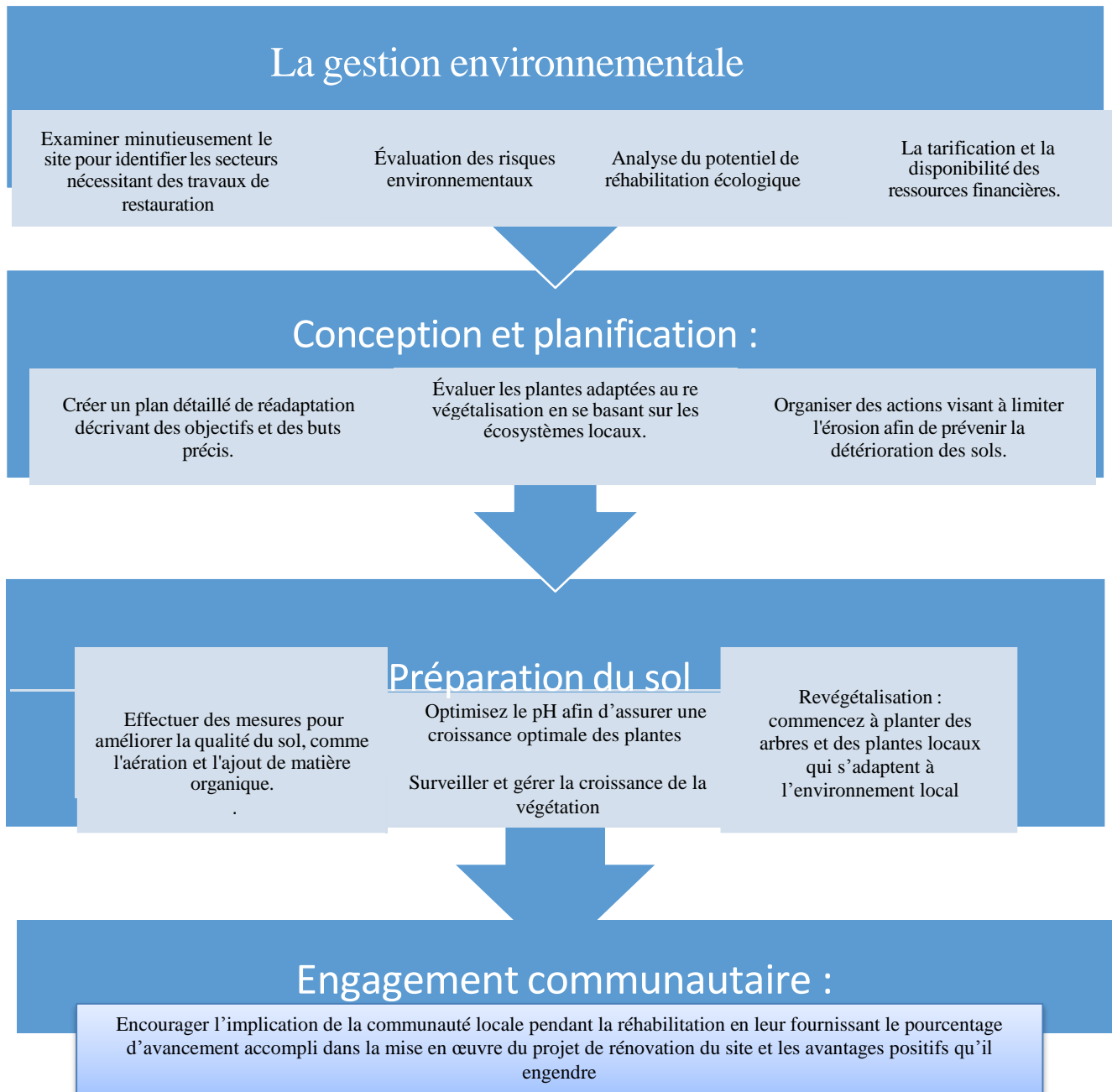


Figure 22 - Planification de la réhabilitation des sites miniers à ciel ouvert (Ahirwal et al., 2016)

III.2.1 Cas des mines à ciel ouvert

III.2.1.1 La mine à ciel ouvert de pyrite « Lousal Portugal »

La réhabilitation des sites miniers sert efficacement l'environnement et contribue de manière significative à réduire les effets désastreux des activités minières. Par exemple, récemment, la réhabilitation de la mine de pyrite Lousal Portugal a été entreprise en se basant sur les caractéristiques géomorphologiques locales en plus des caractéristiques géochimiques. Des reliefs ont été conçus pour imiter les formations naturelles, comprenant un revêtement de sol construit. Des résultats positifs ont été observés l'année dernière 2022 en ce qui concerne la couverture végétale indigène. De plus, une nette amélioration de la qualité de l'eau a été constatée. Le projet de réhabilitation de la mine de Lousal constitue le premier exemple européen où le concept de réhabilitation géomorphologique a été associé à une remédiation géochimique dans une zone caractérisée par une formation intense de drainage minier acide (da Silva et al., 2006).

Les travaux de réhabilitation ont nécessité une semaine complète de formation. Les opérations de reclassement topographique ont débuté avec l'utilisation de bulldozers et de différentes machines de terrassement comme nous observons on figure 23.



Figure 23- Construction du site de réhabilitation à l'aide des excavateurs et des bulldozers (Sánchez Donoso et al., 2023).

Deux strates ont été aménagées afin de restaurer la stabilité du sol : la première l'horizon A est constituée d'un mélange de fumier animal, tandis que la seconde l'horizon B est composée d'un mélange d'argile et de gravier calcaire, dans les zones où le DMA est fréquent,

cette couche peut être plus épaisse. Mais il était difficile d'obtenir une épaisseur de sol uniforme figure 24. La première couche de fumier animal est épaissie pour résister aux conditions météorologiques variées. L'épaisseur de l'horizon A était d'environ 10 cm .L'horizon B présentait une épaisseur d'environ 15 cm .Son objectif était de retenir l'eau afin de favoriser la croissance des plantes (Sánchez Donoso et al., 2023).



Figure 24 -Mettre en œuvre des procédures de couverture du sol et de remédiation du DMA (Sánchez Donoso et al., 2023).

Grace à la réhabilitation du site il a été noté une diminution significative des concentrations d'éléments toxiques tels que le cadmium, le fer, le zinc comme nous observons dans la figure 25 (Sánchez Donoso et al., 2023).



Figure 25 - A gauche, le bassin versant du ruissellement DMA en 2020. À droite, une observation du même bassin en 2022 après la réhabilitation (Sánchez Donoso et al., 2023).

III.2.1.2 La restauration du site minier de « Kettara » au Maroc

Un exemple supplémentaire d'une étude portant sur la restauration du site minier de Kettara, localisé à Marrakech au Maroc, révèle la production d'un volume substantiel de résidus miniers, étendant leur présence sur une surface conséquente. Ces résidus génèrent une quantité significative de drainage minier acide (DMA), établissant ainsi une source substantielle de pollution.



Figure 26 - Drainage minier acide engendré par les rejets de la mine de Kettara au Maroc (Lghoul et al., 2012)..

Les opérations de réhabilitation sont intrinsèquement liées à la stabilisation des stériles de cette mine à ciel ouvert, un processus qui s'accomplit en appliquant une couche de matériaux

alcalins riches en calcaire sur les stériles. Cette contribution souligne que les fines particules agissent comme une barrière, prévenant l'accès de l'eau aux stériles et, par conséquent, inhibant le processus d'oxydation figure 26. Suite à la préparation des niveaux de sol, il devient impératif d'établir une couverture végétale en faisant un choix judicieux parmi les variétés qui s'accordent avec les caractéristiques intrinsèques du territoire (Lghoul et al., 2012).

III.2.1.3 Réhabilitation des mines de bauxite « Jarrah » Australie

La législation environnementale australienne stipule que tout projet minier d'investissement doit obtenir une approbation préliminaire, qui nécessite l'approbation des autorités compétentes dans les juridictions australiennes, et cette approbation dépend principalement de la garantie que le site minier soit remédié avant de planifier sa fermeture (*Legislation, Regulations and Guidelines / Australia Minerals*, 2023).

Deux mines à ciel ouvert de bauxite sont localisées dans la région forestière de Jarrah, à l'Ouest de l'Australie figure 27. Cette substance (la bauxite) revêt une importance considérable dans l'industrie de l'aluminium. Alcoa exploite deux mines de bauxite en plus de trois raffineries d'alumine dans la région occidentale de l'Australie. Elle produit plus de 33 millions de tonnes de bauxite chaque année, raffine environ neuf millions et demi de tonnes d'alumine et produit environ 300 000 tonnes d'aluminium. Et elle est considérée comme l'une des entreprises leaders dans la préservation de l'environnement et la recherche du développement durable (*Alcoa -- Australia*, 2024). À la suite de la phase d'extraction du minerai, la société responsable a entrepris la réhabilitation de vastes étendues. Parmi les objectifs poursuivis par ce projet, figure la restauration de l'équilibre environnemental, ceci est réalisé par le biais de la préservation des forêts de la région ainsi que de la préservation de la qualité de l'eau. La chose encourageante concernant ce cas de réhabilitation est qu'il a été planifié même avant qu'Alcoa ne commence ses opérations d'exploitation. Par conséquent, l'objectif souhaité était de travailler à restaurer 100% de l'environnement qui aurait été perturbé en raison de la mine (Adams T, 2021). De vastes zones de la forêt de Jarrah sont réhabilitées chaque année, de sorte que la soi-disant banque de graines puisse être utilisée pour atteindre la récupération des espèces végétales (Norman et al., 2006).

Certainement, la première phase pour exploiter de la bauxite implique l'identification de la zone minéralisée par le biais de techniques d'exploration telles que le forage, entre autres. Par la suite, les ingénieurs des mines entreprennent le dégagement de la végétation qui recouvre la zone minéralisée, Les travaux d'excavation de sol consistent à gratter deux couches de terre. La couche primaire contient la majorité des graines et de la matière organique. La deuxième couche suit la surface du sol sur environ 40 cm. Ils sont retirés et stockés ultérieurement lors des procédures de restauration, Il est préférable de rétablir ces deux couches immédiatement après la fin de l'exploitation, car le sol conserve encore ses nutriments (KochJ. M, 2007). Suite à l'exploitation minière, les bulldozers s'efforcent d'aplanir les parois des excavations afin de créer un sol relativement uniforme. Cette démarche vise à restreindre dans une certaine mesure le ruissellement de l'eau.

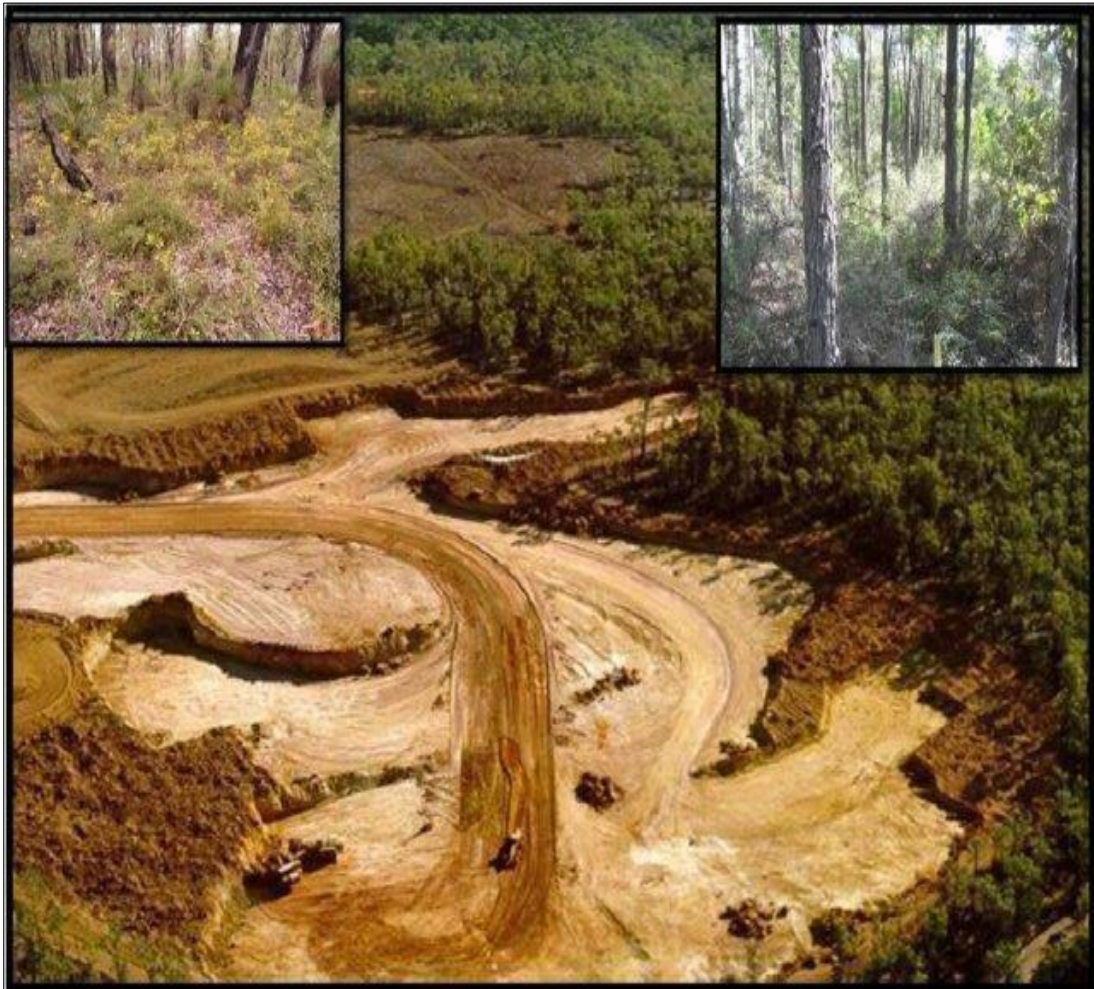


Figure 27 - La mine à ciel ouvert de bauxite, située au Sud-Ouest de l'Australie (Majer et al, 2014)

III.2.1.3.1 Les travaux de la réhabilitation

Tout d'abord, la société responsable de l'exploitation minière dans la région a effectué une étude sur les différentes espèces de plantes et d'animaux afin de déterminer leur rareté et les types à considérer lors des travaux de réhabilitation après l'exploitation de la bauxite. La couche supérieure du sol est d'abord dispersée à l'aide de scrapers, puis une couche de sol forestier fraîchement récolté est ajoutée. Cette méthode accélère le processus de revégétalisation. Voir figure 28, et pour restaurer rapidement l'activité microbienne des sols dans les mines exploitées, Il est souligné par l'auteur (JasperD. A, 2007) l'importance de retirer la couche arable pendant la saison estivale, puis de la remettre en place avant le début de la saison des précipitations. Si le sol est stocké temporairement avant d'être réinstallé, il est conseillé de mettre ces réserves aussi peu profondes que possible et, de les revêtir de végétation afin de préserver ses caractéristiques, le processus de revégétalisation devient plus rapide et plus performant (JasperD. A, 2007).



Figure 28 -Les scrapers remettent en place la terre arable (Koch J. M, 2007)

Outre la restauration des sols organiques, des efforts sont en cours pour rétablir les habitats qui étaient auparavant présents dans cette région en disposant des troncs d'arbres et du bois au milieu des zones reboisées, afin de donner un environnement à différents organismes vivants figure 29. Plus d'une centaine d'espèces de plantes et d'arbres ont été semées à une densité de 1 kg par hectare. La fertilisation est cruciale pour assurer la qualité de la restauration, donc ce processus a été effectué à l'aide d'hélicoptères qui ont pulvérisé du phosphate daïmoniques avec du potassium et des micronutriments, à une dose de 280 kg/ha, le long de la zone restaurée (KochJ. M, 2007).



Figure 29 -Disposer des troncs d'arbres dans les zones restaurées afin de créer un environnement propice aux animaux (Koch J. M, 2007).

Il a été noté que les espèces qui ont été défrichées lorsque l'exploitation a commencé ont été récupérées, ce qui est considéré comme un succès remarquable pour les opérations de réhabilitation menées par l'entreprise responsable.

Autrefois axé sur le développement de fermes pour la production de bois, l'objectif a désormais évolué, cherchant à planter diverses espèces végétales locales, ainsi que des arbres et graines, dans le but de renforcer la diversité écologique. Des préparatifs ont été faits pour fermer les mines qui ne respectaient pas les conditions convenues pour restaurer le site de manière durable. Il s'agit d'initiatives visant à imposer des responsabilités en matière de restauration durable aux parties concernées. Cela s'inscrit dans une approche globale de remise en état qui vise à restaurer la vie écologique, à encourager la biodiversité et à restaurer l'équilibre naturel des sites miniers, les ramenant ainsi à un état relativement proche de leur état d'origine. (*Environmental Regulation*, 2023).

Donc, La rareté de la terre végétale initiale qui avait été enlevée avant le début de

l'exploitation était l'un des facteurs qui ont influencé la réhabilitation précédente de l'entreprise Alcoa (Koch J. M., 2007). Auparavant, le processus de réhabilitation des mines de bauxite consistait à planter des pins, mais maintenant, grâce à la disponibilité des moyens, les techniques de restauration s'est développée et les objectifs de restauration ont évolué, de sorte qu'il aspire à atteindre l'autosuffisance et à maintenir un équilibre écologique. Selon les auteurs de l'article (Majer et al., 2014), la mine de bauxite à ciel ouvert se trouve à une profondeur d'environ deux à cinq mètres sous le sol de la forêt environnante, mettant ainsi en évidence les changements importants qui se produisent sur la terre en raison de l'exploitation minière et de l'excavation. C'est pourquoi cette étude de réhabilitation est importante. Il est essentiel que les entreprises minières se concentrent sur la réhabilitation des mines à ciel ouvert, d'autant plus qu'elles souhaitent réaliser des investissements rentables dans le domaine minier. S'ils provoquent des catastrophes environnementales irréversibles, les rendements miniers perdent toute leur signification.

III.2.1.4 Trois sites de mines d'or réhabilités dans le Sud-Ouest du « Ghana »

Les opérations d'extraction d'or ont plusieurs effets négatifs qui affectent grandement l'environnement. Par conséquent, la remise en état des terres minéralisées est devenue nécessaire pour réhabiliter les sites affectés par diverses opérations d'exploitation. Dans l'État du Ghana, les autorités ont considérablement encouragé les activités de restauration des mines d'or achevées, car cela dessert toute la région sur le plan économique, environnemental et social (Tetteh et al., 2015). Les terres précédemment exploitées du Ghana ont été récupérées en plantant des espèces d'arbres telles que le *Senna siamea* et l'*Acacia magnum* en raison de leur croissance rapide (Singh & Kumar, 2022). La mise en place d'arbres exotiques dans la région à restaurer s'est avérée peu efficace en raison des préjudices qu'elle inflige à l'écosystème local, provoquant ainsi des perturbations dans la biodiversité (Gemechu et al., 2021), c'est la raison pour laquelle les autorités compétentes de ce pays ont commencé à privilégier l'utilisation de plants locaux, en raison de leur importance écologique dans la région et pour la préservation de la diversité génétique (Ahirwal et al., 2016).

III.2.1.5 La restauration réussie des anciennes mines Amazoniennes

Les efforts de restauration efficaces sont considérés comme nécessaires dans la région méridionale de l'Amazonie au Brésil (figure 30a), où l'exploitation minière entraîne la dégradation des forêts tropicales. Bien que la forêt de Jamari couvre une vaste superficie, la proportion de mines y a atteint 10%, une proportion significative, car elle abrite de nombreuses mines de cassitérite. Malgré les efforts déployés pour restaurer les terres affectées par les activités minières dans la région, bon nombre d'entre elles se révèlent être des expérimentations initiales inefficaces. En conséquence, une importance accrue est accordée à la création de systèmes écologiques autosuffisants, mettant un accent particulier sur la plantation d'arbres de manière réfléchie et non aléatoire (König et al., 2022).

Les déchets miniers provenant du dépôt et de l'enlèvement des sols de surface rendent la restauration des mines à ciel ouvert difficile (figure 30b), et leur restauration est considérée comme un véritable défi. Cette méthode de restauration, nécessitant une main-d'œuvre importante, implique souvent d'importantes modifications topographiques, suivies de la plantation d'arbres sélectionnés. Le vaste nombre de sites miniers à ciel ouvert abandonnés et les techniques rigoureuses de restauration minière justifient des recherches pour déterminer les variables influençant l'efficacité des initiatives de réhabilitation minière antérieures.



Figure 30-a) Position géographique de l'Amazonie avec une végétation légèrement verdâtre, la forêt représentée en vert foncé et la région des mines actives affichée en orange. (b) la photo d'une mines à ciel ouvert étudiées au Brésil (König et al., 2022).

Les dépôts de résidus miniers sont constitués de sédiments stériles avec une inclinaison qui facilite le drainage. La combinaison de la pente et de l'exposition prolongée provoque une variété de tailles de particules dans le sol. Un sol de texture sableuse a été déposé en altitude, suivi d'une strate d'argile en profondeur. Les résidus miniers secs se composent essentiellement de particules de sable et ne retiennent pas l'eau. En revanche, les résidus miniers humides constituent les parties situées en aval du barrage, caractérisées par leur nature moléculaire, notamment l'argile et le limon, Contrairement à la première zone, ces zones ont une forte teneur en argile et peuvent être saturées d'eau. En plus des déchets miniers, qui sont recouverts d'un sol organique prélevé dans les zones forestières environnantes. Dans certaines mines, l'exploitation est effectuée par lavage. Bien que le forage ne soit pas effectué, les minéraux sont extraits à l'aide de machines mobiles qui extraient des couches de sol pour atteindre la zone minéralisée. Une fois l'opération terminée, le sol extrait est remis à son emplacement d'origine, ce qui est appelé "déchets lavés" (Longo et al., 2005).

III.2.1.5.1 Restauration

Avant de commencer la plantation d'arbres, des travaux ont été entrepris pour améliorer

la qualité du sol pendant trois ans en utilisant des matériaux biologiques et organiques ainsi que des engrais chimiques. Pour créer toutes les conditions nécessaires à l'établissement réussi des jeunes plants, une restauration a été appliquée sur neuf zones, avec l'ajout de déchets animaux sur une période d'au moins 5 ans. Les opérations de reboisement ont débuté en 1991 et se poursuivent actuellement. Un total de plus de cent espèces ont été mises en terre, avec une densité de plantation dépassant les 1600 arbres par hectare, *Syzygium cumini* (*Myrtaceae*), une espèce exotique originaire d'Inde, et *Inga laurina* (*Fabaceae*), une légumineuse à croissance rapide, tolérance aux conditions environnementales difficiles telles que l'engorgement, voire de faibles concentrations d'eau dans certains cas, et des carences nutritionnelles. Le but de la plantation d'espèces d'arbres exotiques est de coloniser les sites afin d'inciter le processus de régénération naturelle. Une fois cela terminé, ils sont retirés. La superficie des mines examinées s'élevait entre 6 et 196 hectares. En fonction de leur emplacement précédent dans la mine, les mines ont été divisées en zones de restauration. Leur superficie s'élevait de 0,4 à 135,6 hectares et leur âge de plantation s'élevait de 10 à 26 ans. Le succès de ces opérations de restauration s'est confirmé par l'augmentation de la taille et de la densité des troncs, ce qui a contribué à la restauration de la structure forestière, ainsi que par l'augmentation du nombre d'espèces dans la zone restaurée (König et al., 2022).

Tableau 11 - Pourcentages relatifs aux diverses méthodes de régénération (plantée et naturelle) et aux origines des espèces (indigènes et exotiques), ainsi qu'à leurs combinaisons et la densité de tiges pendant 2009-2017 (König et al., 2022).

		Méthode de régénération		Arbres plantés		Régénération naturelle	
		plantée	naturelle	indigènes	exotiques	indigènes	exotiques
Densité de la tige	année						
	2009	68.6	31.4	64.6	35.4	90.2	9.8
	2017	12.0	88.0	82.3	17.7	98.0	2.0

* **Indigènes** : représente la proportion des espèces végétales indigènes qui caractérisent la région, c'est-à-dire des espèces qui ne sont pas exotiques.

* **Exotiques** : Il indique le pourcentage d'espèces végétales qui proviennent de lieux éloignés, ce qui signifie qu'elles ne sont pas d'origine indigène

Indice de Shannon : Les interactions entre la zone forestière environnante, les zones minières, les paramètres agricoles et la texture du sol étaient liées à la diversité des espèces (Pla, n.d.). Avec des sols caractérisés par un pH élevé et une teneur importante en argile, la diversité des espèces s'est rétablie plus rapidement à mesure que la superficie de la forêt environnante augmentait. Il a été observé que la grande richesse des espèces cultivées a un effet positif sur les résidus secs et humides.

Sur la base du tableau 11, nous observons un succès remarquable dans la récupération des espèces locales par rapport aux espèces exotiques.

En résumé, les conclusions indiquent que le succès des opérations de restauration étalées sur plus de vingt ans s'est concrétisé et a conduit à la formation d'une couverture végétale dense et diversifiée. Néanmoins, la réhabilitation des zones minières abandonnées dans les forêts demeure quelque peu ardue en raison des caractéristiques particulières du contexte pédologique et paysager. Il y a certains cas où la restauration infructueuse du couvert végétal sont observés en raison de la consommation par les lapins de la plupart des plantes cultivées, en plus du surpâturage. Par exemple, une clôture doit être installée pour protéger les espèces végétales et les arbustes au moins jusqu'à leur pleine croissance (Cullen et al., 1998).

III.2.1.6 Le Retour de la Vie : Réhabilitation et Restauration Écologique dans la Forêt Atlantique

Il existe un cas unique et impressionnant de remise en état d'une ferme endommagée à la suite d'activités d'exploitation incontrôlées, notamment l'extraction du fer. Ou, comme certains préfèrent l'appeler « le Miracle de la Forêt Atlantique ». Cette ferme appartient à Sebastião Salgado et sa femme Lélia, qui étaient absents des lieux pendant une longue période. Ils ont réhabilité leur ferme, située dans la forêt atlantique du Brésil.

L'ampleur du changement qu'ils ont opéré est frappante : le site, retrouvé dans un état déplorable, est devenu un paradis vert. Cela a profité à toute la région. À la fin de 1999, plus de deux millions d'espèces et variétés d'arbres et de plantes avaient été replantées sur une période de près de vingt ans, couvrant une vaste superficie de plus de 600 hectares. Ils ont réhabilité 90 % de leur ferme. Ce processus a été un grand succès, comme en témoigne la propagation et la prolifération généralisée des arbres tropicaux endémiques (figure 31).

Pour cette raison, ce site a été classé Réserve Particulière du Patrimoine Naturel (RPPN) au Brésil. Après ce succès de restauration de la forêt, la vie a repris, les organismes vivants ont retrouvé leur place écologique naturelle et de nombreuses espèces d'oiseaux et de mammifères sont revenues (Privé M, 2021).



Figure 31 - Localisation de la forêt atlantique, aussi connue sous le nom de Mata Atlântica (Forests, 2024).

En plus de ce qui précède, les auteurs (Silva et Nunes, 2017) ont confirmé dans leur livre que d'ici 2030, le reboisement d'environ 12 millions d'hectares sera achevé. Cette initiative découle de la volonté du gouvernement brésilien d'encourager les projets de préservation de l'environnement et d'atténuation des effets du changement climatique observés à travers le monde. Cependant, le Fonds mondial pour la nature (WWF) a également déclaré que d'ici 2030, on estime que 170 millions d'hectares de forêts seront détruits ou dégradés. Cette situation devient véritablement terrifiante. Les opérations de reboisement ne sont certainement pas une coïncidence. Au début, le photographe Sebastião Salgado a perdu près de soixante arbres à cause d'énormes fourmis ou de fortes pluies, comme il l'a expliqué lors d'une de ses interviews.



Figure 32 -Lantana Camara parmi les plantes destinées au reboisement du site (Interview & Clergeat, 2019).

En 2019, Global Forest Watch (GFW) a signalé que 12 millions d’hectares de forêts tropicales avaient été détruits en 2018, et ce chiffre continue d’augmenter aujourd’hui, ce qui est alarmant. Ainsi, l’une des choses merveilleuses observées lors de ce processus de restauration écologique est la prolifération et le rétablissement de nombreuses espèces animales menacées. (“Comment Le Photographe Sebastião Salgado a Permis Le Reboisement De 700 Hectares De Forêt Au Brésil,” 2018). Un meilleur exemple d’une meilleure réhabilitation figures 32,33, et34. Prenant soin de ces plants comme on prendrait soin d’un nouveau-né pour les aider à survivre (Interview & Clergeat, 2019).



Figure 33- Pour servir la forêt, tout le monde se réunissait pour désherber (Interview & Clergeat, 2019).



Figure 34- La transformation étonnante du site après sa réhabilitation (Interview & Clergeat, 2019).

III.2.1.7 Tentative de réhabilitation des mines de charbon dans les Appalaches

Les activités d'extraction du charbon dans la région des Appalaches ont généré d'importants déchets environnementaux, notamment la présence de substances toxiques telles que le cadmium. Ainsi, une somme considérable de sept milliards de dollars américains a été allouée pour soutenir la restauration et la réhabilitation de ces sites. Malgré les efforts tant financiers que moraux déployés, ces initiatives de restauration n'ont malheureusement pas connu le succès escompté. Au contraire, ces lieux ont connu une détérioration notable en raison des impacts écologiques, de la dégradation du sol et de la perte de ses éléments naturels, exacerbés par les effets négatifs de l'eau. Les sommets des montagnes sont éliminés pour l'exploitation du charbon figure 35. En plus des différents processus de traitement, cela a provoqué une pollution considérable de l'eau du fleuve, ce qui en soi est considéré comme une chose catastrophique pour les écosystèmes et entraînera plusieurs problèmes graves dans un avenir très proche. (Lima et al., 2016).



Figure 35- le trou important de la mine à ciel ouvert de charbon située dans les Appalaches aux États-Unis (2021).

L'expansion spatiale de la perturbation des terres causée par l'exploitation minière au charbon à ciel ouvert dans la région des Appalaches. En raison de son impact négatif sur l'environnement, notamment la détérioration de la qualité des sols et la pollution massive de l'eau, la contamination des cours d'eau en Virginie-Occidentale est directement liée à l'exploitation minière dans le bassin versant. Des analyses menées par des chercheurs ont révélé que les concentrations en sulfate dépassent les 50 mg/l (Bernhardt et al., 2012), ainsi que de la distorsion du paysage naturel laissée par l'explosion du sommet de la montagne au début des opérations d'exploitation comme nous observons dans la figure 36, l'état de cette mine de charbon est considéré comme l'un des pires au monde.

La destruction des sommets montagneux par dynamitage persiste, comme nous le voyons dans la figure 36, exposant les résidents des zones avoisinantes des Appalaches à une vulnérabilité accrue face à diverses formes de pollution. Les problèmes sociaux et la pauvreté ont connu une hausse, entraînant également une augmentation du taux de mortalité (*Report on Coal Mine Bonding in Central Appalachia*, 2018).



Figure 36- Le retrait du sommet d'une montagne au niveau de la mine de charbon dans les Appalaches, Etats-Unis (2021).

Il est important de souligner que parmi les conséquences les plus graves de l'exploitation des mines de charbon à ciel ouvert, les malformations fœtales et du système respiratoire (*Appalachian Voices*, 2012). Des études menées par l'université de Virginie-Occidentale aux États-Unis ont confirmé que la plupart des habitants des zones proches de cette mine de charbon à ciel ouvert souffrent d'une incidence élevée de malformations congénitales chez les fœtus, ainsi que d'une incidence moyenne élevée de cancer, en particulier chez les enfants, en raison de l'inhalation de nuages de poussière chargés de particules polluantes telles que des nanoparticules de silice. Ils se plaignent également de maux de tête et de lésions cutanées (De Werdna, 2015). Donc, les résidents de cette région ont droit à de meilleures conditions de vie, car ils ont travaillé dans cette mine pendant de nombreuses années pour fournir l'énorme énergie résultant de l'extraction du charbon, ce site nécessite une restauration immédiate et approfondie (Troch K, 2018).

L'aspect environnemental prend une grande importance, même s'il est souvent négligé, notamment dans le secteur minier, qui entraîne de nombreuses catastrophes environnementales telles que des inondations, des glissements de terrain, la pollution de l'eau et de l'air, et bien d'autres risques multiples (Troch K, 2018).

III.2.2 Cas des carrières

Les carrières des agrégats engendrent la formation de fosses minières, caractérisées par la création de vides miniers profonds pouvant atteindre jusqu'à 250 mètres de profondeur, ainsi que la construction de décharges de stériles pouvant s'élever jusqu'à 150 mètres de hauteur. La plupart de ces composants sont constitués de roches massives et de morceaux de roches friables (Bandyopadhyay & Maiti, 2019).

III.2.2.1 Étude morphologique pour la restauration d'une carrière de sable siliceux en « Espagne »

La zone de La Révilla est renommée pour la présence de plusieurs carrières de taille moyenne. Cependant, elles sont proches les unes des autres, ce qui accroît leur menace sur l'environnement. La multiplicité de ces carrières s'explique par le grand développement qu'ont connu les villes en Espagne au cours de cette période, plus précisément au début de la première décennie du XXI^e siècle. La région présente un climat méditerranéen, la végétation dans cette zone se manifeste par la présence de forêts denses comprenant des genévriers et d'autres espèces méditerranéennes (Duque et al., 1998).

Les différentes opérations d'exploitation ont contribué à la création d'un trou au sol d'environ 15 mètres de haut, Les habitants ont exprimé leur opposition aux activités de cette carrière en raison des conséquences environnementales remarquables dans la région. La motivation derrière ces manifestations réside dans la détérioration de la couverture végétale, les impacts sur la qualité de l'eau, ainsi que les modifications significatives du paysage naturel (Duque et al., 1998). Les éléments pris en considération dans la procédure de restauration englobent divers aspects, notamment les facteurs socio-économiques. Bien entendu, l'accent est mis sur la réutilisation du site. L'engagement dans des activités de pâturage dans la région a été évalué en tant que pratique en accord avec les caractéristiques inhérentes à la nature de la zone, Il convient de souligner également l'importance du critère de coût réduit dans l'élaboration de la conception finale du site (Duque et al., 1998). Cette carrière constitue une exploitation minière à ciel ouvert orientée longitudinalement comme nous constatons dans la figure 37.

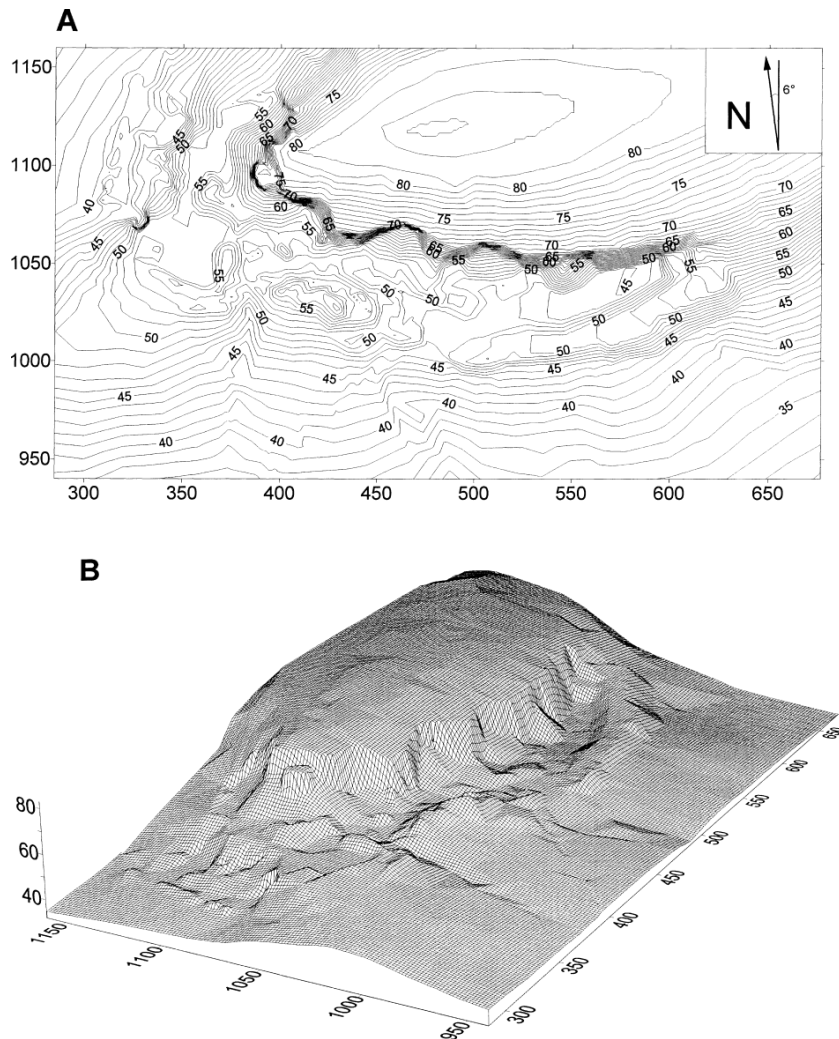


Figure 37 - la carrière abandonnée avant restauration (A - Carte topographique, B Diagramme fonctionnel de la zone impactée, Sud-Ouest (programme SURFER 5.1) Les distances sont exprimées en mètre (Duque et al., 1998).

III.2.2.1.1 Réhabilitation

Les matériaux utilisés pour remodeler la nouvelle topographie étaient principalement de texture sablonneuse avec un niveau très faible de fines, le pH était neutre et la teneur en matière organique était extrêmement faible ; il n'y avait presque aucun nutriment et aucune toxicité n'était observée, Le plan de réhabilitation est formulé en tenant compte de la disposition des matériaux grossiers dans les zones inférieures et des matériaux fins dans les niveaux supérieurs. Cette stratégie vise à accroître la rétention d'eau et à ralentir l'infiltration vers les niveaux inférieurs, dans le but de promouvoir l'auto-croissance future de la végétation (Duque et al., 1998).

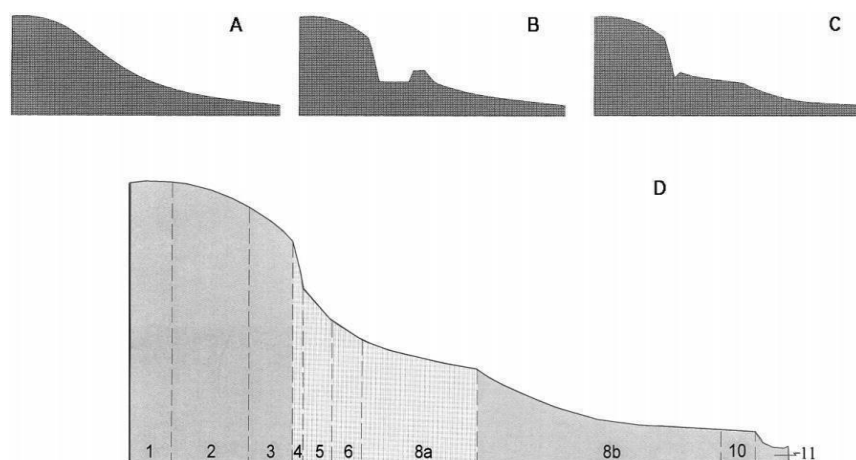


Figure 38- Évolution morphologique du versant (Duque et al., 1998).

Le dessin de la figure 38 précédente illustre les étapes de transformation que traverse le site. On remarque que le dessin « A » représente la section du talus initial avant les opérations d'exploitation, tandis que le dessin « B » montre une section typique de la carrière après la fin des opérations d'extraction, représentant une carrière abandonnée. La section « C », quant à elle, illustre l'état du site après les opérations de réhabilitation. Enfin, la section « D » présente une vue latérale du site résultant de l'aménagement géomorphologique.

La plupart des procédures de réhabilitation requièrent l'adjonction de proportions significatives de carbonates afin d'élever le pH et favoriser la croissance végétale. Dans cette situation particulière, les analyses ont mis en évidence une insuffisance en engrais, jouant un rôle crucial dans la stimulation de la végétation. Donc, L'utilisation d'un engrais avec un pourcentage élevé d'azote est nécessaire par exemple les légumineuses sont également nécessaires. Les experts ont convenu des espèces à implanter en fonction de divers facteurs tels que les conditions météorologiques et la nature locale. Le mélange comprenait une sélection de différentes espèces végétales (comme *Onobrichis sativa* et *Lolium rigidum*) qui ont été plantées dans des proportions variables (Duque et al., 1998). Souvent, la restauration vise à stimuler les processus de régénération naturelle. Pour garantir la continuité de la régénération, il est nécessaire de se baser sur des éléments géomorphologiques (Horstmann et al., 2023).

III.2.2.2 La Carrière de Mercure d'Ismail à Azzaba, Skikda : Un Appel Pressant à la Réhabilitation

Similairement à la carrière de mercure localisée dans la région d'Azzaba de la wilaya de Skikda, en Algérie, aucune mesure de réhabilitation n'a été mise en œuvre, malgré la disponibilité de nombreuses études détaillant le degré de dangerosité de ce site et sa menace réelle sur l'eau et les ressources de la région dans son ensemble. Il devient donc impératif de fournir des informations complètes et précises concernant cette mine à ciel ouvert, ainsi que l'étendue de ses impacts environnementaux, pour faciliter les étapes cruciales de sa restauration et atténuer ses conséquences néfastes sur l'environnement et la santé humaine. Un plan a été élaboré par les auteurs du livre (Negm et al., 2020) pour traiter le sol contaminé provenant de la mine de mercure, proposant notamment le retrait de la couche de sol. En creusant jusqu'à une profondeur ne dépassant pas vingt centimètres, il est ensuite recommandé d'appliquer une chaleur intense, comme indiqué dans la figure 39 ci-dessous. Cependant, cette méthode reste sujette à controverse, ce qui souligne l'importance de remplir ces fissures et de les isoler totalement de la surface si le sol contaminé n'est pas traité. Ceci vise à éviter tout contact avec une source d'eau (Negm et al., 2020).

Les résultats des recherches approfondies menées par des chercheurs au niveau de la mine de mercure ne laissent aucun doute : les échantillons de sol sont dangereusement contaminés par des métaux lourds qui constituent une menace pour la santé humaine et les ressources d'eau. Ces échantillons montrent un niveau de minéralisation alarmant, le mercure étant le principal responsable de cette contamination

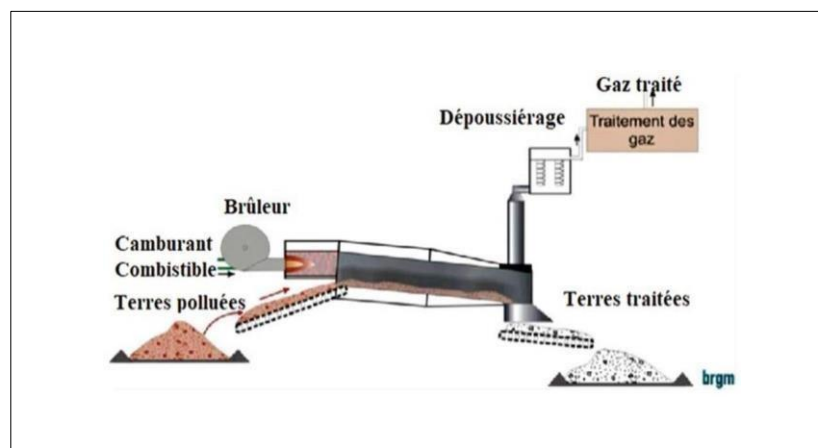


Figure 39 -Proposition de traitement des sols contaminés par le mercure, diagramme représentant la désorption thermique (Negm et al., 2020)

La figure 39 précédente illustre un schéma proposé par (Negm et al., 2020) pour le traitement des sols contaminés par le mercure à l'aide d'une chambre de combustion. On y voit un tas de terres contaminées traversant initialement un brûleur, qui est un dispositif chauffant le matériau circulant dans un conduit et le traitant thermiquement. Avec l'apport en combustible, tous les éléments nécessaires à la réaction dans le brûleur sont réunis, ce qui décompose les polluants en vue d'une élimination ultérieure. Après traitement, le sol est décanté et séparé des contaminants. Les poussières générées par le processus de traitement sont collectées en déviant le dispositif situé en haut. L'illustration montre également une sortie en haut pour les gaz, qui ont été purifiés afin de prévenir la pollution atmosphérique après traitement d'un sol contaminé par des éléments dangereux de mercure (Negm et al., 2020).

III.2.2.3 Transplantation d'Espèces Menacées de Prairies Sèches dans d'Anciennes Carrières de Basalte : Exemple des Collines de Český Středohoří en République Tchèque

L'exploitation des carrières a eu un impact significatif sur la région, entraînant la destruction des prairies sèches, qui ne sont désormais présentes que sporadiquement dans de petites zones adjacentes aux carrières (Novák & Prach, 2010). Pour réutiliser les sites miniers abandonnés pendant au moins cinq ans, six types d'herbes distincts ont été fournis, adaptés aux caractéristiques et au climat de la région. Deux ensembles de six parcelles d'une superficie chacune de 11 m² ont été créés dans chaque carrière. Dans chacune de ces parcelles, différentes espèces végétales ont été plantées avec 100 graines, réparties en trois groupes distincts. Ces zones ont été étroitement surveillées et entretenues pendant trois ans. Les évaluations ont été fondées sur le taux de germination, la survie des espèces sur une période de trois ans dans les carrières et la succession saisonnière dans différentes régions. Les terrains expérimentaux présentent des sols de carrière plats avec un substrat homogène. Le substrat était initialement composé de 10 % de particules d'argile et de gravier de taille inférieure à 3 cm (Novák & Prach, 2010).

Selon les données de cette recherche importante, on peut observer que 1477 plantules ont germé, mais elles n'ont pas toutes émergé dès la première saison. Il faut noter que certaines espèces nécessitent deux ans pour germer.

III.2.2.4 Réhabilitation des talus rocheux d'une carrière abandonnée à « Ningbo, Chine », par la phytoremédiation

Le développement économique crucial auquel un pays comme la Chine assiste aujourd'hui dépend de l'avancement de plusieurs secteurs, tels que les mines et les carrières, qui laissent malheureusement derrière eux des pentes abruptes constituant un danger imminent pour la population et le sol. L'étude actuelle, que nous aborderons dans cette section, a discuté de la réhabilitation d'une carrière avec des plantes de nature grimpante. Laquelle est renommée pour sa capacité à résister à la chaleur et à sa faible nécessité en arrosage, notamment pendant la saison estivale (Schnitzer, 2002), malgré les difficultés présentes, telles que la stabilité du sol compromise en raison de l'angle de pente important dépassant les 70 degrés (Wang et al., 2009).

La majorité des flancs présentaient une élévation de pente d'environ 30 mètres. Sachant que le matériau rocheux dominant dans la région est constitué de tuf, Les opérations de plantation impliquaient la création de plusieurs trous d'un diamètre moyen ne dépassant pas vingt centimètres et d'une profondeur maximale de trente centimètres dans le sol. Ces trous étaient espacés à 1,5 mètre les uns des autres, le début du processus de versement d'engrais avec le sol approprié dans chaque trou. Les plantes sélectionnées ont été placées en alternance dans les trous. Des espèces de plantes locales à caractère grimpant ont été choisies, en plus d'ajouter quelques semis disponibles (Wang et al., 2009).



Figure 40 - "*Humulus scandens*" est l'une des plantes grimpantes sélectionnées (Chen et al., 2012).



Figure 41 - La densité de croissance de la plante *Humulus scandens* : c'est la raison pour laquelle elle a été choisie en raison de sa caractéristique grimpante (*Humulus Scandens* (HUMJA)[Photos]] EPPO Global Database, 2024)

Le taux de survie des plantes plantées après 30 jours de transplantation était très satisfaisant, dépassant quatre-vingt-dix pour cent, indiquant ainsi le succès du processus de restauration. La plante *Humulus scandens* (figures 40 et 41) a maintenu son développement pendant la période estivale davantage que les autres plantes, même si elle a connu un ralentissement de croissance au cours de la deuxième période.

Cependant, ce déclin était notablement moins prononcé par rapport aux autres variétés ; Nous pouvons tirer une conclusion de cette étude en affirmant que les opérations de restauration et de revégétalisation des pentes minières sont hautement complexes et exigent une expertise dans la sélection et la plantation de plantes grimpantes, en particulier celles capables de résister aux conditions difficiles. Il est également crucial de les soutenir par la création de trous adjacents au sol afin de retenir l'eau de pluie, favorisant ainsi leur survie (Wang et al., 2009).

III.2.2.5 Transformation d'une carrière de granulats abandonnée en une installation de niveau international, stade 19 Mai 1956-Annaba Algérie

La stratégie de reconstruction et de réhabilitation des carrières abandonnées implique la collaboration de plusieurs spécialistes issus de disciplines diverses telles que les sciences environnementales, la géologie, le génie géotechnique et l'architecture, entre autres, tous travaillant vers un objectif commun (Bianconi & Filippucci, 2021). Les sols souterrains et superficiels doivent être redistribués pour faire pousser des plantes indigènes. Mais dans un premier temps, il faut niveler les pentes provoquées par les activités d'exploitation. La communauté bénéficie des efforts réussis de revégétalisation du site en termes d'opportunités sociales, économiques et récréatives ainsi que de l'établissement d'un environnement favorable aux habitats importants (Blair J, 2019).

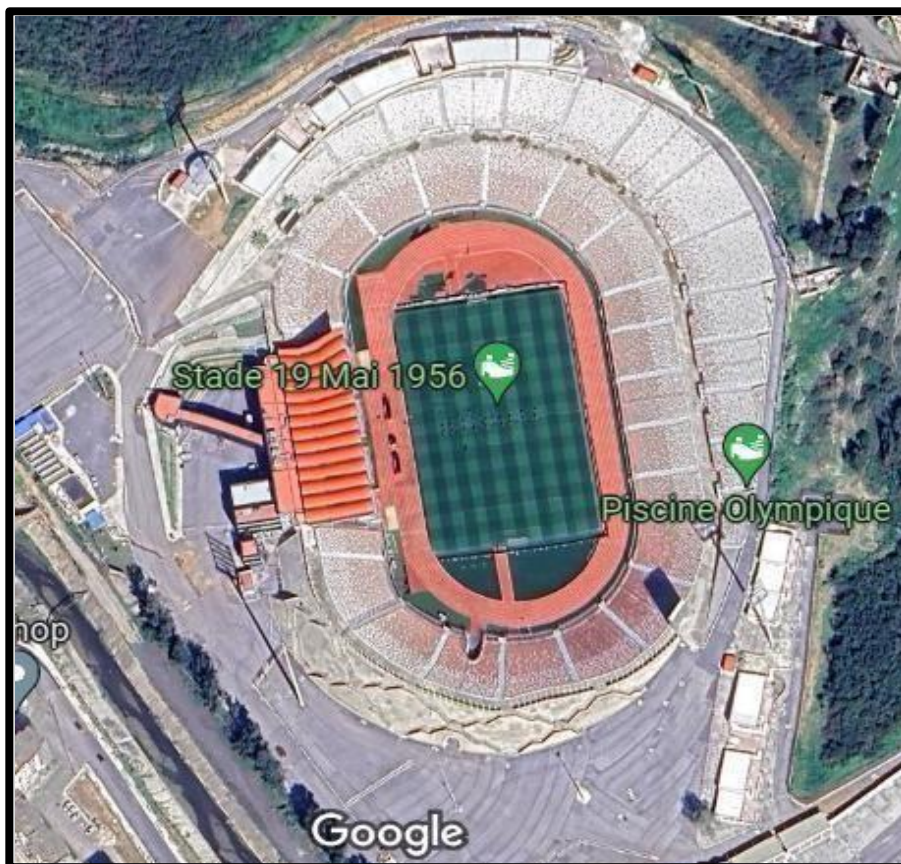


Figure 42 - Stade 19 Mai 1956, Annaba, Algérie, (Google maps, 2024).

Une fois que les carrières de granulats sont réhabilitées, elles ont des utilisations, ces sites sont divers et nombreuses et sont généralement plus productives et intégrées aux zones

environnantes qu'elles ne l'étaient avant l'exploitation. Des exemples d'utilisations des sites pour les sites réhabilités comprennent :

Il y a des utilisations multiples : on peut l'utiliser comme un espace ouvert de divertissement, des terrains de golf ou des terrains de football, comme c'est le cas pour le stade du 19 mai 1956 à Annaba, en Algérie figure 42. Ce stade, qui était autrefois une carrière de granulats, a été réhabilité pour devenir l'un des plus grands stades d'Algérie, comme on peut l'observer dans la figure 43. Cela illustre parfaitement la signification réelle de la réhabilitation, où une personne ne peut pas réaliser, en le voyant, qu'il était auparavant une carrière de granulats ou une autre substance (Blair , 2019).

III.2.2.6 Végétalisation progressive d'une carrière de granulats au fil des travaux d'exploitation, El Fedjoudj , Guelma, Algérie

Ils pourraient également être convertis en terres agricoles, avec la plantation de vignes et d'oliviers, comme c'est le cas dans la carrière de granulats de la SAPAM à El Fedjoudj, dans la wilaya de Guelma, en Algérie. Une partie de la carrière a été réhabilitée pendant la poursuite des opérations d'exploitation. Au cours des deux dernières années, les ingénieurs ont planté des oliviers et nivelé les pentes. Les plants ont connu un développement notable au bout de deux ans, comme le montre la figure 43 suivante.



Figure 43 - Revegetation par plantation des oliviers au cours des opérations d'exploitation au niveau de la carrière des agrégats SAPAM, El Fedjoudj, Guelma (photographie par F.Djedid)

- ✓ Une étude suggère d'utiliser plusieurs indicateurs pour évaluer le succès des opérations de restauration des sites miniers, notamment :

- Maintien d'une diversité et d'une structure communautaire similaires à celles d'origine.
- Utilisation des espèces végétales locales pour assurer leur disponibilité.
- Présence de groupes fonctionnels favorisant une stabilité à long terme.

Capacité de l'environnement physique à soutenir la croissance démographique des espèces.

- Maintien de fonctions standard dans l'écosystème restauré.
- Intégration harmonieuse avec le paysage environnant.
- Élimination des menaces potentielles pour la biodiversité restaurée.
- Capacité de résilience face aux perturbations habituelles.
- Promotion de l'autosuffisance de l'écosystème restauré (Balensiefer et al., 2004).

Les carrières d'agrégats abandonnées représentent des défis considérables résultant des activités humaines, nécessitant une réhabilitation et une compensation des dommages causés par divers processus d'exploitation. Ces processus comprennent l'élimination de la végétation, la pollution des eaux de surface et souterraines, ainsi que la pollution atmosphérique et visuelle (Dal Sasso et al., 2012), ainsi l'altérations de la topographie du site et impacts sur la composition et la morphologie du sol (Talentó et al., 2020).

III.3 Solution attendus pour la réhabilitation des sites d'exploitation des carrières : restauration, aménagement, ré végétation du site

Le domaine minier joue un rôle important dans le développement des pays. Ce secteur présente de nombreux avantages, malheureusement en plus de plusieurs effets négatifs. Les différentes activités des mines entraînent plusieurs conséquences désastreuses qui affectent négativement l'environnement entourant le site, surtout s'il s'avère qu'elles sont reliées aux sources d'eau de la région. Pour cette raison, la plupart des mines situées à proximité des habitants se heurtent au rejet de la population locale, consciente des conséquences qui en découleront par la suite dans cette zone. Dans cette partie de la thèse, nous discuterons des avantages les plus importants offerts par la réhabilitation des mines à ciel ouvert et carrières, la restauration de l'état naturel du site et d'autres idées d'investissement qui ont un impact positif sur tous les aspects de l'économie, y compris, les aspects sociaux et de protection écologique...etc.

La majorité des habitants des zones minérales qui sont en cours d'exploitation ou qui ont déjà été exploitées s'attendent à ce que l'environnement et la santé humaine soient protégés ou que les dommages soient traités en tenant compte des aspects financiers des projets de

restauration du site après l'achèvement des différentes phases d'exploitation. Il est fort probable que la revégétation du site minier soit la plus efficace et la moins coûteuse, Il est bien connu que l'exploitation minière à ciel ouvert détériore les paysages naturels, ayant un impact négatif sur l'environnement et les êtres vivants qui y habitent.

Les mines sont fréquemment localisées sur les flancs des montagnes et parfois au cœur des forêts, ce qui entraîne la dégradation de l'habitat, la migration des espèces et les changements écologiques, ainsi que la pollution de l'eau (Miller & Zégre, 2014). En outre, les mines causent une pollution de l'air en raison des émissions de particules fines (Mummey et al., 2002), comme dans le cas des carrières. C'est pourquoi la réhabilitation des sites miniers est devenue nécessaire pour rétablir une vie normale dans les zones exploitées tout en préservant l'environnement et en assurant la santé humaine, en plus de créer des opportunités d'emploi pour les résidents en y investissant, comme la création de centres de divertissement ou de sports ou simplement en restaurant le couvert végétal. Bien qu'il y ait beaucoup de mots, le but est le même. Certains d'entre eux qualifient ces processus de restauration ou de remise en état de l'environnement, tandis que d'autres les qualifient de réhabilitation ou de revégétalisation (Restoration, 2004).

La plupart des mines à ciel ouvert ou des carrières ne peuvent pas être réhabilitées ou sont très difficiles à réparer. Cela est le résultat d'une exploitation inappropriée ou aléatoire, qui laisse des sites de carrières complètement défigurés avec d'immenses trous (Jae Hyeon et al., 2010). Le mot *remédiation* signifie une variété de méthodes pour réduire la contamination du sol (Beames et al., 2014). *Réclamation* c'est la remise en état des terres signifie stabiliser celles-ci au moyens géotechniques (Adriano et al., 2004). Dans un contexte général, la réhabilitation désigne l'action visant à restaurer l'état initial d'un site, avec cette démarche dépendant de l'état historique du site à rétablir (Restoration, 2004).

La réalisation de la réhabilitation des mines à ciel ouvert et des carrières a un impact significatif en créant des opportunités d'emploi pour les résidents locaux ainsi que pour les mineurs qui se retrouvent sans travail après la clôture des opérations minières. Ce processus ne se limite pas seulement à la restauration de la végétation, mais englobe l'ensemble de la zone adjacente au site minier. Par exemple, outre la replantation de plantes et d'arbres caractéristiques de la région, la réhabilitation peut également inclure des projets visant à réaffecter la zone à d'autres usages. Par exemple, dans une zone pastorale, la réhabilitation peut être orientée vers des activités pastorales, tout en générant des opportunités d'investissement qui profitent aux résidents locaux et même aux visiteurs de la région (Svobodova et al., 2019). Les travaux de réaménagement des sites miniers contribuent largement à la récupération des habitats. Ces derniers, que ce soient des habitats naturels ou semi-naturels, jouent un rôle crucial dans la préservation des espèces. En plus de fournir divers services écosystémiques, tels que le stockage du carbone et la pollinisation, ces habitats ajoutent une dimension esthétique et naturelle au paysage (Hendrychová et al., 2020). Ces sites pourraient aussi par exemple être aménagés en étangs et lacs de pêche afin d'encourager la faune aquatique.

La restauration écologique implique l'emploi de méthodes qui simulent des processus naturels afin de rétablir les fonctions écologiques de la zone endommagée. Il est possible de favoriser la stabilité des sols et de résoudre les problèmes de pollution en utilisant

des méthodes de bio-ingénierie des sols et la phytoremédiation, donc, il est essentiel de surveiller les caractéristiques physiques et chimiques ainsi que les caractéristiques biologiques des sols miniers (Mukhopadhyay & Maiti, 2018). La fraction grossière joue un rôle crucial dans la qualité des sols miniers : la présence d'une importante quantité de graviers restreint la croissance des racines des plantes et des espèces d'arbres cultivés, ce qui influence la productivité et la densité des forêts. (Mukhopadhyay et al., 2016).

Il est primordial d'analyser la texture du sol et sa capacité à capter l'eau pour encourager la croissance des végétaux. Un sol multicouche a une capacité de rétention d'eau plus élevée que celle d'un sol homogène (Wang et al., 2020). Afin de déterminer l'état de compactage d'une couche de sol, les paramètres les plus couramment utilisés sont la densité sèche apparente afin de décrire les propriétés du sol en relation avec la qualité du sol (Håkansson & Lipiec, 2000). Le pH et le carbone organique, par exemple, sont des éléments essentiels à prendre en compte lors de la préparation des opérations de restauration, car ils jouent un rôle essentiel dans les propriétés chimiques du sol, Le pH du sol est également un facteur essentiel dans le processus de revégétalisation des mines à ciel ouvert et des carrières, car il influence la disponibilité des nutriments et entrave la mobilité des oligo-éléments nocifs (Mukhopadhyay & Maiti, 2018). D'autre part, la présence de sels solubles entrave considérablement le développement des jeunes arbres et des plantes, ce qui entraîne inévitablement une baisse de la production à mesure que les concentrations de sel augmentent, (Rodrigue & Burger, 2004).

L'importance de la conductivité électrique dans l'impact sur les caractéristiques du sol et la production végétale a été confirmée par des recherches scientifiques comme celle de (Torbert et al., 1988), notamment dans le secteur de l'exploitation minière et de la réhabilitation des mines à ciel ouvert. Par exemple, elles ont validé la présence d'une corrélation directe entre la composition fine du sol et sa capacité à transporter de l'électricité. Plus son composant est fin, plus sa conductivité électrique est élevée.

En complément du carbone organique du sol (COS), qui représente un indicateur essentiel pour évaluer la qualité du sol. Donc, la disponibilité suffisante de carbone organique dans les sols est l'un des éléments essentiels et indispensables au renouvellement des écosystèmes et contribuant ainsi à la réussite de la réhabilitation des sites miniers (Mutio et al., 2023).

Et d'un autre côté, les problèmes de santé du sol, tels que l'érosion et la diminution de l'accumulation de sol, sont intensifiés en cas de perte de carbone organique du sol (Rice et al., 2021). Il est essentiel de prendre en compte toutes ces normes, ainsi que de nombreuses autres, afin de garantir une réhabilitation efficace et durable des sites miniers, ce qui a un impact positif sur le territoire et ses habitants. De cette manière, cela compense les conséquences néfastes des activités de l'exploitation minière précédentes. Nous parvenons ainsi à réaliser simultanément deux objectifs : d'une part, la restauration et la revégétalisation, et d'autre part, la mise en place de projets d'investissement rentables qui contribuent à l'environnement, à la société, à l'économie, voire au tourisme.

III.4 Conclusion

Pendant notre étude bibliographique, nous avons fait la découverte d'une analyse

littéraire qui présentait différentes perspectives pour aborder la problématique de l'exploitation post-minière. Suite à une analyse minutieuse, nous avons établi la conclusion suivante :

- Dans les années à venir, il sera crucial de conduire des études supplémentaires sur la restauration des mines. Pour améliorer l'efficacité des travaux de réhabilitation,
- Il est essentiel d'examiner les diverses possibilités et les répercussions associées.
- Explorer l'idée d'impliquer un groupe plus large d'experts dans l'analyse de faisabilité serait avisée.
- il importe de considérer l'extension de la méthodologie proposée en intégrant différentes théories de l'incertitude.

Cette recherche révèle une lacune dans le processus de sélection de la meilleure stratégie de réhabilitation post fermeture des mines. Il est envisageable que les options et les normes varient selon la région et la période de l'année, ce qui peut engendrer une diversité de résultats (Deveci et al., 2022).

Les pratiques de réhabilitation des mines à ciel ouvert et carrières se sont considérablement améliorées au fil des ans, grâce à l'élaboration de normes de restauration qui donnent la priorité à la préservation de l'environnement. En réalisant une restauration totale du site d'exploitation, l'environnement bénéficie grandement, et il crée plusieurs possibilités pour les résidents vivant dans les zones voisines (Blair, 2019).

La réhabilitation des terres dégradées par l'activité minière constitue une chance de restaurer la sécurité environnementale et de favoriser le développement d'un écosystème durable et autosuffisant. Leur impact combiné contribue à la création de bénéfices sociaux, économiques et environnementaux. Cela inclut la réduction de la pauvreté et du chômage, la lutte contre le changement climatique et le renouveau des terres détériorées (Ahirwal & Maiti, 2021).

Chapitre IV. Matériels et méthodes

IV.1 Introduction

IV.2 Caractérisations physico-chimique

IV.3 Résultats et Discussion

IV.4 Perspectives d'un développement durable (économique, social et écologique)

IV.5 Conclusion

IV.1 Introduction

L'une des raisons qui ont conduit à l'exacerbation des problèmes environnementaux est le développement démographique et la croissance rapide des villes, et par conséquent le développement industriel, ce qui a entraîné une augmentation inévitable de toutes les formes de pollution (air, eau et sol). Par conséquent, la demande de ressources naturelles utilisées dans la construction et le bâtiment augmente, ce qui conduit naturellement à leur épuisement puisqu'elles sont non renouvelables (Huo & Peng, 2023).

Il existe donc plusieurs solutions visant à réduire la surexploitation de ces matériaux grâce à leur recyclage, c'est-à-dire le recyclage de gravier dans la construction d'installations et de routes. En outre, la faisabilité économique de tels projets profite non seulement aux personnes et au pays, mais sert également directement l'environnement (Silva et al., 2019).

Comme nous l'avons expliqué précédemment, ces pierres de construction sont extraites par des méthodes mécaniques dans le but de minimiser les volumes importants des roches par le dynamitage, les différentes opérations de concassages (primaire et secondaire) de broyage et criblage et fin de transportation de ces matériaux à l'aide des engins et des camions.

Ces diverses opérations préparatoires génèrent d'importantes émissions atmosphériques qui causent des dommages à l'environnement et aux organismes vivants (Sobczyk W, 2014). À cet égard, nous présenterons dans cette importante partie pratique les principales méthodes que nous avons utilisées pour l'évaluation environnementale du site exploité d'une carrière d'agrégats située dans la commune d'Héliopolis, à Guelma, dans le Nord-Est de l'Algérie.

Au vu des résultats, notamment concernant les particules atmosphériques présentes dans les poussières de carrières d'un diamètre aérodynamique moyen inférieur ou égal à 2.5 μm et 10 μm (PM2.5, PM10), reconnues comme présentant un risque sérieux pour la santé respiratoire et l'environnement en général (Chen et al., 2022). Donc, la situation environnementale à Héliopolis est préoccupante car les concentrations mesurées confirment que la situation environnementale de site nécessite une attention accrue afin de réduire les émissions et leurs effets nocifs. Outre le bruit et les perturbations et les vibrations causés par l'extraction des roches, il existe également un risque de contamination de l'eau par les métaux lourds.

De plus, l'accumulation de poussière sur les branches et les feuilles des arbres peut entraver la photosynthèse, entraînant une réduction de la qualité des cultures et une déforestation (Tarannum et al., 2024 ; Soheili et al., 2023). Ces conséquences potentielles sont particulièrement préoccupantes compte tenu de la couverture végétale significative dans la zone d'étude. Par conséquent, dans ce contexte, nous avons mené une évaluation environnementale globale de la carrière de granulats d'Héliopolis concernant son impact sur la qualité de l'air, de l'eau et du sol et sur la flore locale. Ainsi, grâce à des dispositifs technologiques modernes, nous avons pu détecter les principaux éléments chimiques et minéraux présents dans les poussières émanant de la carrière, notamment grâce à l'utilisation d'un appareil multifonctionnel de mesure de la qualité de l'air PCE-RCM 8. Marque Fambasis, ainsi que des analyses physiques et chimiques des poussières par DRX et FRX et les analyses physicochimiques des échantillons représentatives des sols, des eaux, des plantes et des arbres situés à proximité du site d'étude.

Avec l'application de microscope électronique à balayage MEB ou (SEM en anglais) aussi pour bien éclaircir les formes de ces particules minuscules. Ces techniques d'analyse sont reconnues pour leur précision analytique des échantillons et sont largement utilisées dans divers domaines. Il ne faut pas oublier l'apport considérable du dispositif MEB, qui permet une description précise des échantillons étudiés avec beaucoup de soin et de précision, garantissant ainsi une analyse correcte des résultats obtenus (Mokobi, 2024).

Nous avons également mis en évidence des moyens pouvant être pris pour réduire ces effets indésirables et avons même suggéré des idées pour réintroduire la vie dans de tels cas, ce qui nécessite la promotion de l'aspect environnemental ainsi que de l'aspect investissement pour réaliser un développement durable.

IV.2 Caractérisations physico-chimique

IV.2.4 Evaluation de la qualité de l'air

IV.2.1.1 Utilisation d'un dispositif moniteur de qualité de l'air « Fambasis »

Pour analyser la qualité de l'air dans la zone d'étude, nous avons installé six stations pour collecter les poussières volatiles provenant des différentes opérations d'exploitation à l'intérieur de la carrière, à des distances variées (S1, S2, S3, S4, S5, S6) comme nous observons dans la figure 44.

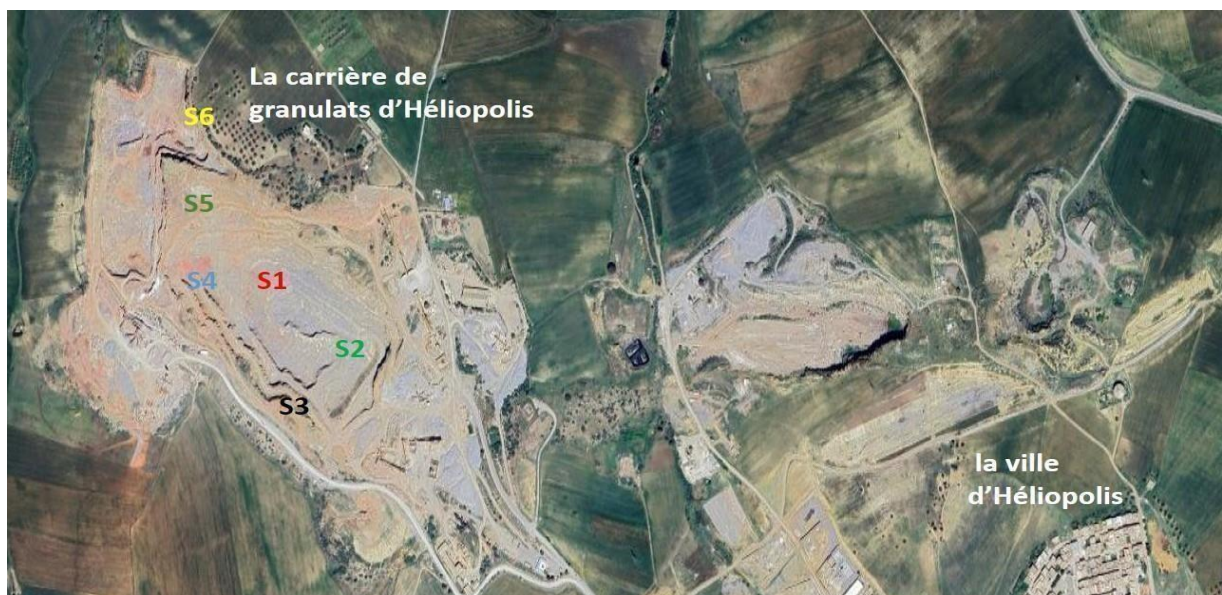


Figure 44-Positions des stations d'échantillonnage de poussière dans la carrière d'Héliopolis («Google Maps », 2024).

De plus, nous avons utilisé un appareil de détection de la qualité de l'air figure 45 à côté de chaque station lors des opérations d'extraction de granulats (concassage, broyage et criblage). Après avoir collecté les échantillons de poussières, nous les avons amenés au laboratoire pour effectuer une analyse par fluorescence X (FRX) et par Spectroscopie des rayons X (DRX) afin de révéler leur composition et pour déterminer la quantité et des éléments présents dans les échantillons. Ce processus était simple et automatisé.

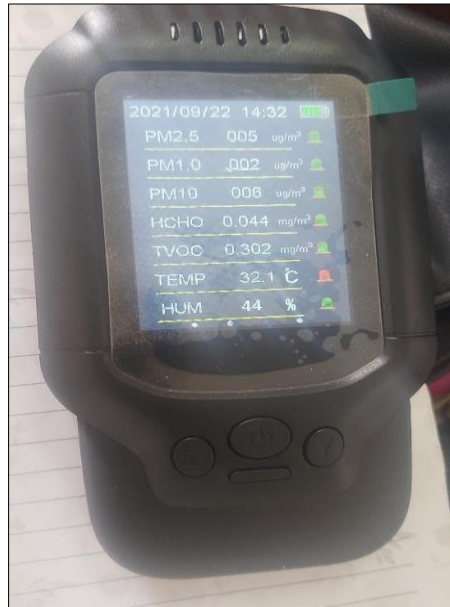


Figure 45- détecteur de la qualité de l'air : Le compteur de qualité de l'air : un appareil multifonctionnel de mesure de la qualité de l'air PCE-RCM 8. Marque : « Fambasis »

IV.2.1.2 Analyse des échantillons de poussières par DRX « D2 PHASER »

La diffraction des rayons X (DRX) figure 46, est une technique analytique avancée qui présente de nombreux avantages pour la détection des compositions minérales dans divers échantillons tels que la poussière, les roches et le sol. Cette technologie permet aux chercheurs d'analyser avec précision ces substances sans déformer l'échantillon ni compromettre ses propriétés (« Analyse De Matériaux Par DRX (Diffraction Des Rayons X), 2023 »). C'est pour cela la DRX est L'une des méthodes les plus importantes pour caractériser les minéraux, qui utilise des ondes électromagnétiques, une générateur haute tension et une source de rayons X (Whittig & Allardice, 2018).



Figure 46 -Diffractomètre à rayons X de paillasse type BRUKER D2 PHASER

IV.2.1.3 Examen des échantillons de poussière provenant de carrière par FRX « S8 LION »

L'analyse par fluorescence X (XRF) figure 47 est très importante dans les sciences analytiques, d'autant plus que cet appareil joue un rôle important dans les tests d'homogénéité et la détection des compositions de divers échantillons de sol, poussières, minéraux, etc. Les résultats obtenus par cette technique XRF sont bien conformes aux valeurs approuvées, en plus de ceux résultant de l'utilisation d'autres techniques analytiques (Wiggershaus et al.,2024).



Figure 47-Spectromètre de fluorescence S8 LION, machine à rayons X dispersifs Bruker AXS, Allemagne

IV.2.1.4 Observation et analyse des poussières minérales au moyen du microscope électronique à balayage (MEB)

En plus de ce qui précède, nous avons utilisé un microscope électronique à balayage pour analyser les échantillons de poussière recueillis dans la carrière, afin de déterminer leur forme et leurs dimensions très précises. , concernant l'échantillon que nous souhaitons étudier "la poussière" qui est une poudre blanche très fine, est fixé dans le faisceau d'électrons. Pour obtenir des résultats précis, l'échantillon doit être fin, permettant ainsi aux électrons de le traverser facilement (KittrickJ. A, 2015).

Ce dispositif permet d'analyser les propriétés des échantillons avec une haute résolution, en utilisant un faisceau d'électrons pour créer une image détaillée de la surface de l'échantillon. La spectroscopie à dispersion d'énergie à l'échelle nanométrique (EDX) est utilisée pour recueillir des informations préliminaires sur l'échantillon étudié. Lorsque l'échantillon interagit avec les électrons émis par le dispositif, il émet des photons X caractéristiques. Grâce à l'analyse EDX du spectre recueilli, les éléments de la composition deviennent clairs. Par conséquent, ce dispositif fournit des informations détaillées sur la composition principale de l'échantillon (Guo R, 2023). L'utilisation d'un microscope électronique à balayage (MEB) figure 48 pour l'imagerie à haute résolution est donc essentielle.



Figure 48- Microscope électronique à balayage PHILIPS / FEI model QUANTA 250

IV.2.4 Evaluation de la qualité de l'eau

Pour analyser l'eau située à proximité des installations de traitement de granulats dans la carrière d'Héliopolis, nous avons collecté des échantillons d'eau de sources et de surface. Après la collecte des échantillons, nous avons effectué une analyse des propriétés physiques et chimiques. Notre objectif principal était de déterminer si la poussière de carrière contenait des éléments susceptibles d'affecter la qualité de l'eau, notamment celle destinée à la consommation, et d'étudier la possibilité de contamination des eaux souterraines. Cela nous permettrait d'établir un lien entre les activités de la carrière d'Héliopolis et leur impact potentiel sur les cours d'eau environnants. Ce type d'analyse permet de déterminer la concentration de minéraux dissous dans l'eau. Déterminer la couleur C, ainsi que l'acidité (PH), la turbidité(T) et la dureté(CaCo₃), et identifier d'autres éléments tels que l'aluminium. Et les oxydes minéraux comme la silice et l'oxyde de calcium (CaO) en mg/l par la méthode de dosage chimique (Admin, 2022), prenons en compte la préservation des caractéristiques de l'échantillon et le conserver à une température appropriée avant d'effectuer le test analytique en laboratoire.

IV.2.4 Analyse de sol en utilisant le MEB

Les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués dans une ferme située à proximité de la carrière d'agrégats à Héliopolis, à une profondeur de 50 cm.

Pour caractériser les échantillons de sol en commençant par un broyage, puis en passant cet échantillon à travers un tamis à mailles de 1 mm, comme illustré sur la photo jointe du laboratoire LAVAMINE département des mines université d'Annaba figure 49.



Figure 49- tamis à maille de 1 mm, laboratoire LAVAMINE

Afin d'obtenir un échantillon homogène approprié, Enfin, nous avons préparé une pastille compressée d'une épaisseur de 1 mm pour la placer dans le MEB. L'objectif visé était de traiter l'échantillon avec précision, ce qui nécessitant une couche très fine (figure 50).

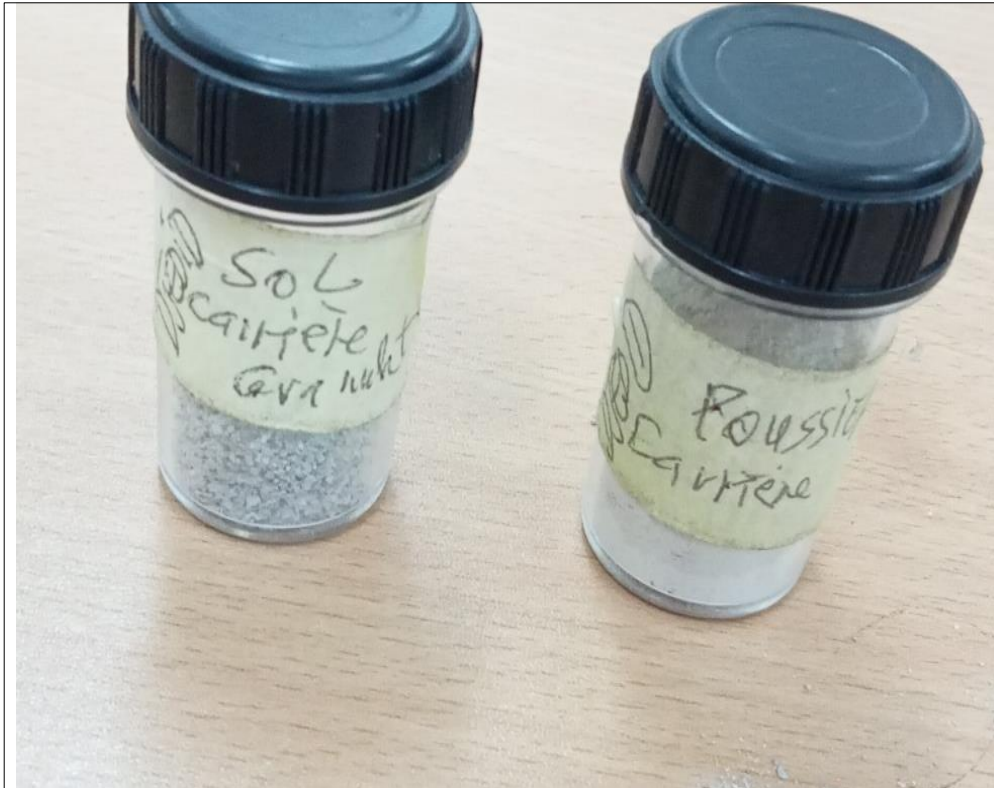


Figure 50 - les deux échantillons représentatifs de sol et de poussière minérale de la carrière d'Héliopolis

Le microscope électronique à balayage (MEB) modèle PHILIPS/FEI QUANTA 250 a été utilisé pour déterminer la taille et la morphologie des particules présentes dans le sol. Cet appareil est équipé d'un spectromètre de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) pour l'analyse chimique.

L'imagerie électronique c'est une fonctionnalité cruciale dans le domaine des sciences de l'environnement car elle présente plusieurs avantages, permettant aux chercheurs d'identifier diverses caractéristiques des échantillons, telles que leur composition chimique, leur forme et leur nature. De plus, les images électroniques permettent de détecter les zones de fractures et de défauts sur les surfaces, ainsi que de déterminer si elles sont contaminées (*MEB-EDX Microscopie Electronique À Balayage Couplée À Une Sonde EDX*, 2023).

En outre, l'échantillon de sol a été envoyé au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Eaux à Annaba en Algérie pour une analyse chimique. De plus, nous avons effectué des analyses par diffraction des rayons X (DRX) et fluorescence des rayons X (FRX) afin d'identifier les éléments importants présents dans le sol, susceptibles d'affecter directement la croissance des plantes et de provoquer une pollution des eaux souterraines ou des modifications de leurs propriétés.

IV.2.4 Analyse de Flore

Pour analyser l'impact des émissions atmosphériques de la carrière sur la diversité botanique aux abords du site d'étude, nous avons collecté six échantillons différents de plantes et d'arbres. Les échantillons comprenaient trois types de plantes : le laurier, la mauve et le chardon sauvage, ainsi que des branches de pin, d'olivier et d'eucalyptus provenant d'une ferme voisine. Après avoir préparé les échantillons, nous avons procédé à leur analyse physico-chimique à Annaba, au laboratoire d'analyse des sols et des eaux. Les échantillons ont été soumis à différents traitements chimiques, un pour chaque type de minéral, afin de déterminer la concentration et la quantité d'espèces chimiques importantes, notamment SiO_2 , CaCO_3 et Al_2O_3 , largement détectés dans les échantillons de poussière de carrière grâce à les analyses physico chimique.

IV.3 Résultats et Discussion

IV.3.4 Evaluation de la qualité de l'air

La pollution de l'air est une source de préoccupation, notamment pour les enfants, ainsi que pour les personnes âgées et les femmes enceintes, qui sont également considérées comme des groupes très sensibles à cette dégradation de la qualité de l'air. Il ne faut pas oublier non plus les personnes souffrant déjà d'infections respiratoires basses (Rawat & Kumar, 2023).

Cette altération de l'air est à l'origine de la propagation de diverses pathologies telles que les maladies cardiaques, les AVC, le cancer du poumon et le diabète, conduisant ainsi à environ 7 millions de décès chaque année en raison de complications associées à l'inhalation d'air de mauvaise qualité (*What Are the WHO Air Quality Guidelines?*, 2021). Selon les rapports de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), 99 % de la population mondiale vit dans un environnement pollué qui ne respecte pas les niveaux maximums recommandés pour le maintien de la santé respiratoire (*Air Pollution*, 2019).

IV.3.1.1 Résultats de détecteurs de qualité de l'air

Les particules fines (PM) ont été reconnues pour leurs effets graves sur la santé, notamment en tant que cause de décès prématuré dans le monde entier, comme le rapportent de nombreuses sources scientifiques et médicales (Liu et al, 2019 ; Rivas et al, 2021 ; Fuller et al, 2022). Donc, la qualité de l'air dépend grandement sur les concentrations de PM 2,5 et de PM 10, et PM1 dans l'air. Dans notre cas d'étude en analysant les données provenant du dispositif de détection de la qualité de l'air présentées dans le tableau12 suivant lors les travaux d'exploitation des granulats au niveau de la carrière d'Héliopolis Guelma.

La plupart des études évaluent généralement uniquement la qualité de l'air à proximité des zones résidentielles, sans explorer les sources et les raisons de cette pollution. En revanche, notre recherche se distingue par son originalité et la qualité de son investigation dans ce domaine.

Parmi les facteurs qui influent de manière significative la dispersion de ces fines particules est la vitesse du vent. De plus, la composition chimique des particules de poussière joue un rôle crucial dans la détermination de leur impact sur les systèmes respiratoires des organismes vivants, en particulier les êtres humains.

Tableau 12 - Résultats obtenus à l'aide du moniteur de qualité de l'air

Stations	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO (mg/m^3)	COVT (mg/m^3)	T C°	HUM %	Etat
S1	520	328	684	0,010	0,070	34,1	32	Danger
S2	516	323	676	0,011	0,079	34,2	31	Danger
S3	333	202	436	0,014	0,094	33	30	Danger
S4	232	145	303	0,014	0,096	33	31	Danger
S5	143	092	190	0.005	0.035	33,4		Danger
S6	122	076	159	0,013	0,090	33	30	Modéré

En se fondant sur les données exposées dans le tableau 12 précédent, nous pouvons constater que la station S1, suivie de la station S2, sont les stations les plus polluées en raison de niveaux très élevés de PM 2,5, PM 10 et PM1. Toutes les stations ont dépassé les valeurs limites fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé pour les PM10 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et les PM2, 5 ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sur une période de 24 heures (*Air Quality, Energy and Health, 2024*). Cela peut être attribué à leur proximité avec les stations de concassage et de broyage, À cela s'ajoute l'influence de vents forts provenant des directions ouest et nord-ouest, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II.

Les concentrations élevées de particules fines dans l'air présentent un risque pour la santé respiratoire, notamment les travailleurs qui passent de longues périodes dans cet environnement pollué voir figure 51.

IV.3.1.1 Interprétation

Le danger de cette substance réside dans sa capacité à pénétrer dans la circulation sanguine en raison de sa petite taille, ce qui lui permet d'interagir avec divers organes du corps. Ces molécules peuvent également pénétrer le système respiratoire humain et se concentrer dans les alvéoles pulmonaires à la suite du processus respiratoire. Cela peut entraîner diverses maladies, notamment des formes de cancer pour lesquelles il n'existe actuellement aucun remède (Sylvestre, 2016 ; Anderson et al, 2011).



Figure 51 - Inhalation de poussières de carrières

Le détecteur de qualité de l'air mesure également la concentration de formaldéhyde (HCHO) et de composés organiques volatils totaux (COVT) ou (TVOC) en anglais. Parmi les composés organiques volatils (COV) considérés comme dangereux pour la santé humaine, certains rapports indiquent même qu'ils sont carcinogènes, représentant ainsi une menace pour la vie et l'environnement (Cui et al, 2024 ; Li et al, 2023) le formaldéhyde (HCHO) est parmi ceux-ci. L'appareil que nous avons utilisé nous a permis de déterminer les concentrations de ces gaz, basées sur la détection chimique, nous permettant ainsi de mesurer leurs concentrations dans l'air. À partir du tableau précédemment présenté, nous constatons que les concentrations de cette substance varient, avec un minimum de $0,005 \text{ mg/m}^3$ enregistré à la Station S5 et une valeur maximale atteignant $0,014 \text{ mg/m}^3$ aux stations S3 et S4. Selon les données de l'article (Omar & Al-Sarrag, 2020), il est préconisé de maintenir les concentrations entre 1,24 et $0,3 \text{ mg/m}^3$ sans les dépasser. Par conséquent, nous pouvons dire que ces recommandations visent avant tout à préserver la santé humaine ainsi que l'environnement.

Le formaldéhyde, par exemple, selon les recommandations canadiennes ne devrait pas dépasser 2 ppm en tant que valeur maximale, car il peut irriter les yeux, le nez et la gorge. Cependant, si cette valeur dépasse largement, par exemple plus de 20 ppm, cela représente un danger important pour la santé respiratoire. Inhaler ces niveaux élevés peut provoquer des effets neurotoxiques et même entraîner un risque de décès car le formaldéhyde est un fort irritant pour les voies respiratoires supérieures (Heck et al, 1990 ; Szende & Tyihák, 2010).

Le niveau de COVT mesuré dans toutes les stations varie entre $0,035 \text{ mg/m}^3$ à la station

S5, ce qui est considéré comme étant dans les limites permises et même recommandées selon OMS 0.05 mg/m³ (Alonso et al, 2022). Quant aux autres stations, les concentrations atteignent 0,1, ce qui est considéré comme inoffensif selon les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé. Ainsi, la station S4 a enregistré la concentration la plus élevée de 0,096 mg/m³, suivie des stations S3, S6 et S2, et S1.

IV.3.1.2 Résultat d'analyse par DRX

Tableau 13- Résultat d'analyse de la poussière par DRX

Eléments	Pourcentages (%)
Calcite(CaCO ₃)	74.03
Quartz(SiO ₂)	3.36
Dolomite	13.05
Ankérite	2.43
Kaolinite	2.38
Illite	2.41
Magnésite	1.27
Feldspath	0.84
Sidérite	0.23
Totale	100

IV.3.1.2.1 Interprétation

Parmi les principaux minéraux identifiés dans le tableau 13, la calcite (CaCO₃) présente les concentrations les plus élevées avec 74,03 %. On remarque ensuite la présence de dolomite à un taux de 13,05 %. Enfin, le quartz est présent à un taux de 3,36 %, ce qui est relativement élevé par rapport aux autres éléments, mais reste inférieur aux concentrations de calcite et de dolomite.

Donc, nous observons des traces de diversité minérale comprenant des minéraux tels que :

- Ankérite, Kaolinite, Illite, Magnésite, Feldspath, Sidérite

Ces minéraux sont présents en quantités moindres par rapport aux principaux minéraux identifiés (calcite, dolomite et quartz), mais leur présence indique une diversité géologique notable dans l'échantillon analysé.

IV.3.1.3 Résultats d'analyse par FRX

L'analyse par fluorescence X (FRX) des échantillons de poussières révèle les proportions suivantes des oxydes présents :

Tableau 14 : les éléments détectés dans les échantillons de poussière à l'aide d'une analyse par FRX.

Eléments	Pourcentage (%)
Oxyde de calcium (CaO)	47,42
Dioxyde de silicium (SiO ₂)	4,70 (47 000 ppm)
Oxyde de magnésium (MgO)	2,80 (28 000 ppm)
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	1,85 (18 500 ppm)
Hématite (Fe ₂ O ₃)	1,05 (10 500 ppm)
Trioxyde de soufre (SO ₃)	0,22 (2 200 ppm)
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,13 (1 300 ppm)
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0,09 (900 ppm)

Ces résultats montrent une prédominance de l'oxyde de calcium dans les échantillons, suivi par le dioxyde de silicium et d'autres oxydes en proportions décroissantes.

IV.3.1.3.1 Interprétation

La forte proportion de CaO suggère que les poussières proviennent probablement d'une source contenant beaucoup de chaux, comme les roches calcaires. Concernant Le SiO₂ est un composant majeur du sable et du quartz. Sa présence indique que les poussières contiennent des particules de silice, courantes dans les environnements de carrière. Le MgO est souvent trouvé dans les roches magmatiques et peut également être un composant des matériaux de construction comme les granulats. Al₂O₃ est un composant clé de l'argile et des minéraux alumineux. Sa présence peut suggérer la contamination par des poussières de bauxite ou des matériaux céramiques. L'hématite est un oxyde de fer couramment trouvé dans les sols et les roches. Sa présence indique une source de fer, qui peut provenir de l'érosion des sols ou de la rouille des structures métalliques. Le SO₃ est souvent associé aux activités industrielles et des matériaux contenant du soufre. Cela pourrait indiquer une pollution atmosphérique : Le K₂O est présent dans de nombreux minéraux et sols. Sa faible proportion suggère une contribution mineure de ces sources. Na₂O est typiquement trouvé dans le sel et les minéraux sodiques. Sa présence indique une faible contamination par des sources contenant du sodium.

En bref, les poussières présentent une prédominance de matériaux calcaires et siliceux, typiques des environnements de carrière. Il est également possible qu'elles contiennent des apports mineurs provenant de sources industrielles et naturelles.

IV.3.1.4 Résultats de l'analyse poussière par MEB

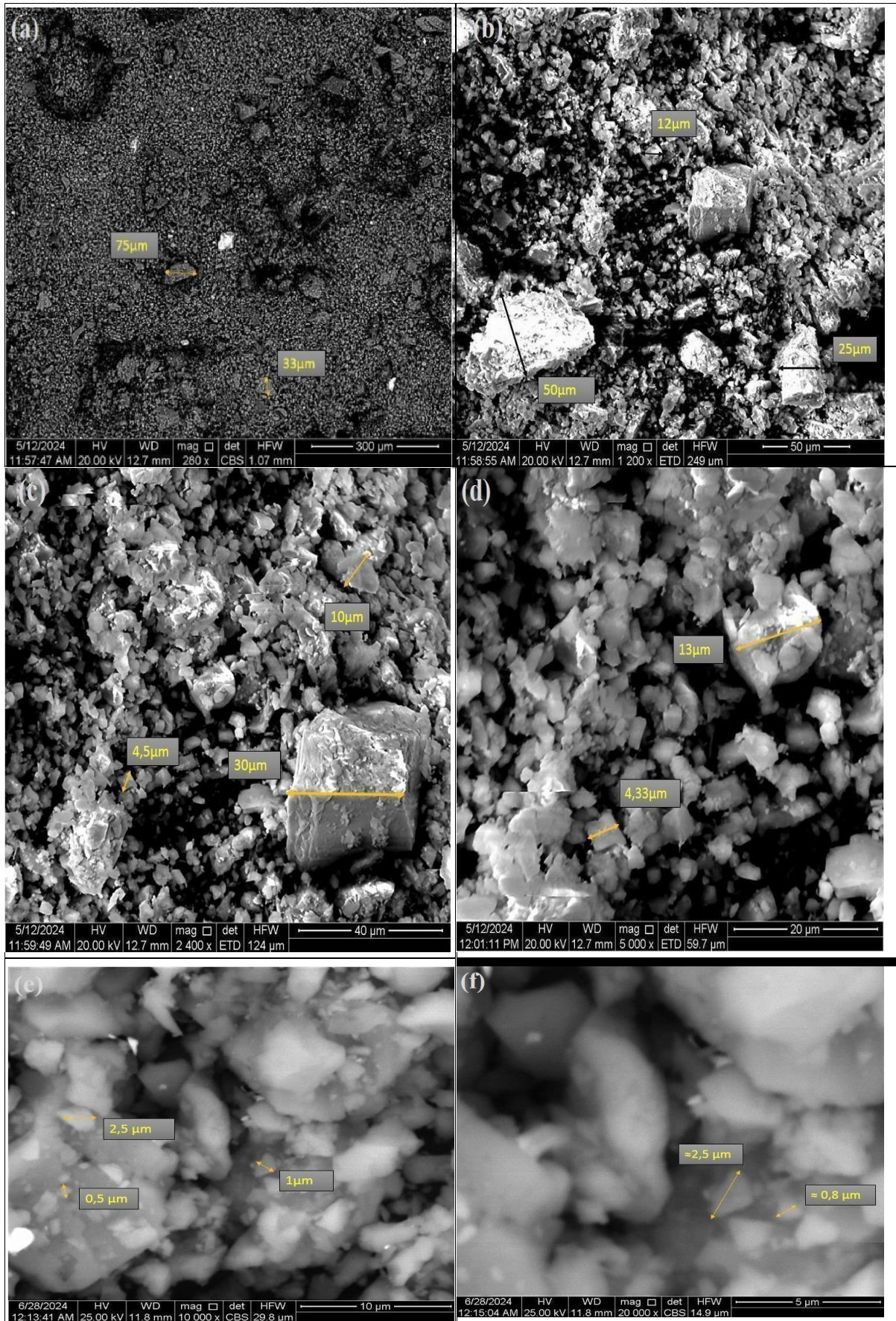


Figure 52 - Observation de la poussière à l'aide de MEB à différents grossissements.

À l'aide d'un microscope électronique à balayage, nous avons observé l'échantillon de poussière à différents grossissements allant de 300 μm , 50, 40, 20, 10 jusqu'à 5 μm . Nous avons observé des particules blanches et des cristaux, figure 52. Ces particules sont disponibles en différentes tailles, notamment 75 μm , 50 μm , 33 μm , 30 μm , 25 μm , 13 μm , 12 μm , 10 μm , 4 μm , et 2.5 μm et des tailles encore plus petites telles que 1 μm , 0.8 μm , 0.5 μm et moins. Ils apparaissent généralement sous forme de blocs aux arêtes vives, suggérant des fractures à leur surface. Cela indique qu'ils proviennent de différents processus de préparations de gravier, telles que le dynamitage des roches, le concassage, le broyage, le criblage et le transport de granulats.

Donc, selon les images, cela représente la poussière de carrière. Nous pouvons constater qu'elle est caractérisée par une forme cristalline, indiquant la présence de minéraux sous forme cubique.

Après avoir analysé des images haute résolution de MEB (figure 52), il est clair que la poussière générée par les activités minières est constituée de particules très fines, comme l'indiquait précédemment le détecteur de la qualité de l'air (PM10, PM2.5 et PM1). De plus, ces particules de poussière présentent des bords tranchants dus aux fractures cristallines. Ces caractéristiques soulèvent des préoccupations quant à la santé respiratoire des individus, en particulier des travailleurs et des résidents voisins qui inhalent régulièrement ces fines particules blanches.

IV.3.1.6 Données quantitatives intelligentes de l'échantillon de poussière de la zone entière 1

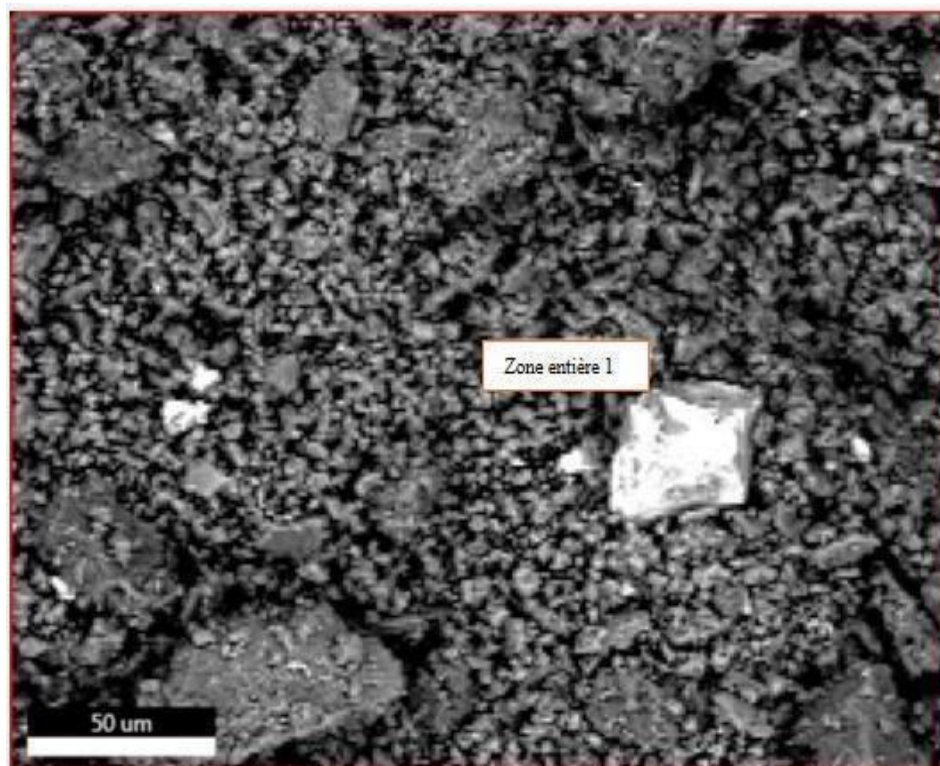


Figure 53 -Observation de «a zone entière 1 »par MEB avec un grossissement de 50 μm

Dans notre cas d'étude, parmi les paramètres de ce type d'analyse (EDX), nous avons appliqué une tension de 20 kV, un grossissement de 1202 fois, avec un angle d'émergence de 12,2°, et un temps d'acquisition de 29 secondes, une constante de temps de 3,84 μ s et une résolution de 125,2 eV pour observer la zone entière 1 dans l'échantillon de poussière dans figure 53.

IV.3.1.6.1 Analyse des résultats

Basé sur les résultats présentés dans le tableau 14, nous pouvons observer les résultats quantitatifs (eZAF) relatifs à l'échantillon de poussière (zone entière). Il est à noter la présence d'un pourcentage élevé d'oxygène (O), cela indique la présence d'oxydation dans l'échantillon, avec un pourcentage massique de 61,25 %, un pourcentage atomique de 67,58 % et une intensité totale de 242,36 avec une erreur de 10.60 %.

Tableau 15 : Compositions de l'échantillon poussière « Zone Entière 1 » par EDX

Elément	Pourcentage de masse %	Pourcentage atomique %	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	13.68	20.10	37.25	15.16	0.0504	1.0702	0.3441	1.0000
O	61.25	67.58	242.36	10.60	0.1004	1.0248	0.1600	1.0000
Na	0.01	0.00	0.03	99.99	0.0000	0.9313	0.1581	1.0025
Mg	3.89	2.83	48.48	11.85	0.0092	0.9473	0.2494	1.0035
Al	1.35	0.88	23.96	14.34	0.0042	0.9123	0.3426	1.0058
Si	1.33	0.84	34.50	11.51	0.0059	0.9324	0.4691	1.0090
S	0.77	0.14	13.05	25.16	0.0065	0.7132	1.1704	1.0065
K	0.17	0.08	6.17	33.49	0.0015	0.8647	0.9599	1.0886
Ca	16.40	7.22	504.73	2.19	0.1455	0.8805	0.9983	1.0098
Fe	0.34	0.11	6.13	37.02	0.0028	0.7851	0.9999	1.0659
Cu	0.16	0.05	2.07	68.21	0.0014	0.7515	1.0179	1.1266
Zn	0.65	0.18	6.99	29.64	0.0057	0.7488	1.0205	1.1426

Selon le spectre dans la figure 54 et le tableau 15, l'élément calcite (Ca) est prédominant dans la composition de la poussière, représentant 16,4 % en masse et 7,22 % en pourcentage atomique, une intensité totale de 504.73 avec erreur de 2.19%. La présence simultanée d'oxygène et de calcite peut suggérer une proportion significative d'oxyde de calcium (CaO), ainsi que d'autres oxydes minéraux, comme le démontre l'analyse par diffraction des rayons X (XRD) de la poussière de carrière précédemment.

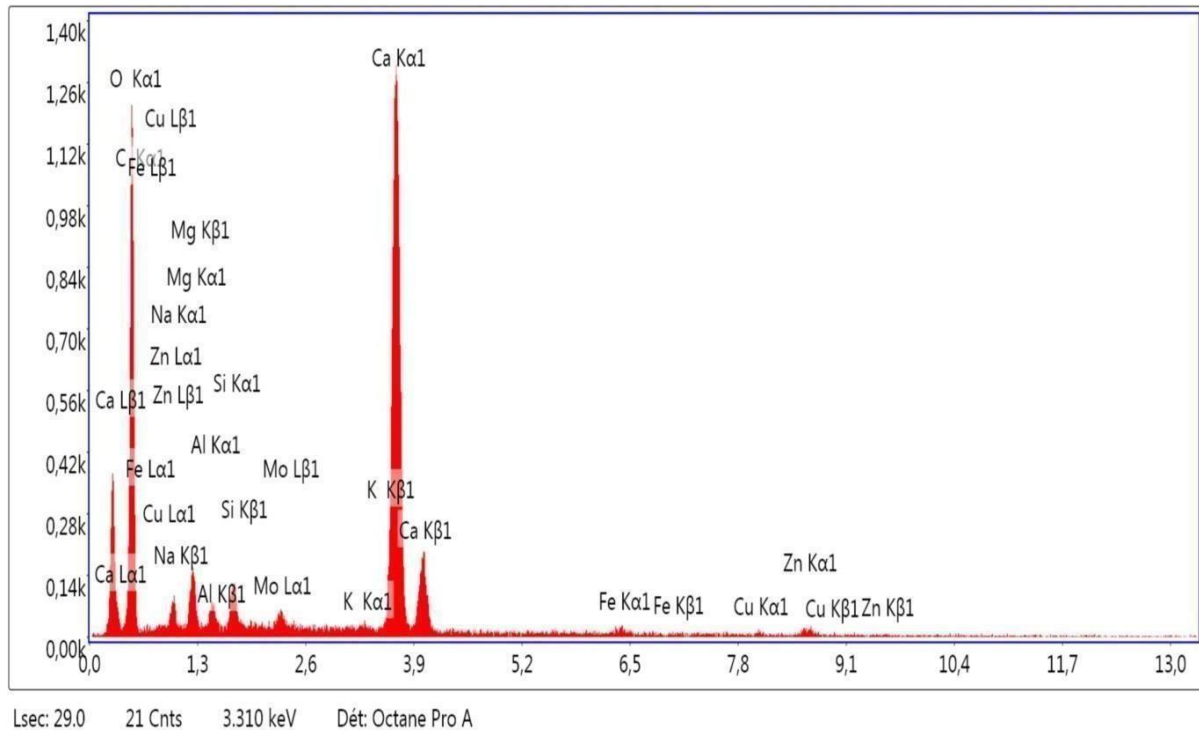


Figure 54 - eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon poussière « Zone entière 1 »

Nous avons également détecté du carbone (C) à des niveaux légèrement inférieurs, avec 13,68 % pourcentage de masse, et un pourcentage atomique de 20,10 % et une intensité totale 37,25 et un taux d'erreur de 15,16 %. La présence de carbone est probablement une indication de composés organiques ou de carbone élémentaire dans l'échantillon. Il ne faut pas oublier que les poussières minérales proviennent du sol, autrefois saturé de matières organiques. Par la suite, nous avons observé la présence de magnésium (Mg) en quantités minimales, ne dépassant pas 3,89 % de masse et 2,83 % en pourcentage atomique et une intensité totale de 48,48 avec une erreur de 11,85 % donc, sa présence est probablement due à la dolomite, car le magnésium fait partie de sa composition chimique $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ (Mehmood et al, 2018).

En plus de nombreux autres éléments présents en petites quantités, nous les mentionnerons Al, Si, S, Zn, Fe, K, Cu, et Na.

IV.3.1.7 eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon poussière (zone pointée 1)

Selon les mêmes paramètres, nous avons effectué une autre analyse pour la zone pointée 1, comme indiqué sur la photo de microscopie électronique à balayage (MEB), avec un temps d'acquisition de 17,4 secondes figure 55.

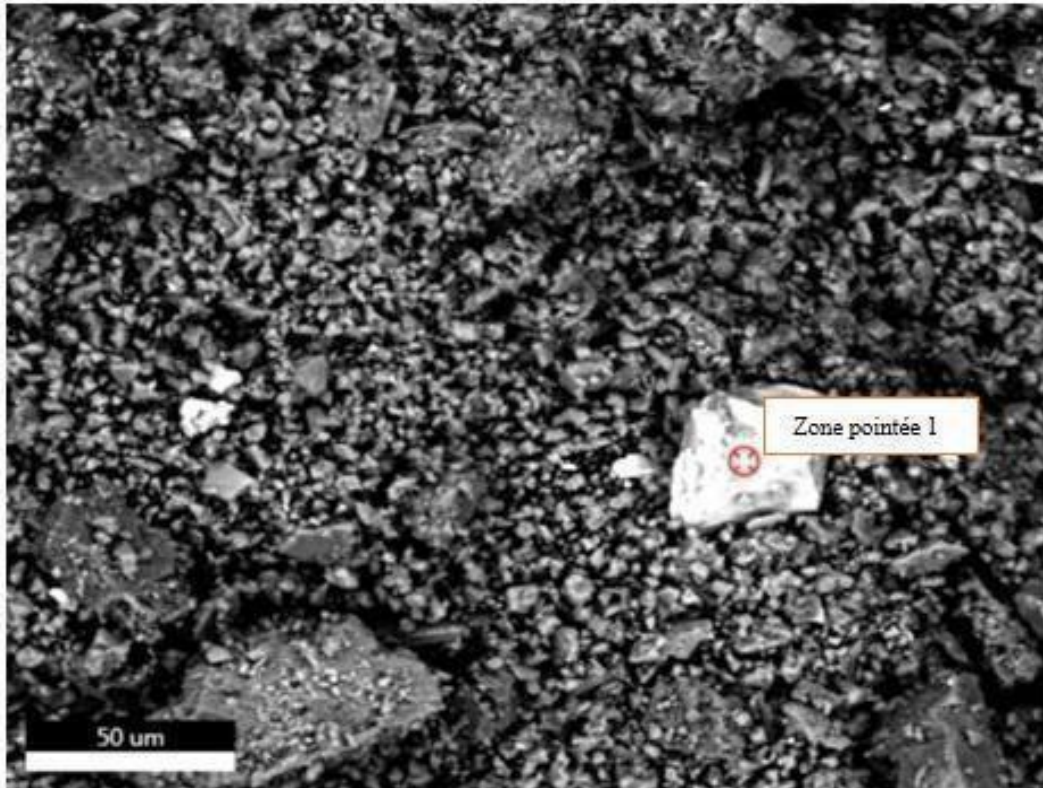


Figure 55- Observation de ‘la zone pointée 1’ par MEB avec un grossissement de 50 μm

Selon les résultats indiqués dans les spectres EDS de la zone nommée «Pointée 1 », il existe des présences confirmées de Zn, Na, Mg, Al, Si, S, Ca et K, avec des proportions variant selon les éléments (voir la figure 56).

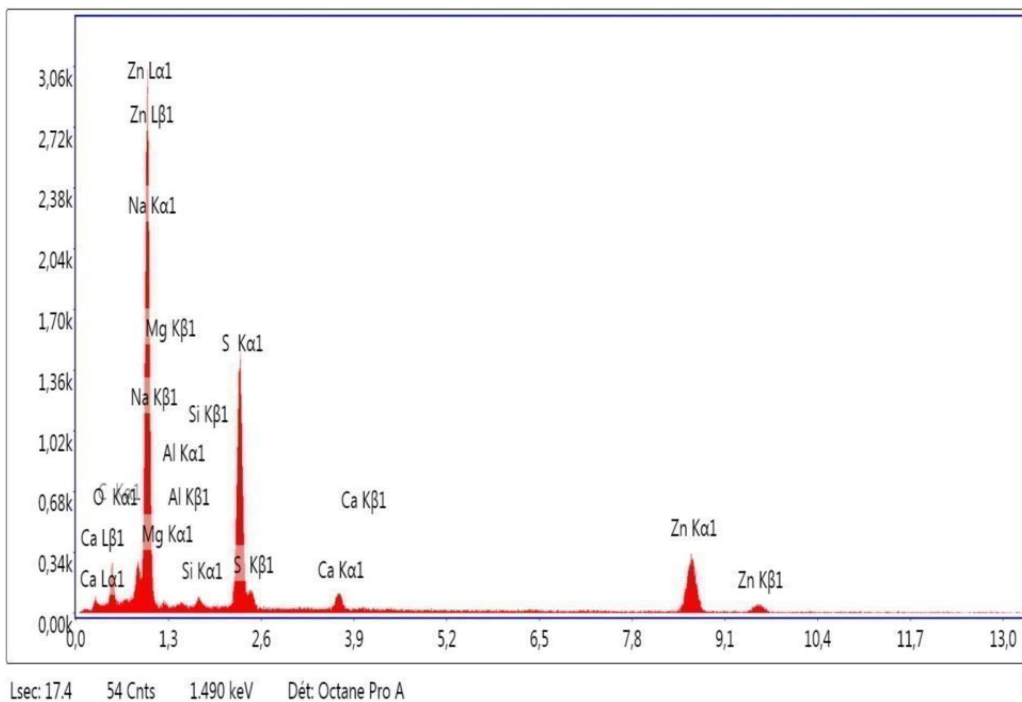


Figure 56- Spectres EDS de la zone nommée « Pointée 1 »

Tableau 16 - Compositions de l'échantillon poussière « Zone pointée 1 » par EDX

Elément	Pourcentage de masse %	Pourcentage Atomique %	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	14.35	26.92	18.29	26.19	0.0196	1.1337	0.1208	1.0000
O	23.37	32.92	119.30	12.31	0.0393	1.0879	0.1544	1.0000
Na	10.32	10.11	99.84	14.34	0.0200	0.9909	0.1956	1.0020
Mg	3.56	3.30	41.33	15.23	0.0063	1.0085	0.1735	1.0033
Al	2.38	1.99	40.32	14.92	0.0057	0.9718		1.0057
Si	1.72	1.38	42.65	13.47	0.0058	0.9938	0.3347	1.0094
S	21.43	15.06	743.23	6.36	0.1188	0.9742	0.5664	1.0048
Ca	1.95	1.10	62.93	14.67	0.0144	0.9407	0.7673	1.0228
Zn		7.21	273.24	4.37	0.1770	0.8035	1.0154	1.0374

IV.3.1.7.1 Interprétation des résultats

Les résultats de l'analyse présentés dans le tableau 16, concernant la « zone pointée 1 » illustrée sur la figure 56, indiquent qu'elle contient une quantité significative d'oxygène, atteignant 23,37 % en masse et 32,92 % en pourcentage atomique, avec une intensité totale de 119,30 et une erreur de 12,31 %. De plus, nous remarquons la présence de soufre (S) avec un pourcentage massique de 21,43 % et un pourcentage atomique de 15,06 %, avec une intensité totale de 743,23 et une erreur de 6,36 %. Le zinc (Zn) présente un pourcentage massique de 20,91 %, un pourcentage atomique de 7,21 % et une intensité totale de 273,24, avec une erreur de 4,37 %.

L'oxygène(O) représente une grande partie de la composition de l'échantillon, Cela indique une forte présence d'oxydes dans l'échantillon. L'oxygène est l'élément le plus abondant dans cette partie de l'échantillon. Son pourcentage élevé en masse et en pourcentage atomique suggère la présence de composés oxydés (par exemple, Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3), des silicates, ou d'autres minéraux oxydés.

Le soufre (S) est également présent en quantité significative, indiquant une concentration élevée par rapport aux autres minéraux (comme le Mg, Al, Si, et Na). Cette concentration pourrait être liée à la présence de minéraux sulfurés ou à des polluants issus de la combustion de combustibles fossiles, tels que ceux émis par les engins de la carrière et les camions de transport de gravier. En effet, les camions lourds utilisés dans les carrières, fonctionnent principalement à l'essence ou au diesel, qui sont des dérivés du pétrole. La marge d'erreur pour la mesure du soufre est de 6,36 %, ce qui reflète une précision relativement élevée pour cette mesure spécifique.

La présence significative de soufre indique probablement la présence de sulfates

(Comme le sulfate de calcium, CaSO_4) ou de sulfures (comme la pyrite, FeS_2). Le soufre peut provenir de sources industrielles, telles que les activités minières, ou des processus chimiques. L'erreur de 6,36 % est relativement faible, ce qui renforce la fiabilité de cette mesure.

La présence de soufre dans la poussière est un indicateur dangereux, car cette substance elle peut provoquer des infections respiratoires. L'inhalation prolongée de poussière de soufre peut être fatale. Des études ont révélé que l'inhalation de cet élément peut provoquer une inflammation pulmonaire grave et persistante, difficile à traiter (Wigenstam et al, 2016 ; Geravandi et al, 2015).

La concentration de zinc (Zn) est de 20,91 % en masse et de 7,21 % en pourcentage atomique, avec une intensité totale de 273,24 et une marge d'erreur de 4,37 %. Le zinc est présent en quantités significatives, ce qui peut indiquer des sources industriels, ou des résidus miniers. Le zinc pourrait être sous forme d'oxyde de zinc (ZnO) ou de zinc métallique. La faible erreur de 4,37 % indique une mesure fiable et précise.

L'échantillon de poussière analysé montre une composition riche en oxygène et en soufre, et zinc, ce qui peut refléter la géologie locale de la carrière ou des influences anthropiques. Compositions Riches en Oxygène, la forte teneur en oxygène suggère une prévalence de composés oxydés. Ceci est typique des environnements naturels riches en minéraux oxydés ou des environnements industriels où l'oxydation est courante.

La présence importante de soufre pourrait indiquer une influence industrielle ou minière, où des composés sulfurés. Cela pourrait également suggérer des zones avec des processus naturels de sulfatation.

La présence de niveaux élevés de zinc dans la poussière que nous avons analysée peut indiquer une activité industrielle dans la région. À titre d'information, il y a une usine à proximité de la carrière qui fabrique du béton, des industries telles que la fabrication de peintures et de colorants, ainsi que d'autres opérations de traitement du zinc, peuvent rejeter du zinc dans l'environnement. En plus des processus d'extraction des matériaux tels que les granulats peuvent également libérer du zinc dans l'environnement. En résumé, la présence de zinc en quantités importantes peut être le résultat d'activités industrielles ou minières, ou de la décomposition de matériaux contenant du zinc. Cela indique que l'environnement étudié est affecté par ces sources de zinc.

Dans le même contexte, des expériences ont été menées sur des lapins auxquels a été exposée de la poussière de zinc pendant une certaine période afin d'étudier l'impact de cette exposition, en particulier chez les travailleurs de carrières. Une paralysie des membres inférieurs a été observée chez certains d'entre eux. De plus, les analyses ont révélé la présence de zinc dans des organes vitaux tels que le foie, les reins et les poumons, ce qui témoigne de la gravité de l'exposition à la poussière de zinc (Geravandi et al, 2015).

IV.3.1.8 Contexte Industriel et Naturel

Les résultats montrent une interaction possible entre des sources naturelles (minéraux oxydés et sulfurés) et industrielles (résidus métallurgiques ou chimiques). L'analyse des erreurs de mesure et des intensités totales donne une bonne indication de la fiabilité des données, permettant d'établir une interprétation précise de la composition de l'échantillon.

En conclusion, cet échantillon de poussière révèle une composition complexe où l'oxygène, le soufre et le zinc dominant, suggérant des influences à la fois naturelles et

industrielles. Les résultats sont globalement fiables, avec des erreurs acceptables pour chaque élément, permettant de confirmer les tendances observées.

IV.3.4 Caractérisation physico-chimique de l'eau

IV.3.2.1 L'eau de sources naturelles

Nous avons collecté des échantillons d'eau brute dans la région d'Héliopolis directement à partir de sources naturelles, sans traitement préalable. L'objectif est d'analyser les caractéristiques de l'eau afin de déterminer l'étendue de sa contamination due aux activités d'extraction dans la zone. Les résultats de notre analyse des échantillons d'eau sont présentés dans le tableau 17.

Tableau 17 - récapitulatif des analyses des échantillons d'eau de deux sources (A+B)

Paramètres	Unités	Échantillon A	Échantillon B	Normes acceptables
Concentrations en ions hydrogène	pH	7,03	7,01	$\geq 6,5$ et ≤ 9
T		29,7	21,1	
Conductivité à 25 °C	$\mu\text{S}/\text{cm}$	470	1421	2800
Turbidité	NTU	0.479	0.103	≤ 5
Couleur	mg/l Echelle Pt	20	00	15
Alcalinité	mg/l (TAC)	87.15	250	65
Dureté	mg/l (TH)	320	400	500
HCO_3	mg/l	106.32	305	/
MES	mg/l	1.38	1.02	25
Résidus secs	mg/l	61	128	1000-2000

Note *: Date de prélèvement : **28/12/2021**.

IV.3.2.1.1 pH

Selon les données présentées dans le tableau 17 ci-dessus, nous pouvons constater que les deux sources d'eau sont caractérisées par des valeurs de pH de 7,03 et 7,01. Ces valeurs indiquent que l'eau est neutre. Elles sont très proches de 7, ce qui suggère que l'eau n'est ni acide ni basique, mais maintient un niveau de pH équilibré.

IV.3.2.1.2 Température

Selon la température maximale standard de 25 degrés Celsius recommandée par les normes algériennes, nous observons que l'échantillon 'A' a atteint 29,7 degrés Celsius, dépassant ainsi la température maximale recommandée. Cette élévation de température peut

avoir un impact sur la qualité de l'eau, entraînant potentiellement une augmentation des réactions chimiques et de l'activité biologique, ainsi qu'une diminution des niveaux d'oxygène, puisque la solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue avec l'augmentation de la température. (Shaw et al, 2002).

Concernant l'échantillon B : avec une température de 21,1°C, il est inférieur à la température maximale recommandée et se situe donc dans la plage acceptable.

IV.3.2.1.3 Conductivité électrique

La conductivité électrique des échantillons d'eau, il a été constaté que l'échantillon A présentait une conductivité de 470 microsiemens/cm, ce qui est conforme aux limites autorisées par les autorités algériennes, fixées à 2 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En revanche, l'échantillon B avait une conductivité de 1 421 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se rapprochant de la valeur limite établie par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), qui recommande que la conductivité de l'eau potable ne dépasse pas 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Des valeurs au-dessus de ce seuil indiquent une teneur élevée en minéraux dans l'eau (*Normes De L'OMS Sur L'eau Potable, 2006*).

IV.3.2.1.4 Turbidité

La turbidité de l'eau potable, selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la loi algérienne, ne doit pas dépasser 5 NTU (Delvaux J, 2018). Il est même recommandé que l'eau potable soit inférieure à 1 NTU pour garantir la qualité et la pureté de l'eau.

En ce qui concerne les échantillons que nous avons analysés, nous avons observé que l'échantillon A présentait une valeur de 0,479 NTU, tandis que l'échantillon B affichait une valeur de 0,103 NTU. Ainsi, ces valeurs se trouvent dans les limites acceptables.

IV.3.2.1.5 La couleur

En ce qui concerne la couleur, nous notons que :

L'échantillon d'eau A a atteint 20 mg/l, une valeur supérieure à celle recommandée selon les normes algériennes (N.A) 15 mg/l platine. Quant à l'échantillon B, la valeur est égale à 0 mg/l, et est donc relativement clair.

IV.3.2.1.6 Alcalinité

Les sources les plus cruciales responsables de l'alcalinité de l'eau sont : L'eau de pluie accumule des minéraux au fur et à mesure qu'elle s'écoule à travers le sol et les roches par le biais du ruissellement de surface, ce qui impacte l'alcalinité des corps d'eaux tels que les lacs et les rivières. Les minéraux qu'elle contient, tels que le bicarbonate de sodium (NaHCO_3) et le carbonate de calcium (CaCO_3), se dissolvent dans l'eau, augmentant ainsi de manière significative l'alcalinité de celle-ci. Par conséquent, leur origine peut être retracée à ces composés issus de la décomposition des minéraux présents dans le sol, les roches ou même dans l'atmosphère. De plus, elle peut provenir des matières organiques en raison de la décomposition microbienne des matériaux organiques, ou encore de la décomposition du dioxyde de carbone (Schroeder, 2003).

Les recommandations concernant les valeurs d'alcalinité de l'eau se situent généralement entre 20 et 200 mg. La norme algérienne relative au décret exécutif n°14-96 est égale à 65 mg/l (CaCO_3). Ce critère est très important pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Par exemple, un faible niveau d'alcalinité engendre une acidité élevée, tandis que lorsqu'une valeur d'alcalinité augmente, cela peut provoquer des problèmes de qualité et de goût, tout en contribuant de manière significative à la formation de dépôts.

IV.3.2.1.7 Dureté

En ce qui concerne la dureté de l'eau, les analyses ont donné des résultats acceptables pour les deux échantillons A et B, avec des valeurs de 320 et 400 mg/l en CaCO_3 respectivement, se conformant à la limite maximale recommandée par les autorités officielles en Algérie, soit 500 mg/l en CaCO_3 , comme indiqué dans le Journal Officiel du 03/09/2014.

En revanche, les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ont confirmé que l'eau est considérée comme pure si elle contient une concentration de carbonate de calcium d'environ 75 mg/l. Cependant, si cette concentration dépasse 300 mg/l, l'eau est considérée comme très dure, ce qui est le cas de nos deux échantillons (Santé Canada, 2015).

Et selon les recommandations de l'OMS, il est essentiel de s'assurer que la dureté de l'eau reste inférieure à 200 parties par million pour garantir une santé et une sécurité optimales (Normes De L'OMS Sur L'eau Potable, 2006).

IV.3.2.1.8 HCO_3^-

La teneur en carbonate et bicarbonate dans l'eau est influencée par des facteurs environnementaux ainsi que par les fluctuations de la température de l'eau et de la pression atmosphérique. Cela joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre acido-basique. Typiquement, l'eau naturelle contient du bicarbonate, qui provient de la décomposition des roches carbonatées telles que le calcaire (Delvaux J, 2018).

Il est nécessaire que l'eau potable contienne une concentration acceptable de bicarbonates pour maintenir une acidité modérée dans le corps (Doctissimo, 2024). En ce qui concerne les échantillons d'eau que nous avons étudiés, nous notons que l'échantillon B contient un pourcentage de bicarbonates plus élevé que l'échantillon A. Étant donné que les concentrations de bicarbonates dans l'eau ne sont soumises à aucune norme légale, elles ne présentent aucun effet nocif sur la santé humaine.

IV.3.2.1.9 MES

Les matières en suspension (MES) dans les échantillons d'eau se situent dans les valeurs recommandées par La norme Algérienne relative au décret exécutif N 11-219 dans le journal officiel, ne dépassant pas 25 mg/l.

IV.3.2.1.10 Résidus secs

Le taux de résidus secs, également connu sous le nom de minéralisation totale (TDS), selon la norme algérienne, devrait idéalement être de 500 mg/l, avec une valeur maximale autorisée de 2000 mg/l (Labadi&Hammache, 2016). L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) recommande que l'eau ayant une teneur en solides dissous totaux (TDS) inférieure à 600 mg/l soit considérée comme potable, tant qu'elle ne dépasse pas 1000 mg/l (Salinity and Drinking Water | SA Health, 2022).

Après avoir examiné les résultats, il est évident que le pourcentage est assez faible par rapport à ces normes, puisqu'il n'a pas dépassé 61 mg/l pour l'échantillon A et 128 mg/l pour l'échantillon B. Cela est probablement dû à l'extraction minérale excessive dans la région, qui épuise les minéraux essentiels de l'eau circulant à travers ces sites, affectant ainsi leur qualité.

IV.3.2.2 Eau de surface

En plus de la collecte d'échantillons d'eau provenant de sources naturelles, nous avons également prélevé un échantillon d'eau de surface à proximité de la carrière afin d'évaluer l'impact des activités de celle-ci. Les résultats ont révélé une concentration élevée de 0,50 mg/l d'aluminium dans l'eau, ce qui dépasse largement les limites autorisées par l'Organisation mondiale de la santé et la norme algérienne de 0,2 mg/l. (*Normes De L'OMS Sur L'eau Potable*, 2016). Ces niveaux élevés d'aluminium présentent des risques pour la santé et peuvent entraîner des maladies neurologiques en cas de consommation, telles que la maladie d'Alzheimer. (*Aluminium Et Effets Sur La Santé • Cancer Environnement*, 2022). Il y a des rapports médicaux qui ont révélé la présence d'aluminium dans les noyaux des cellules nerveuses chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer. De plus, il a été observé chez certains patients un retard des fonctions cognitives, ce qui suscite des inquiétudes sur l'exposition à cet élément (Wisniewski & Wen, 2007).

De plus, l'arrosage des plantes et des arbres avec de l'eau contenant des concentrations élevées d'aluminium peut provoquer un empoisonnement des racines, la mort des plantes, ainsi qu'une dégradation des sols (Cruz F. J. R, 2023).

La conductivité (CE) à 20 °C a également été rapportée comme étant de 749 µS/cm, conformément à la méthode standard NF T 90-031. La valeur fixée par les autorités algériennes ne doit pas dépasser 2800 µS/cm. De plus, elle n'excéder la norme américaine pour l'eau potable, qui est établie entre 30 et 1500 µS/cm (Pomelo, 2022), avec une salinité de 334 mg/l à 20 °C. Puisque sa valeur n'est pas spécifiée par la législation algérienne, nous nous référons, par exemple, aux recommandations australiennes qui suggèrent de ne pas dépasser 600 mg/l. Par conséquent, nous pouvons dire que cela est acceptable (Abbas et al., 2019). Le pH de l'échantillon d'eau était dans la plage des limites prescrites par l'OMS, soit 7,74.

La présence d'oxyde de calcium (CaO) a également été détectée dans cet échantillon

d'eau près de la carrière, avec une concentration atteignant 170 mg/l selon la norme Volumétrique NFT 90 005. Ce pourcentage significatif est très probablement dû aux activités d'extraction des granulats, lesquels contiennent une grande quantité de calcite (CaCO_3).

En ce qui concerne la présence de silice (SiO_2) dans l'échantillon d'eau, l'analyse a révélé une concentration de 0,30 mg/l. Il convient de noter que la plupart des roches constituant la croûte terrestre contiennent du silicium, qui est le deuxième minéral le plus abondant, ce qui explique également sa présence dans les eaux souterraines aussi (Brewster, 2024).

Dans notre cas, sa concentration relativement faible dans l'eau est due à la capacité faible et lente de la silice à se dissoudre dans le milieu aqueux. D'autres études suggèrent qu'une faible quantité d'aluminium peut influencer de manière significative la présence de silice dans l'eau. C'était le cas dans notre étude, où la concentration en aluminium était plus élevée (Okamoto et al, 1957).

Quant à sa source externe, elle est liée aux effets des opérations d'extraction des granulats. La poussière émise par la carrière, résultant des opérations de concassage, de broyage, de tamisage et même de transport des pierres, contribue considérablement au transfert des particules vers l'eau et les zones environnantes.

IV.3.2.3 Sol

Pour révéler les effets des activités d'exploitation et de carrière dans la région d'Héliopolis sur le sol, nous avons préparé un échantillon de sol provenant d'une petite ferme voisine afin d'étudier certaines de ses caractéristiques et la possibilité de changement de sa composition. Nous les avons envoyés au labo.

IV.3.2.3.1 pH

Compte tenu de l'importance d'avoir un pH du sol correct et idéal pour assurer la croissance normale des plantes et des divers produits agricoles (Jackson & Meetei, 2018), l'acidité et l'alcalinité du sol ont été mesurées à une température de 25 degrés Celsius selon (AFNOR : X 31—103), où la valeur pH a atteint = 9,51.

Le sol est caractérisé par un pH élevé de plus de 9. Certaines études suggèrent que cela est dû à la présence de sodium et de calcium en concentrations relativement élevées et ce n'est pas nouveau car dans notre cas, il est dû à des oxydes de calcium et de carbonate élevés dans les poussières minérales identifiées par spectroscopie XRD et FRX. Une alcalinité élevée du sol peut causer divers problèmes, tels que des problèmes liés à la disponibilité des éléments nutritifs (Queensland, 2013), comme le phosphore, Un sol dont le pH est supérieur à 8 est trop alcalin pour que la plupart des plantes puissent s'épanouir. Une humidité ou une sécheresse excessive du sol peut exacerber de façon significative les problèmes causés par l'alcalinité élevée du sol. ("CMG Garden Notes #222," 2023).

IV.3.2.3.2 Conductivité

La détermination de la valeur de la conductivité électrique du sol permet d'évaluer sa disponibilité en éléments nutritifs, en matières organiques et en cations nécessaires tels que le Ca^{2+} et le Na^+ . Toutefois, il est important que ces valeurs restent dans les limites recommandées

afin d'éviter que le pourcentage de salinité ne devienne trop élevé, ce qui pourrait entraver le développement des racines ou provoquer ce que l'on appelle une « brûlure » des racines. Par conséquent, la mesure de la conductivité électrique (CE) du sol est essentielle pour détecter sa capacité à conduire le courant électrique.

Selon l'article mentionné (Save, 2019), indique que la conductivité électrique du sol devrait idéalement se situer dans une fourchette de 110 mS/m à 570 mS/m. À une température de 20 °C, la conductivité électrique mesurée sur le terrain est de 457 µS/cm.

En effectuant la conversion de cette valeur en unités de mS/m, on obtient 45,7 mS/m. Cette valeur est bien en-deçà de la plage attendue de conductivité (110 mS/m à 570 mS/m). Par conséquent, on peut la caractériser comme étant faible à modérée.

IV.3.2.3.3 Salinité

L'échantillon de sol avait une valeur de salinité de 217 mg/l, donc il n'est pas considéré comme salé (Mathieu & Pielain, 2003).

IV.3.2.3.4 L'oxyde de calcium (CaO)

L'analyse des échantillons de sol révèle une très forte présence d'oxyde de calcium, jusqu'à 9350 mg/kg, ce qui explique le pH élevé antérieurement supérieur à 9. Ce pourcentage élevé est probablement dû aux émissions provenant de la carrière, qui portent diverses particules d'oxyde minérales, l'oxyde de calcium en grandes quantités. Ces émissions sont transportées par l'air et le vent, d'autant plus que l'échantillon que nous avons prélevé est situé dans la direction du vent dominant.

IV.3.2.3.5 Aluminium(Al)

D'après des études toxicologiques environnementales, la présence d'aluminium dans l'environnement peut entraîner de nombreux problèmes de santé, que ce soit pour les humains, les animaux ou même les plantes et de nombreuses perturbations dans la fonction des organismes humains et animaux il est préférable de le bannir des aliments et des médicaments, et non de le prendre en tant qu'additifs alimentaires. La menace qu'il représente pour la santé humaine est énorme, car l'aluminium cause des dommages importants aux nerfs, aux os et à la structure du sang (*Ecotoxicology of Aluminium*, 2002).

L'analyse des échantillons du sol a révélé une concentration d'aluminium de 82,02 mg/kg, déterminée à l'aide de la méthode APHA 3500 AL D. Ce niveau d'aluminium est remarquable parce qu'il peut affecter la santé du sol, la disponibilité des nutriments et la croissance des plantes. La surveillance des concentrations d'aluminium dans les sols est essentielle pour comprendre les impacts potentiels sur l'écologie du sol et les pratiques agricoles.

Des recherches ont mis en évidence un lien entre l'acidité du sol et l'exposition des cultures à l'empoisonnement à l'aluminium, en particulier lorsque le pH du sol est inférieur à 5 et que la concentration en aluminium dépasse 3 parties par million (ppm), en particulier chez les semis et les petites racines ((Bouthier & Castillon, 2015 ; Rout et al, 2001). Dans notre cas,

le pH de l'échantillon de sol dépasse 9, ce qui n'est pas le cas. Cependant, cela ne signifie pas, bien entendu, qu'il n'y a pas de risque d'empoisonnement causé par sa très forte concentration. L'Autorité européenne de sécurité des aliments a recommandé de ne pas dépasser la limite d'exposition maximale pour toutes les formes d'aluminium dans les aliments, qui était de 2 mg par kilogramme de poids corporel humain en 2011 (*Exposition À L'aluminium Par L'alimentation*, 2022).

IV.3.2.3.6 La silice (SiO₂)

Les plantes qui poussent dans le sol absorbent la silice de la solution du sol. La teneur en silice des plantes est directement influencée par des facteurs tels que la teneur en oxyde de fer, le pH du sol et la concentration d'aluminium. Lorsque les animaux et les humains consomment des cultures à forte teneur en silice, la silice est généralement excrétée dans les sécrétions urinaires. Cependant, il peut également s'accumuler dans les organes vitaux comme les reins, entraînant la formation de calculs douloureux et causant des problèmes de santé graves pour les humains et les animaux de pâturage (Jones & Handreck, 1967).

IV.3.2.3.7 Interprétations

L'échantillon analysé contient une concentration de 175,18 mg/kg de silice selon la norme DIN EN ISO 16264-H57. Son origine est probablement due à la poussière résultant de divers procédés d'extraction contenant des particules de quartz et de silice. Le silicium est bénéfique pour la croissance et le développement des plantes, car il améliore la résistance aux toxines telles que l'exposition à l'aluminium, et augmente également la résistance aux pénuries d'eau en période de sécheresse. Mais à des doses spécifiques afin de ne pas provoquer de toxicité, car certaines plantes et cultures, comme le tournesol et la tomate, ne peuvent tolérer de fortes concentrations de silicium. Un excès de silicium peut déformer les fleurs et entraver la croissance saine de la plante. Ces plantes sont plus sensibles à des niveaux de silicium plus élevés que d'habitude car elles prennent de la place, empêchent l'absorption d'autres éléments bénéfiques et provoquent des carences en nutriments (*Silicium-Silice-Sio2-Sio4*, n.d ; *Le Rôle Du Silicium Dans L'agriculture. Partie 1 - Biostimulant.com*, 2023).

IV.3.3 Résultats des observations de l'échantillon de sol à différents grossissements à l'aide de microscope électronique à balayage

Ce type d'analyse est très utile pour comprendre les propriétés physiques et chimiques du sol, ce qui est essentiel dans divers domaines tels que l'environnement et les pratiques agricoles. Les images obtenues lors de l'observation de l'échantillon de sol de la carrière d'Héliopolis, à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB), révèlent une microstructure complexe, caractérisée par une combinaison de tailles de particules et une texture rugueuse.

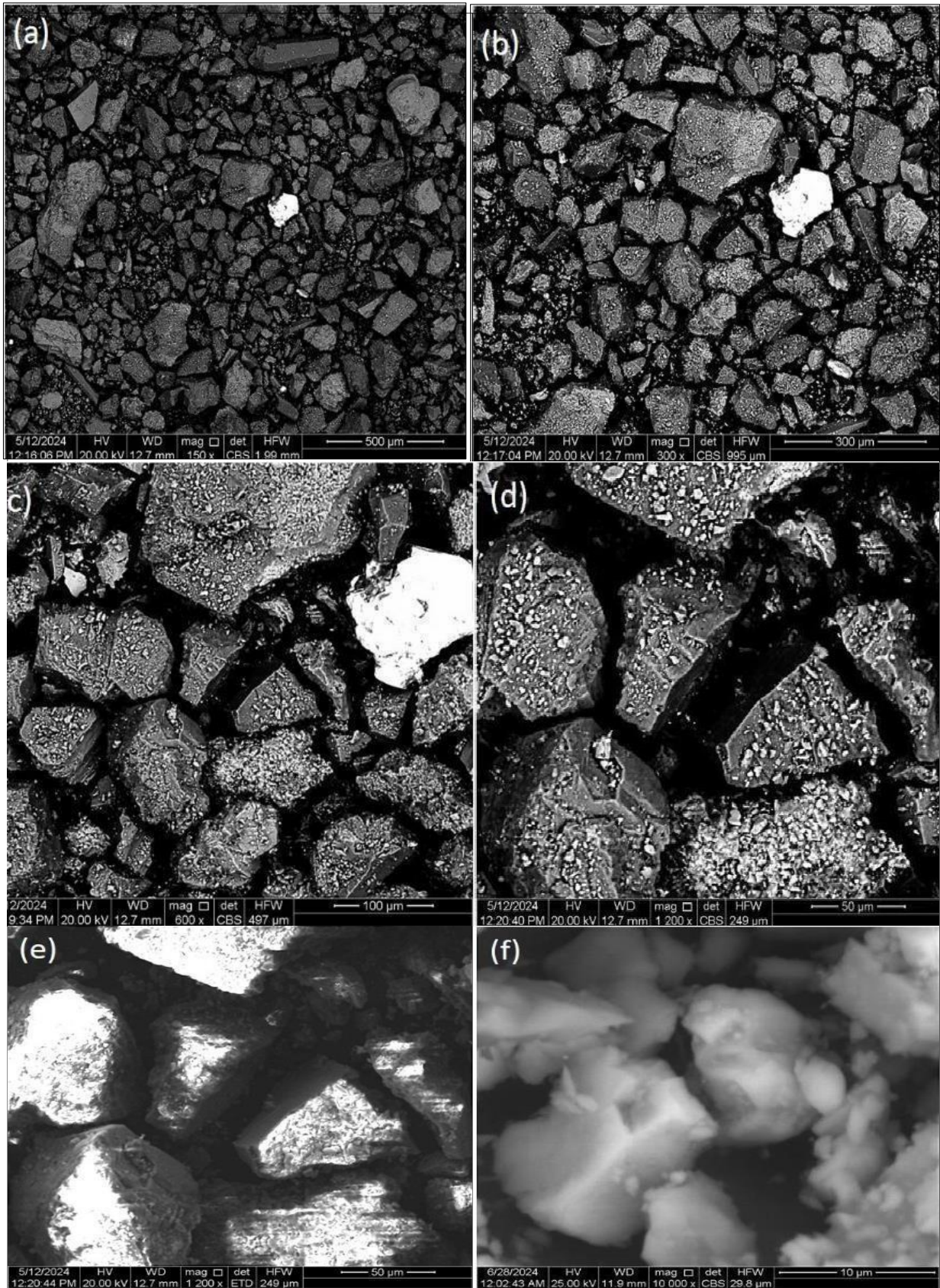


Figure 57-Images d'un échantillon de sol de la carrière d'Héliopolis, observé à différents niveaux de grossissement à l'aide d'un microscope électronique à balayage

IV.3.2.3.8 Interprétations

Les images de l'échantillon de sol par MEB dans la figure 57, montrent qu'il a des surfaces rugueuses et fragmentées. Cette texture indique un mélange de particules de différentes tailles et formes, On peut observer la présence de deux agrégats plus grands et de particules plus fines de tailles différentes. Par exemple, la barre graduée (50 μm) de l'image (d) indique que les particules vont de quelques micromètres (10 μm) à des fractions plus importantes.

L'image de l'observation de la zone entière 2 de sol par MEB figure 58, est marquée en gris pour mettre en évidence les variations de texture et de reliefs des molécules et des surfaces. Certaines zones apparaissent plus claires, d'autres plus sombres, ce qui suggère des différences dans la composition et la taille de ces grains.

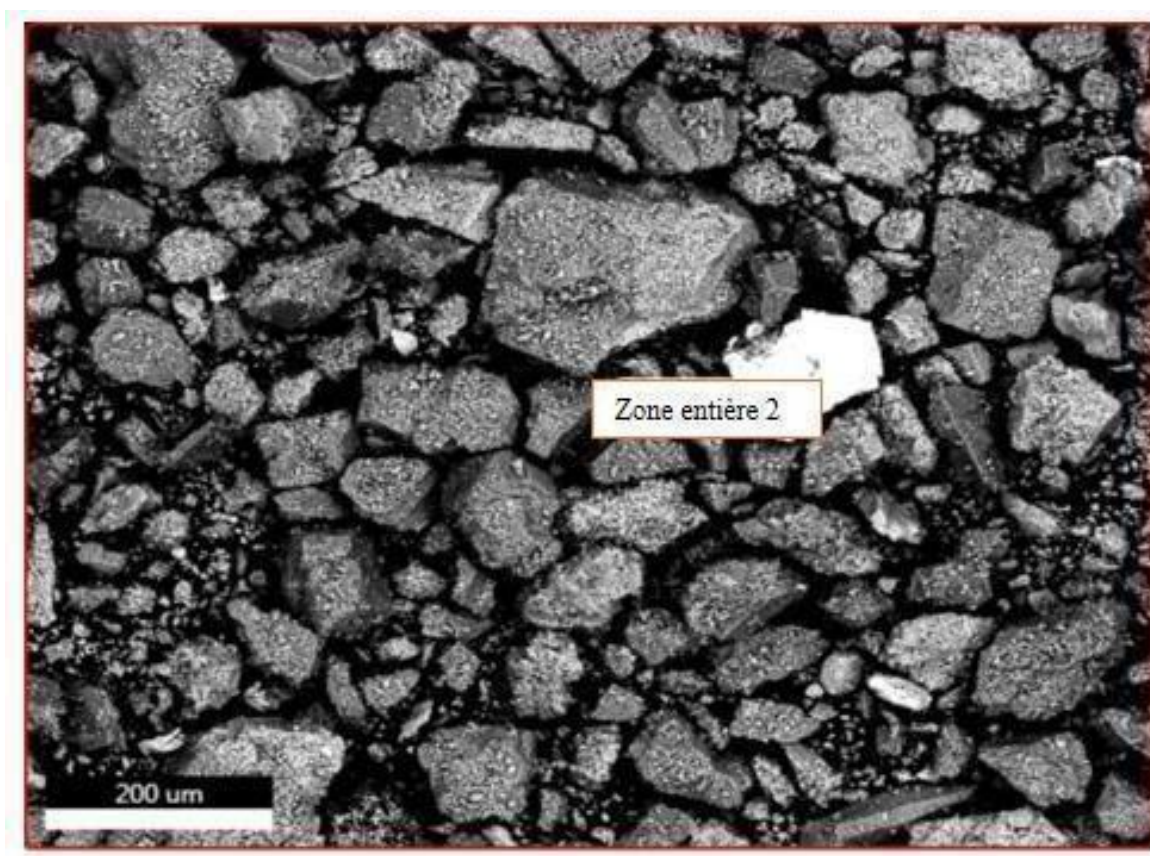


Figure 58- une image agrandie de 200 micromètres par MEB d'un échantillon de sol extrait de la carrière d'Héliopolis « Zone entière 2 »

Concernant l'analyse des éléments présents dans un échantillon, zone nommée « zone entière 2 », obtenue par spectroscopie à dispersion d'énergie des rayons X (EDX/EDS). Les éléments détectés et la localisation des pics, tels que observés sur la figure , présentent des pics marqués pour Ca, Zn, Fe, Al, Mg, Si, Na, K, S, P, C et d'autres éléments mineurs possibles.

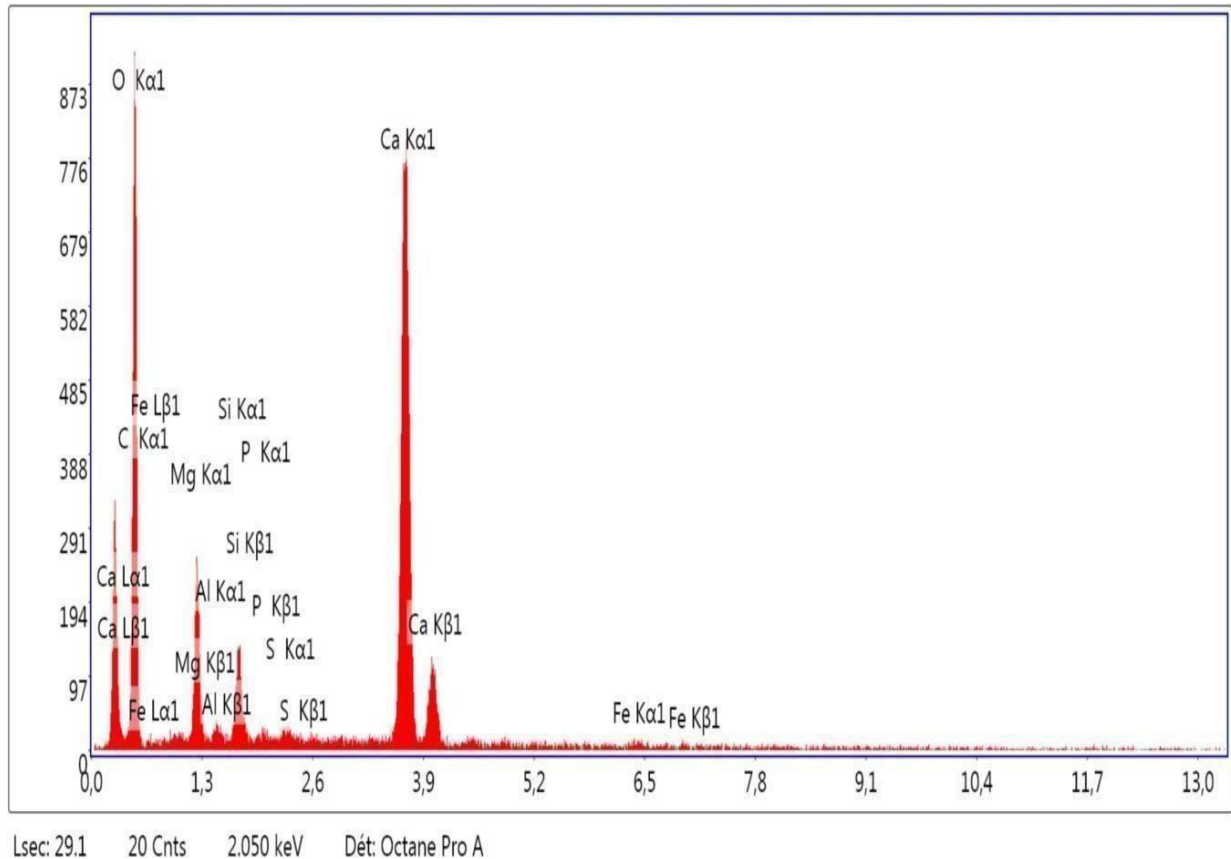


Figure 59- Spectre d'émission X par MEB : Composition Éléments du Sol « Zone entière 2 »

IV.3.2.3.9 Interprétation

On peut observer sur l'image figure 59, une surface rugueuse, formée de nombreuses pièces de tailles et de formes variées. Forme un look granulaire grâce à un zoom allant jusqu'à 200 micromètres par Microscope électronique à balayage.

Tableau 18- eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l'échantillon de sol
« Zone entière 2 », carrière d'Héliopolis

Elément	Pourcentage de masse %	Pourcentage atomique %	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	21.22	29.34	46.26	12.21	0.0789	1.05	0.3515	1.0000
O	57.67	59.86	179.56	10.81	0.0938	1.01	0.1607	1.0000
Mg	6.14	4.19	65.75	11.12	0.0158	0.93	0.2741	1.0032
Al	0.55	0.34	7.79	25.28	0.0017	0.90	0.3510	1.0057
Si	1.60	0.94	33.71	12.58	0.0072	0.92	0.4886	1.0083
P	0.09	0.05	2.00	88.90	0.0005	0.88	0.6129	1.0141
S	0.10	0.05	2.58	73.40	0.0007	0.90	0.7427	1.0227
Ca	12.58	5.21	308.97	2.76	0.1123	0.86	1.0171	1.0115
Fe	0.06	0.02	0.89	81.22	0.0005	0.77	1.0165	1.0755

Le tableau 18 ci-dessus présente les résultats de l'analyse du sol obtenus par spectroscopie à rayons X de dispersion d'énergie (EDX) de la zone entière « 2 », en utilisant une tension de 20 kV, un grossissement de 301 fois, une apparence d'angle de 12,2 degrés, un temps d'acquisition de 29,1 secondes, une constante de temps de 3,84 μ s et une précision de 125,2 eV.

Selon le spectre dans la figure 60 et le tableau 18, on constate que le taux d'oxygène (O) est élevé, atteignant 57,67 % de masse, avec un pourcentage atomique de 59,86%, une intensité totale de 179,56 et une erreur de 10,81. Il est noté que 21,22% de carbone (C) est présent dans l'échantillon de sol, 29,34% correspond au pourcentage atomique, 46,26% représente l'intensité totale et 12,21 représente l'erreur.

En ce qui touche à la teneur en calcium (Ca), elle est élevée, avec une masse de 12,58%, 5,21% de masse atomique, 308,97 intensités totales et une erreur de 2,76. Le magnésium (Mg) se trouve également à 6,14% en masse, 4,19% atomique, 65,75% de densité totale et erreur 11,12.

En supplément, on peut citer le silicium (Si), qui a une masse de 1,60%, 0,94% atomique, une densité totale de 33,71 et une erreur de 12,58, ainsi que de nombreux autres éléments à des concentrations minimales tels que l'Aluminium (Al).

IV.3.2.3.10 eZAF Résultats quantitatifs intelligents de la partie nommée “ zone pointée 2” de l'échantillon sol

Nous avons identifié la zone d'intérêt comme étant le « Zone Pointée 2 » et avons procédé à une analyse approfondie afin de déterminer les éléments présents à cet endroit figure 60.

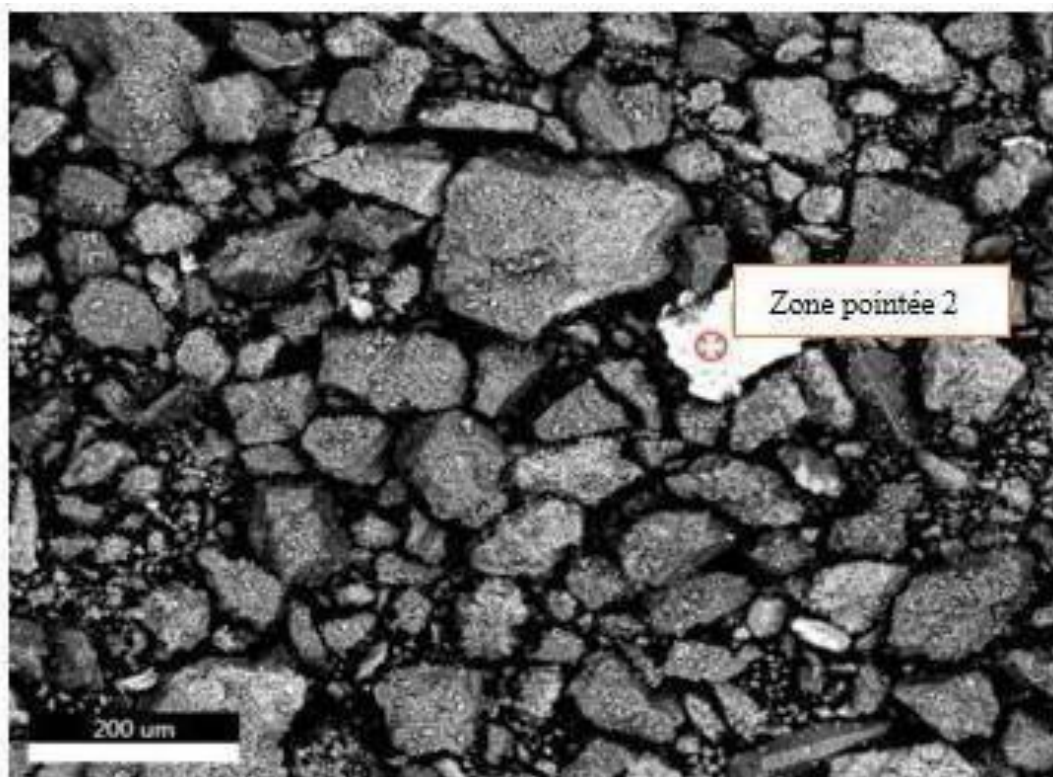


Figure 60- la partie analysée dite «Zone pointée 2 »selon un grossissement de 200 μ m

Le spectre dans la figure 61 montre une composition majoritairement riche en calcium et baryum, avec d'aluminium dans des traces. Les pics Na, Mg, Al, Si et S indiquent la présence de matériaux carbonatés/silicates ou d'une matrice minérale complexe.

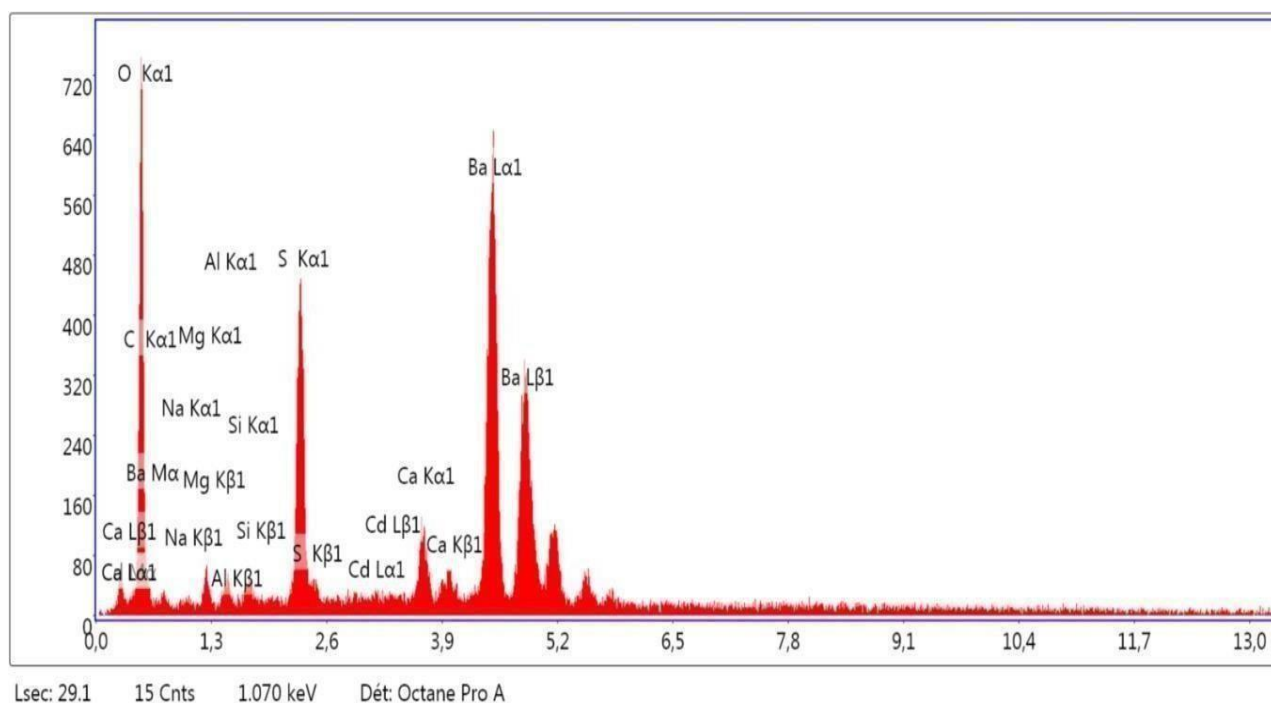


Figure 61- Spectre représentant les composons chimique de la zone nommée «pointée 2 »

L’analyse de la zone étiquetée comme «pointée 2 » en figure 60, donnant les résultats du tableau 19 ci-dessous.

Tableau 19 - eZAF Résultats quantitatifs intelligents de l’échantillon sol dite «pointée 2 »

Elément	pourcentage de masse %	Pourcentage atomique %	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	8.07	18.31	11.55	18.19	0.0230	1.224	0.2330	1.0000
O	32.80	55.86	154.92	10.20	0.0947	1.178	0.2451	1.0000
Na	1.68	1.99	5.69	30.35	0.0021	1.076	0.1172	1.0017
Mg	3.49	3.92	20.04	15.32	0.0056	1.097	0.1464	1.0029
Al	2.11	2.13	16.86	16.12	0.0044	1.058	0.1959	1.0050
Si	1.29	1.25	15.14	16.77	0.0038	1.083	0.2705	1.0082
S	8.61	7.31	147.79	8.33	0.0439	1.064	0.4721	1.0148
Cd	0.30	0.07	2.99	59.64	0.0024	0.798	0.9829	1.0121
Ca	1.83	1.25	36.83	12.37	0.0157	1.031	0.7738	1.0718
BaL	39.82	7.90	268.22	5.09	0.3409	0.745	1.1495	0.9993

IV.3.2.3.11 Interprétation des résultats de l’analyse du sol par EDAX

En analysant les données du tableau 19 et du graphique spectral dans la figure 61, nous montrons que l’échantillon présente une grande présence de 32,80 % en masse d’oxygène et

39,82 % de baryum avec un taux d'erreur maigre (5,09) indiquant la précision de l'analyse, avec une grande quantité de soufre (8,61 % en masse) avec une erreur de 8,33. Il y a aussi la présence de carbone dans l'échantillon, bien qu'il ne soit pas l'élément le plus dominant, sa présence peut souvent indiquer la présence de matière organique ou de carbonates. Des éléments tels que le magnésium, le calcium, l'aluminium, le sodium et le cadmium sont présents mais dans de très faibles proportions peuvent indiquer des impuretés. Les éléments comme le Cd (cadmium) et le Na (sodium) ont des rapports de masse très faibles (0,30 % et 1,68 %, respectivement) et des rapports atomiques faibles (0,07 % et 1,99 %). Leur densité globale est relativement faible, ce qui indique la présence de ces éléments en petites quantités.

La présence de baryum dans l'échantillon indique une pollution de l'environnement. Cette pollution pourrait être causée par des activités industrielles, des mines et des carrières ou une élimination inappropriée des déchets. Dans notre étude de cas de la carrière d'Héliopolis, l'échantillon est situé à proximité de la carrière et d'une usine de béton. Cela suggère que la pollution provenant de ces sources a pu entraîner la présence de baryum dans le sol.

L'élément baryum (Ba) se trouve dans l'atmosphère à cause des émissions industrielles pendant les activités minières, et il peut être rejeté dans la nature en raison de la combustion des combustibles fossiles. Certains chercheurs suggèrent également que la présence de baryum dans les sols agricoles pourrait être due à l'utilisation de pesticides contenant des carbonates et des silicates fluorés de baryum (NIOSH, 2005).

La présence de soufre dans cet échantillon de sol peut être expliquée par l'analyse des différentes sources d'introduction de cet élément (S) dans le sol. Le dioxyde de soufre, présent dans l'atmosphère, peut se déposer sur le sol par le biais des précipitations. Selon le livre ("chimie du sol," 2013) cela peut apporter jusqu'à 30 kg/ha/an de soufre. Il est à noter que le trioxyde de soufre (SO₃) a déjà été détecté dans les poussières minérales lors des analyses par fluorescence X (FRX). En outre, le soufre peut provenir de gisements minéraux présents dans le sol, notamment à travers la décomposition du gypse. Enfin, il est également introduit par le processus de minéralisation de la matière organique du sol ("chimie du sol," 2013).

IV.3.4 Résultats des Analyses des plantes environnantes

Le graphique dans la figure 62 illustre les concentrations d'oxyde de calcium (CaO) dans les échantillons de plantes et d'arbres analysés, en mettant en évidence des niveaux particulièrement élevés, notamment chez le laurier qui a enregistré une concentration de 8325 mg/kg. De plus, on a observé que les surfaces des plantes étaient recouvertes de poussières minérales, ce qui a entraîné une diminution notable de leurs verdeurs. En outre, des niveaux élevés ont également été enregistrés dans la mauve, la branche de pin, les feuilles d'eucalyptus, ainsi que dans les branches de chardon sauvage et d'olivier respectivement (3725 mg/kg, 3500 mg/kg, 3125 mg/kg, 2925 mg/kg, 2500 mg/kg) selon volumétrie NFT 90 005.

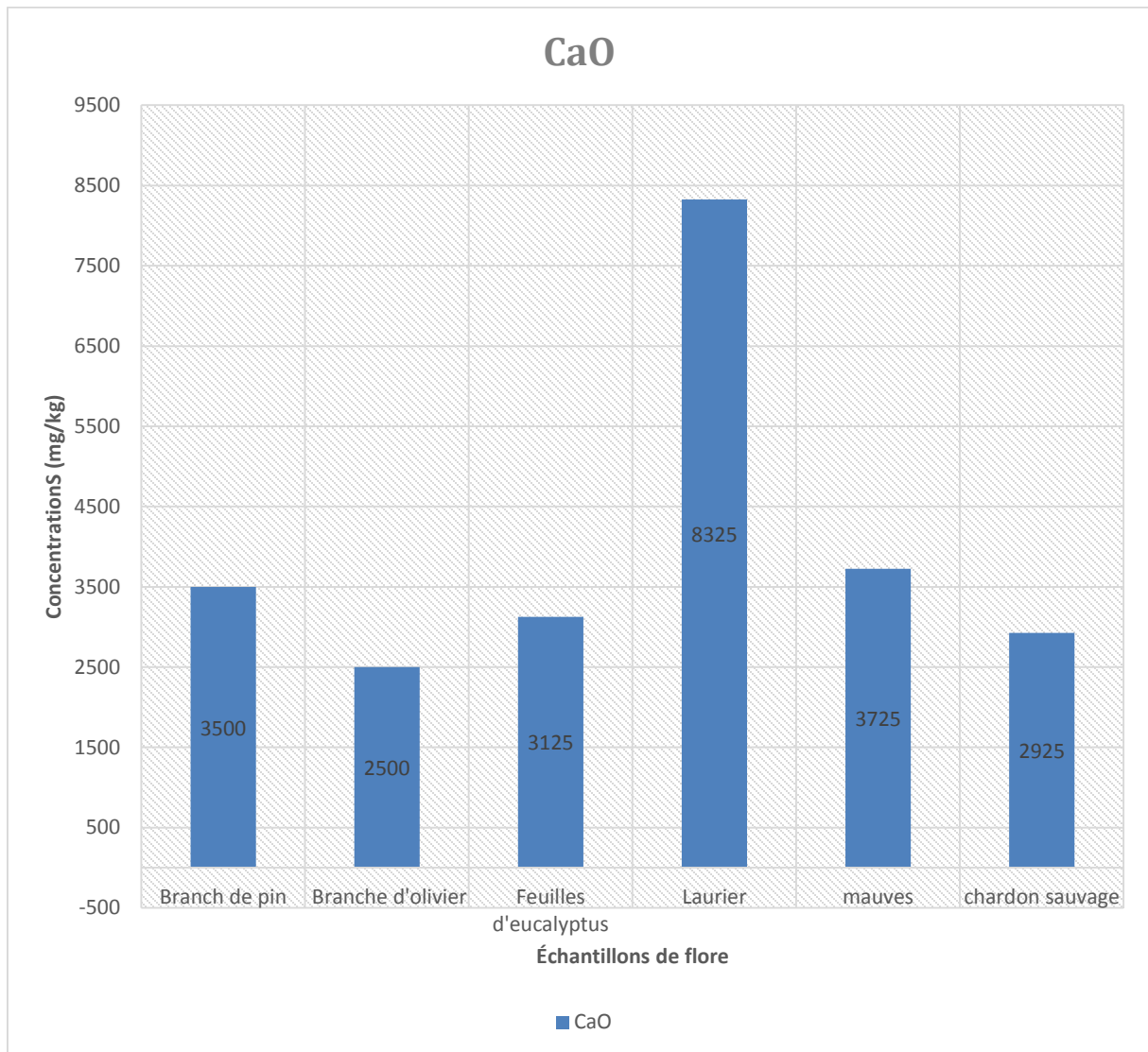


Figure 62 - Concentrations d'oxyde de calcium (CaO) dans des échantillons végétaux près de la carrière d'agrégats d'Héliopolis

Des études démontrent que l'ajout d'oxydes de calcium et de carbonates (CaCO_3) augmente le pH du sol. Les analyses précédentes confirment que les niveaux de pH dépassent constamment 9. Il est crucial de reconnaître que le dépassement d'une limite de pH spécifique entraîne des effets néfastes. En effet, des études scientifiques montrent clairement que l'instabilité se produit à des niveaux de pH supérieurs à 7,8 (Getahun et al, 2021).

La chlorose ferrique se produit au milieu d'un sol calcaire, où la présence de calcium empêche l'absorption d'autres substances telles que le fer et le phosphate, où on observe que la couleur des feuilles des arbres affectés change en jaune ("Chimie du sol," 2013).

Les concentrations de silice (SiO_2) dans les échantillons de plantes analysés varient d'un échantillon à l'autre, comme le montre le graphique dans la figure 63. La mauve présente la concentration la plus élevée à 525 mg/kg, suivie de la branche d'olivier à 375 mg/kg, puis du laurier à 225 mg/kg. Viennent ensuite les feuilles d'eucalyptus à 175 mg/kg, suivies du chardon sauvage à 50 mg/kg, et enfin la branche de pin avec 30 mg/kg (selon DIN EN ISO 16264-H57).

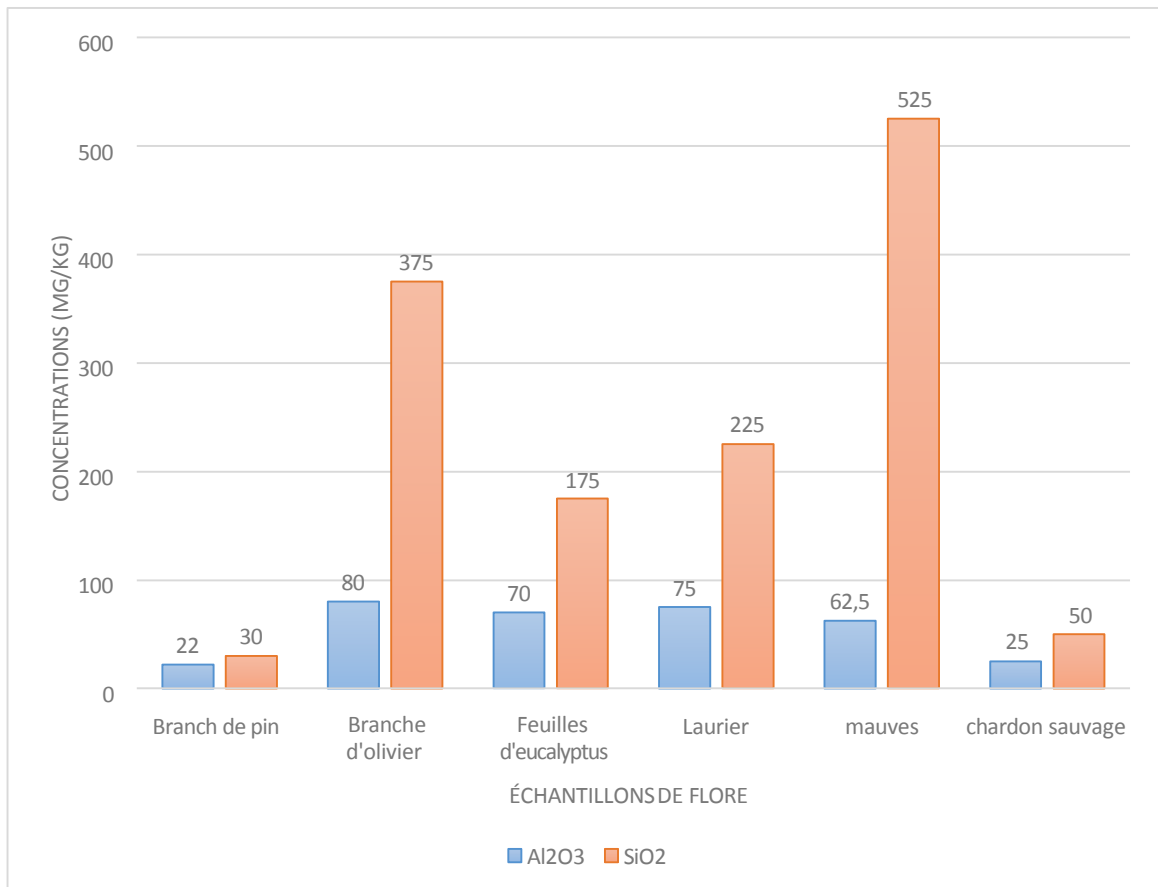


Figure 63 - Concentrations de la silice et l'aluminium dans les échantillons de flore à proximité de site

Les concentrations de silice (SiO_2) dans les échantillons de plantes analysés varient d'un échantillon à l'autre, comme le montre la figure 63. La mauve présente la concentration la plus élevée à 525 mg/kg, suivie de la branche d'olivier à 375 mg/kg, puis du laurier à 225 mg/kg. Viennent ensuite les feuilles d'eucalyptus à 175 mg/kg, suivies du chardon sauvage à 50 mg/kg, et enfin la branche de pin avec 30 mg/kg (selon DIN EN ISO 16264-H57).

Le dioxyde de silicium se trouve naturellement dans les roches calcaires, ce qui explique sa présence dans la poussière minérale de la carrière de granulat d'Héliopolis et sur les surfaces

des plantes analysées. La capacité des plantes, des légumes et de diverses autres plantations à absorber le silicium varie, car certaines ne peuvent pas se permettre des concentrations supérieures à 1 g/kg, comme les tomates et le soja. Toutefois, les niveaux de biomasse dans le blé et l'orge peuvent atteindre 10 g/kg, tandis que la concentration maximale des herbes aquatiques peut être de 50 g/kg (Deshmukh et al, 2017 ; M. Yuvaraj & R.gangothri, 2017).

En ce qui concerne la concentration d'aluminium, l'analyse physique et chimique des échantillons de plantes et d'arbres permet de conclure que le rameau d'olivier présente la plus grande concentration d'aluminium, atteignant 80 mg/kg, suivi par le laurier avec une concentration de 75 mg/kg. On observe ensuite les feuilles d'eucalyptus à 70 mg/kg, suivies de la plante de mauve à 62,5 mg/kg, puis du chardon sauvage à 25 mg/kg, et enfin du pin avec une concentration de 22 mg/kg (selon APHA 3500 AL D). Des recherches en toxicologie environnementale ont montré que l'exposition à l'aluminium réduit l'immunité des plantes contre les maladies, attaque les racines en particulier, provoque un vieillissement physiologique précoce des plantes et par conséquent met en danger la production agricole (figures 64, et 65). (*Ecotoxicology Of Aluminium*, 2002).

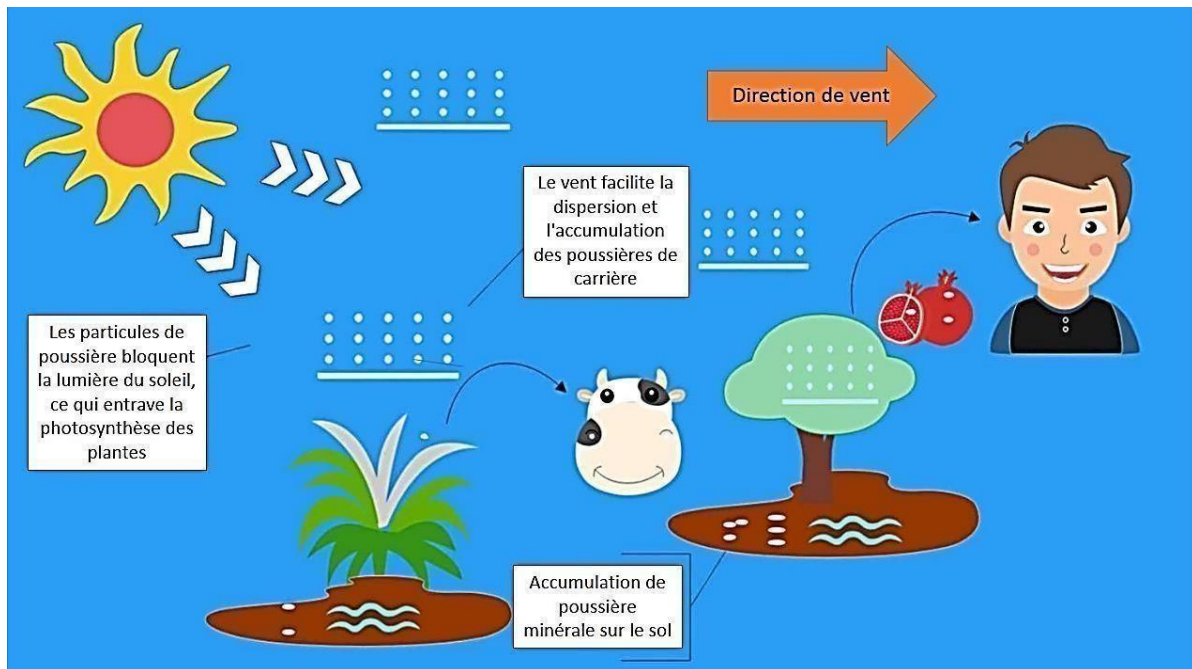


Figure 64 - Les poussières de carrière ont des répercussions sur les écosystèmes naturels

L'aluminium présent dans le sol ou l'eau peut endommager les racines des plantes et entraver leur croissance, comme le montre la figure 65 suivante. Donc, Les plantes subissent

principalement des changements physiologiques en raison de la toxicité de l'aluminium (CruzF. J. R, 2023).

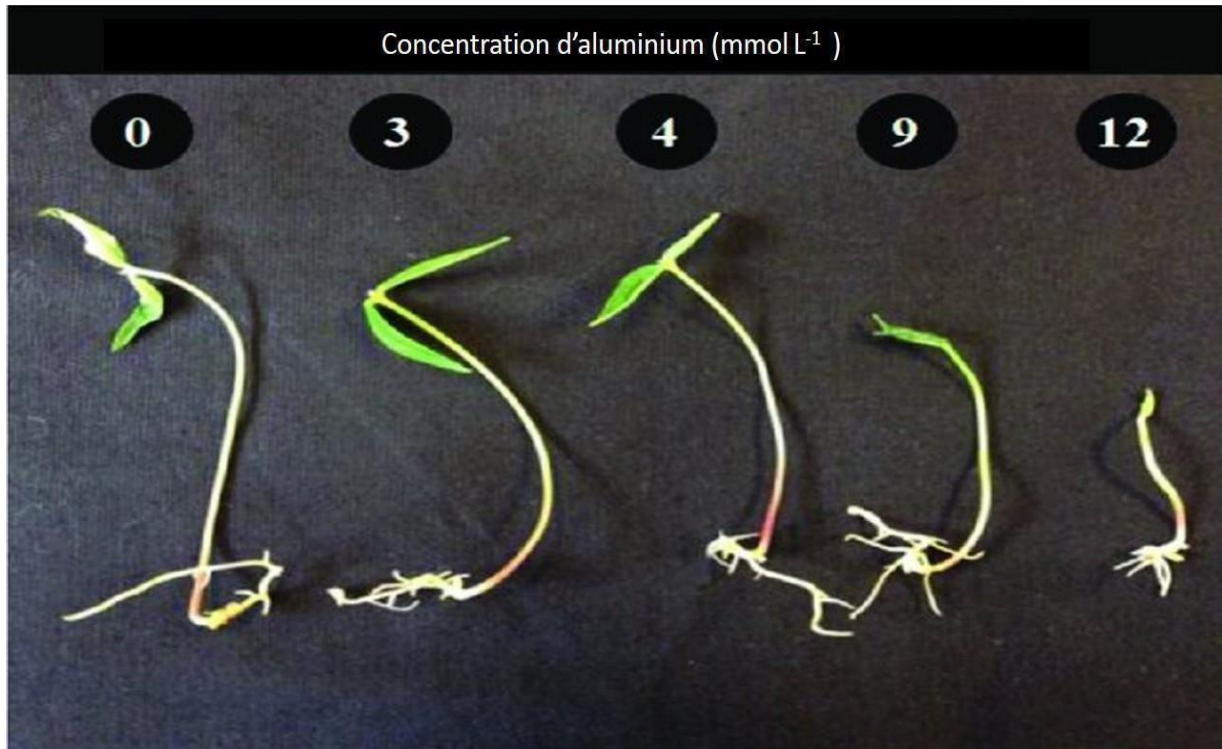


Figure 65- L'ampleur des effets de l'aluminium sur les plantules de *Cajanus cajan* (Cruz F. J. R, 2023)

IV.4 Perspectives d'un développement durable (économique, social et écologique)

Le concept de « développement durable » évoque l'objectif d'établir un lien solide entre les dimensions économique, sociale et environnementale (Stoessel & Blanc, 2021). Les différents projets économiques nécessitent un engagement et une coopération entre trois parties pour garantir le développement durable et assurer la réussite du projet sur les plans financier, sociétal et environnemental. Pour y parvenir, il est essentiel d'établir une coopération entre les entreprises, qui agissent en tant que responsables du projet, et les gouvernements, qui représentent l'autorité la plus responsable dans le pays. De plus, les communautés locales, qui font partie intégrante de la structure sociale et sont affectées par les projets existants dans leur environnement, doivent également être impliquées. Il est donc crucial de travailler à établir des liens entre ces parties dans un cadre qui favorise la durabilité environnementale, sociale et économique.

IV.4.4 Dimension économique

Extraction de l'agrégat est un projet comme les autres projets d'investissement qui génère naturellement des bénéfices pour les entreprises responsables. Parmi les avantages offerts par de tels projets, on peut citer la création d'emplois pour les collectivités dans divers domaines et les phases préparatoires des granulats, comme l'exploration, l'extraction, le traitement et le transport des produits finis.

IV.4.4 Aspects sociaux

L'acceptation par la communauté de l'idée d'investir dans l'environnement et la considération d'impliquer ses représentants dans le processus décisionnel est une étape importante et une grande action qui profitera au projet et à la communauté locale.

Concernant le coté conditions de travail : Il faut déployer des efforts accrus pour assurer des conditions de travail saines et sécuritaires afin d'atténuer les effets négatifs des diverses activités d'exploitation sur la santé des travailleurs et des résidents à proximité du site.

Les différentes entreprises des carrières doivent s'engager à mettre en place des pratiques responsables et à procéder régulièrement à des évaluations de l'impact environnemental de leurs projets. Toutes les parties concernées devraient s'efforcer de contribuer au bien-être des communautés locales. Cela peut être réalisé par la création de petites initiatives de divertissement et de services visant à servir la communauté locale et à réduire la pollution atmosphérique. Pour les activités de carrière, des efforts tels que la plantation d'arbres, la construction de bassins et d'étangs artificiels, ainsi que des activités récréatives devraient être entrepris dans le cadre d'initiatives sociales et environnementales.

IV.4.4 Considérations environnementales

IV.4.3.1 La Gestion des ressources naturelles

Les ressources naturelles doivent être utilisées de manière durable afin de minimiser les impacts négatifs sur l'eau, la flore, la faune et les populations humaines.

IV.4.3.2 Les travaux de réhabilitation du site minier

Le fait de ne pas réhabiliter un site minier est considéré comme une infraction environnementale et sociétale. Il est donc nécessaire de prévoir la restauration du site ou la récupération des terres.

IV.4.3.3 Atténuation des libérations de poussières minérales et des bruits

Il est essentiel de respecter les normes nationales et internationales ainsi que les recommandations des organisations et des associations de sensibilisation (OMS, NA, **EPA**, **ISO**) Cela inclut l'application de technologies modernes moins polluantes pour l'environnement et moins nuisibles pour la santé des populations. Il est également important d'organiser des formations qui intègrent des méthodes d'exploitation modernes et durables. De plus, il convient d'encourager tant les pratiques individuelles que collectives visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, de poussières minérales, de particules fines et la pollution en général. Dans le même contexte, l'auteur explique dans sa thèse (Mansouri & Sabri, 2020) qu'il existe un concept connu sous le nom d'"empreinte écologique", mesure l'ampleur de l'impact humain sur l'environnement en termes de pression et de distorsion résultant de l'exploitation des ressources naturelles d'une manière qui appauvrit, ainsi que les déchets générés. L'empreinte environnementale est représentée par la mesure de la superficie endommagée des terrains qui ne peuvent pas être régénérés. L'unité de mesure utilisée est l'unité de superficie exprimée en hectares.

IV.5 Conclusion

Les différentes techniques d'analyse adaptées pour évaluer l'état environnemental global de la carrière d'Héliopolis ont produit des résultats très intéressants. Tout d'abord, le dispositif électronique évaluant la qualité de l'air a révélé l'ampleur de la pollution environnementale externe, résultant des diverses opérations d'extraction et de préparation des granulats, telles que le dynamitage, le concassage, le broyage, le criblage, ainsi que le transport du gravier sous sa forme finale. L'émission de fortes concentrations de particules de poussière (PM 1, PM 2.5, et PM 10) dans l'air pose un risque particulier pour la santé respiratoire humaine, comme le confirment des études récentes et des recherches médicales. L'analyse des échantillons de poussière à l'aide du dispositif MEB a révélé la présence de particules de poussière spécifiques de 10 micromètres, 5 μm , 2,5 μm , 1 μm et moins.

De plus, cette pollution a un impact négatif significatif sur les plantes et les arbres adjacents au site, d'autant plus que la carrière est située dans une zone rurale entourée de terres agricoles privées. Des analyses de laboratoire d'échantillons de plantes, d'arbres et de sol ont confirmé l'impact direct de cette pollution sur la flore. Par ailleurs, les analyses physico-chimiques des échantillons de poussière par DRX et FRX ont confirmé la diversité de leur composition chimique, marquée par une prédominance d'oxydes minéraux tels que l'oxyde de calcium et les carbonates, en lien avec la nature géologique de la roche mère dans la carrière. Enfin, les résultats des analyses de l'eau montrent clairement que les concentrations élevées d'oxydes de calcium et d'aluminium affectent négativement la qualité de l'eau, compromettant ainsi les organismes qui en dépendent pour leur consommation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude de cas porte sur une carrière de gravier située à l'ouest d'Héliopolis, territorialement rattachée à la wilaya de Guelma, dans l'est de l'Algérie. La localisation géographique de cette carrière est considérée comme très proche de la ville d'Héliopolis, à une distance d'un kilomètre. La carrière est bordée à l'ouest par la ville d'El Fedjoudj, tandis qu'au nord par Hammam Ouled Ali et elle bordée de l'Est par Hammam Bradaa.

Pour exploiter les granulats, on commence par dynamiter la zone minéralisée en creusant des trous à l'aide d'une unité de forage de type (A/COPSO 17), en plus de la foreuse (A/COSPO 405) et du remplissage des trous avec du matériel explosif au besoin.

Ensuite, ces pierres sont transportées vers des stations de concassage et de broyage pour réduire leurs tailles, les traiter, les broyer, et les tamiser selon les tailles requises (0/3, 5/8, 15/25 mm...etc).

Certains décrivent la surexploitation des ressources naturelles non renouvelables comme une « malédiction de ressource », en raison des défis et des conflits qu'elle engendre, en raison des graves problèmes environnementaux et sanitaires qu'elle engendre. Il est crucial de souligner l'importance des activités minières pour la préservation de l'environnement et le bien-être des communautés locales, en particulier dans la zone du projet. Un exemple à considérer serait de travailler à la redistribution des richesses extraites au profit de la communauté. Les entreprises axées sur des projets peuvent partager les richesses minérales supplémentaires avec la communauté, contribuer à l'amélioration des infrastructures et servir l'humanité ainsi que l'environnement par le biais de réalisations significatives telles que des hôpitaux et des centres de loisirs (CarvalhoF. P, 2017).

Suite à des caractérisations physico-chimiques et à l'utilisation de diverses techniques d'analyse (moniteur de la qualité de l'air, DRX, FRX, EDEX, MEB), nous avons conclu que les résultats obtenus, à partir d'échantillons prélevés de la carrière de granulats et ses environs, sont significatifs par leurs impacts sur l'environnement. Ils polluent l'air en créant des particules de poussière fines de moins de 50 micromètres, comme les PM10, PM5, PM2, 5 et PM1, qui sont particulièrement nocives pour le système respiratoire humain à fortes concentrations. Une analyse physico-chimique de ces émissions de poussières a montré qu'elles contiennent diverses compositions chimiques dans des proportions différentes, dont la calcite, la dolomite, le quartz et divers oxydes concernés (CaO, SiO₂, MgO, AlO₂, Fe₂O₃, SO₃, K₂O, Na₂O).

Le vent transporte ces particules de poussière minérale pour les propager dans les zones voisines. Des analyses chimiques d'échantillons d'arbres et plantes autour du site ont montré qu'ils couvrent leurs feuilles et limitent la lumière du soleil. Les échantillons de sol, les plantes et les arbres ont également été examinés avec des taux élevés d'aluminium, ce qui confirme l'hypothèse de contamination par les poussières minérales de la carrière.

En plus de la forte concentration d'oxydes de calcium qui a des conséquences négatives sur la production agricole, il perturbe également d'autres éléments et augmente le pH du sol.

Une forte concentration d'aluminium à 0,50 mg/l a été observée lors de l'analyse d'échantillon d'eau de surface, ce qui met en évidence une forte possibilité de contamination des cours d'eau de surface.

Le MEB a confirmé la présence de particules fines de tailles variables (PM1, PM2.5, PM5) dans l'échantillon de poussières, y compris des particules allant jusqu'à 50 micromètres, 10 µm, 5 µm, 2.5 µm et d'autres inférieures à 1 micromètre. Le MEB a également identifié la forme des particules comme des cubes tranchants et rugueux avec des fractures indiquant une action mécanique

La spectroscopie à rayons X de dispersion énergétique (EDX) de l'échantillon de poussière a montré la présence d'un pourcentage élevé de calcite en plus de l'oxygène, ainsi que des concentrations modérées d'aluminium, de fer, de zinc et de silicates. L'analyse d'une partie spécifique de la poussière a mis en évidence des niveaux élevés de soufre, ce qui est inquiétant car cet élément sous forme de poussière est très dangereux.

Pour se faire, les recommandations que nous formulons dans ce contexte sont les suivantes :

- La réhabilitation du site demeure la meilleure option pour atténuer l'aggravation de la situation environnementale sur place, en plantant des arbres résistants à la pollution atmosphérique le long de la limite de la carrière.
- Avec soin d'utiliser la technologie moderne avec des pulvérisateurs d'eau lors de la préparation mécanique des granulats par concassage-criblage.
- Trouver des moyens de récupérer la poussière minérale et l'utiliser dans d'autres domaines utiles.
- Accorder une attention particulière à la gestion appropriée des déchets de carrière et de leurs machines, afin d'éviter tout contact avec l'aquifère et sa contamination.
- Inciter à sensibiliser les travailleurs, par exemple au besoin de porter des masques anti-poussière et des lunettes. En plus d'améliorer les conditions de travail, comme l'organisation de cours médicaux spéciaux en ophtalmologie, dermatologie et maladies thoraciques pour eux chaque période.
- Exploiter rationnellement les granulats en tant que ressource non renouvelable, tout en s'efforçant d'utiliser des granulats recyclés autant que possible, pour protéger les droits des générations futures et respecter l'environnement.

RÉFÉRENCES

A

1. Abbas, S. H., Khudair, B. H., & Jaafar, M. S. (2019). River water salinity impact on drinking water treatment plant performance using artificial neural network. *Journal of Engineering*, 25(8), 149–159. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2019.08.10>
2. Adams, T. (2021, March 24). Environmental best practice part 3: Rehabilitation mining best practices. *GRT*. <https://globalroadtechnology.com/environmental-best-practice-part-3-rehabilitation-mining-best-practices/>
3. Admin. (2022, December 2). Analyse d'eau physico-chimique en laboratoire | Experteau. *Experteau*. <https://experteau.com/analyse-deau/analyse-physico-chimique/>
4. Adriano, D., Wenzel, W., Vangronsveld, J., & Bolan, N. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122(2–4), 121–142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.003>
5. Ahirwal, J., & Maiti, S. K. (2021). Restoring coal mine degraded lands in India for achieving the United Nations-Sustainable Development Goals. *Restoration Ecology*, 30(5). <https://doi.org/10.1111/rec.13606>
6. Ahirwal, J., Maiti, S. K., & Singh, A. K. (2016). Ecological restoration of coal mine-degraded lands in dry tropical climate: What has been done and what needs to be done? *Environmental Quality Management*, 26(1), 25–36. <https://doi.org/10.1002/tqem.21481>
7. Aleksandrova, A. Y., & Timofeeva, S. S. (2021). The study of dust nanoparticles and their impact on the health of mining workers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 666(3), 032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/3/032030>
8. Alonso, M. J., Moazami, T., Liu, P., Jørgensen, R., & Mathisen, H. (2022). Assessing the indoor air quality and their predictor variable in 21 home offices during the Covid-19 pandemic in Norway. *Building and Environment*, 225, 109580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109580>

9. Amnuaylojaroen, T., & Parasin, N. (2023). Future health risk assessment of exposure to PM_{2.5} in different age groups of children in Northern Thailand. *Toxics*, 11(3), 291. <https://doi.org/10.3390/toxics11030291>
10. Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2011a). Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166–175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
11. Agriculture. (2021). Retrieved May 28, 2024, from https://interieur.gov.dz/Monographie/article_detail.php?lien=840&wilaya=24
12. Air pollution. (2019, July 30). *World Health Organization*. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
13. Air Quality, Energy and Health. (2024, June 25). *World Health Organization*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health>
14. Alcoa: Australia. (2023, November 28). Retrieved August 31, 2024, from <https://www.alcoa.com/australia/en/news/releases?id=2023/11/alcoa-continues-successful-rehabilitation-of-jarrah-forest-ecosystem&year=y2023>
15. Alcoa -- Australia. (2024). Retrieved May 31, 2024, from <https://www.alcoa.com/australia/en>
16. Aluminium et effets sur la santé • Cancer Environnement. (2022, August 16). *Cancer Environnement*. [https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/aluminium/#:~:text=En%20milieu%20professionnel%20\(industrie%20de,m3%20\(poussi%C3%A8res%20totales\).](https://www.cancer-environnement.fr/fiches/expositions-environnementales/aluminium/#:~:text=En%20milieu%20professionnel%20(industrie%20de,m3%20(poussi%C3%A8res%20totales).)
17. Appalachian Voices. (2012). Retrieved May 31, 2024, from <https://www.google.com/earth/outreach/success-stories/appalachian-voices/>
18. Article L220-2 - Code de l'environnement - Légifrance. (2010). Retrieved March 19, 2024, from https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000022494826
19. Asma, R. (2015). Qualité physico-chimique des eaux de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie): Caractérisation et

analyse. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/324922474> Qualite Physico-Chimique des Eaux de l'Oued Seybouse Nord-Est de l'Algerie Caracterisation et Analyse en Composantes Principales Physico-chemical quality of the waters of the Oued Seybouse Northeast

20. Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture*. http://books.google.ie/books?id=9WIRAAAAMAAJ&q=92-5-102263-1&dq=92-5-102263-1&hl=&cd=10&source=gbs_api
21. Arteaga, F., Nehring, M., Knights, P., & Camus, J. (2014). Schemes of exploitation in open pit mining. In *Mine Planning and Equipment Selection* (pp. 1307–1323). https://doi.org/10.1007/978-3-319-02678-7_126

B

22. Baaloudj, A., De Los Ríos-Escalante, P. R., & Esse, C. (2024). Benthic community ecology for Algerian river Seybouse. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.251566>
23. Bahroun, S., Touiou, K., Gheid, S., & Drouiche, N. (2023). The conception of GIS to evaluate the impact of anthropogenic activities on the quality of surface waters of the dams of the hydrographic region of Constantinois-Seybouse-Mellegue, Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 289, 35–49. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29471>
24. Bandyopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2019). Evaluation of ecological restoration success in mining-degraded lands. *Environmental Quality Management*, 29(1), 89–100. <https://doi.org/10.1002/tqem.21641>
25. Bascompta, M., Sanmiquel, L., Gangoellés, M., & Sidki, N. (2022). LCA analysis and comparison in quarrying: Drill and blast vs mechanical extraction. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133042. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133042>
26. Beames, A., Broekx, S., Lookman, R., Touchant, K., & Seuntjens, P. (2014). Sustainability appraisal tools for soil and groundwater remediation: How is the choice of remediation alternative influenced by different sets of sustainability indicators and

- tool structures? *Science of the Total Environment*, 470–471, 954–966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.044>
27. Belhadj, M. Z. (2017, April 29). Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la Wilaya de Skikda. <http://archives.univ-biskra.dz/handle/123456789/24039>
28. Benhamza, M. (2007). Thésés-Algérie: Doctorat, Magister, Master... Retrieved August 29, 2024, from <https://theses-algerie.com/1630433213901968/these-de-doctorat/universite-badji-mokhtar-annaba/contribution-de-la-geophysique-a-letude-hydrogeologie-de-la-zone-mercurielle-nord-numidique-azzaba-determination-du-degre-de-pollution>
29. Benhamza, M., Kherici, N., Nezzal, A., & Françoise, P. B. (2008). Qualité des eaux souterraines de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba), Nord Est Algérie. Évaluation de la contamination de la population par le mercure inorganique. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 19(02), 135–149.
30. Benmarce, K. (2015). Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Guelma, Nord-Est Algérien. Retrieved August 29, 2024, from <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2016/09/these-Benmarce-Kaddour.pdf>
31. Benmarce, K., Hadji, R., Hamed, Y., Zahri, F., Zighmi, K., Hamad, A., Gentilucci, M., Ncibi, K., & Besser, H. (2023). Hydrogeological and water quality analysis of thermal springs in the Guelma region of North-Eastern Algeria: A study using hydrochemical, statistical, and isotopic approaches. *Journal of African Earth Sciences*, 205, 105011. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105011>
32. Bernhardt, E. S., Lutz, B. D., King, R. S., Fay, J. P., Carter, C. E., Helton, A. M., Campagna, D., & Amos, J. (2012). How many mountains can we mine? Assessing the regional degradation of Central Appalachian rivers by surface coal mining. *Environmental Science & Technology*, 46(15), 8115–8122. <https://doi.org/10.1021/es301144q>

33. Bianconi, F., & Filippucci, M. (2021). *Digital Draw Connections*. Springer
Nature. http://books.google.ie/books?id=r8rEAAAQBAJ&pg=PR4&dq=978-3-030-59743-6&hl=&cd=1&source=gbs_api
34. Blair, J. (2019, March 4). Rehabilitating stone quarries & aggregate sites - A.L. Blair Construction. A.L. Blair Construction. <https://alblairconstruction.com/rehabilitating-stone-quarries-aggregate-sites/>
35. Boutemedjet, A., Bounouala, M., Idres, A., & Benselhou, A. (2019). Assessment of dust pollution related to granite quarry operations in Kef Bouacida, Annaba (Algeria). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1*, 117–124. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/13>
36. Bouthier, A., & Castillon, P. (2015). L'acidification des sols: Origine, approche, enjeux et maîtrise. Retrieved August 22, 2024, from https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2015/03/colloque_bouthier.pdf
37. Brewster, D. (2024, January 10). Everything you need to know about silica in your water. Aqua Clear Water Systems. <https://aquaclearws.com/resources/everything-you-need-to-know-about-silica-in-your-water/#:~:text=In%20fact%2C%20the%20vast%20majority,water%20supplies%20at%20some%20level.>
38. Bruneel, O., Mghazli, N., Sbabou, L., Héry, M., Casiot, C., & Filali-Maltouf, A. (2019). Role of microorganisms in rehabilitation of mining sites, focus on Sub Saharan African countries. *Journal of Geochemical Exploration*, 205, 106327. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.009>

C

39. Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: Time for change. *Food and Energy Security*, 6(2), 61–77. <https://doi.org/10.1002/fes3.109>
40. Cartes géologiques wilaya Guelma. (2022). Site personnel de Mme Ruault-Djerrab, enseignante à l'Université de Guelma (Algérie). Retrieved May 9, 2024, from <https://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com/pages/geologie-de-guelma/geologie-regionale.html#page2>

41. CMG GardenNotes #222. (2023). In *CMG GardenNotes* (Issue 222, pp. 1–4). Retrieved August 19, 2024, from <https://cmg.extension.colostate.edu/Gardennotes/222.pdf>
42. Caughlin, T. T. (2022). Primer of ecological restoration. *Ecological Restoration*, 40(4), 278–279. <https://doi.org/10.3368/er.40.4.278>
43. Chen, H., Oliver, B. G., Pant, A., Olivera, A., Poronnik, P., Pollock, C. A., & Saad, S. (2022). Effects of air pollution on human health: Mechanistic evidence suggested by in vitro and in vivo modelling. *Environmental Research*, 212, 113378. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113378>
44. Chen, R., Zhang, Z., Sun, W., Fu, Y., Zhang, Q., Wei, L., Liang, Y., & Dong, R. (2012). System position and divergent time of *Humulus scandens* based on ITS sequence. *American Journal of Plant Sciences*, 3(10), 1470–1475. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.310177>
45. Chenot, J. (2018). Réhabilitation écologique d'écosystèmes dégradés par l'exploitation des carrières : Faire avec, refaire ou laisser faire la nature? *Theses.fr*. Retrieved August 29, 2024, from <https://theses.fr/2018AVIG0344>
46. Chimie du sol. (2013). In *Chimie du sol*. <http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO5.pdf>
47. Chrzan, T. (2023). Protecting the environment around Polish quarries from harmful seismic vibrations caused by rock blasting. *Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 1, 44–48. <https://doi.org/10.17770/etr2023vol1.7284>
48. Comment le photographe Sebastião Salgado a permis le reboisement de 700 hectares de forêt au Brésil. (2018, December 6). *France Inter*. <https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/le-zoom-de-la-redaction/comment-le-photographe-sebastiao-salgado-a-permis-le-reboisement-de-700-hectares-de-foret-au-bresil-6398466>

49. Coursgeologie. (2022, November 13). La chaîne des Maghrebides. *Coursgeologie, Le Coin de la Géologie*. Retrieved May 11, 2024, from <https://coursgeologie.com/la-chaîne-des-maghrebides-168/>
50. Cruz, F. J. R. (2023). Toxic aluminum and water deficit interaction in plants: Physiological aspects and chemical soil management to improve root environment in the context of global climate change. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111418>
51. Cui, Z., Wang, H., Yang, K., Shen, Y., Qin, K., Yuan, P., & Li, E. (2024). Highly sensitive and selective defect WS2 chemical sensor for detecting HCHO toxic gases. *Sensors*, 24(3), 762. <https://doi.org/10.3390/s24030762>
52. Cullen, W., Wheeler, C., & Dunleavy, P. J. (1998). Establishment of species-rich vegetation on reclaimed limestone quarry faces in Derbyshire, UK. *Biological Conservation*, 84(1), 25–33. [https://doi.org/10.1016/s0006-3207\(97\)00089-x](https://doi.org/10.1016/s0006-3207(97)00089-x)
53. Climat Guelma - Données climatiques. (2021). www.tutiempo.net. Retrieved June 3, 2024, from <https://fr.tutiempo.net/climat/2021/ws-604030.html>

D

54. Da Silva, E. F., Patinha, C., Reis, P., Fonseca, E. C., Matos, J. X., Barrosinho, J., & Oliveira, J. M. S. (2006). Interaction of acid mine drainage with waters and sediments at the Corona stream, Lousal mine (Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal). *Environmental Geology*, 50(7), 1001–1013. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0273-6>
55. Dal Sasso, P., Ottolino, M. A., & Caliandro, L. P. (2012). Identification of quarries rehabilitation scenarios: A case study within the metropolitan area of Bari (Italy). *Environmental Management*, 49(6), 1174–1191. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9847-0>
56. De Werdna, A. T. L. A. (2015, February 4). Aux États-Unis, les montagnes des Appalaches décapitées par les marchands de charbon. *Résistance Inventerre*. <https://resistanceinventerre.wordpress.com/2015/02/05/aux-etats-unis-les-montagnes-des-appalaches-decapitees-par-les-marchands-de-charbon/>

57. Delga, M. D. (1969). *Mise au point sur la structure du nord-est de la berberie*. [http://books.google.ie/books?id=02UzngAACAAJ&dq=\).+Mise+au+point+sur+la+structure+du+Nord-Est+de+la+Berb%C3%A9rie&hl=&cd=1&source=gbs_api](http://books.google.ie/books?id=02UzngAACAAJ&dq=).+Mise+au+point+sur+la+structure+du+Nord-Est+de+la+Berb%C3%A9rie&hl=&cd=1&source=gbs_api)
58. Dellerio, H., & Kharim, Y. E. (2013). Rockfall hazard in an old abandoned aggregate quarry in the city of Tétouan, Morocco. *International Journal of Geosciences*, 4(08), 1228–1232. <https://doi.org/10.4236/ijg.2013.48116>
59. Delvaux, J. (2018a, February 5). Paramètres et normes.
In *BW*. <https://www.inbw.be/parametres-et-normes#bicarbonate>
60. Delvaux, J. (2018b, February 5). Paramètres et normes.
In *BW*. <https://www.inbw.be/parametres-et-normes#conductivit%C3%A9>
61. Deshmukh, R. K., Feng, J., & Bélanger, R. R. (2017). *Role of silicon in plants*. Frontiers Media SA. http://books.google.ie/books?id=9cpBDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Importance+of+Silicon+in+Soils+and+Plants+M.+Yuvaraj1*+and+P.+P.+Mahendran2&hl=&cd=1&source=gbs_api
62. Deveci, M., Gokasar, I., & Brito-Parada, P. R. (2022). A comprehensive model for socially responsible rehabilitation of mining sites using Q-rung orthopair fuzzysets and combinative distance-based assessment. *Expert Systems with Applications*, 200, 117155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117155>
63. Djeribi, D. (2012). Rapport d’audit environnementale carrière d’agrégats Bouzitoune SPA STA UPA Guelma.
64. Doctissimo. (2024, July4). Bicarbonates (HCO₃⁺): Quelle est l'eau minérale la plus riche en bicarbonate? *Doctissimo*. <https://www.doctissimo.fr/html/nutrition/dossiers/eau/article/s/13251-bicarbonate.htm>
65. Drinking water contamination in Walkerton, Ontario: Positive resolutions from a tragic event. (2003). *PubMed*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12638997/>

66. Dust / air quality | Gravel Watch Ontario. (2024). Retrieved June 5, 2024, from <https://gravelwatch.org/air-quality-health/>
67. Duque, J., Pedraza, J., DiEz, A., Sanz, M., & Carrasco, R. (1998). A geomorphological design for the rehabilitation of an abandoned sand quarry in central Spain. *Landscape and Urban Planning*, 42(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/s0169-2046\(98\)00070-x](https://doi.org/10.1016/s0169-2046(98)00070-x)
- E
68. Edwards, J., & Coit, J. C. L. (1996). Mines and quarries. *Annals of Tourism Research*, 23(2), 341–363. [https://doi.org/10.1016/0160-7383\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0160-7383(95)00067-4)
69. Ecotoxicology of Aluminium. (2002). *PJOES*. Retrieved August 21, 2024, from <https://www.pjoes.com/Ecotoxicology-of-Aluminium,87442,0,2.html>
70. Environmental regulation. (2023, November 2). Department of Energy, Mines, Industry Regulation and Safety. <http://www.dmp.wa.gov.au/Environment/Environmental-regulation-8311.aspx>
71. Exposition à l'aluminium par l'alimentation. (2022, September 7). Anses - Agence Nationale De Sécurité Sanitaire De L'alimentation, De L'environnement Et Du Travail. <https://www.anses.fr/fr/content/exposition-%C3%A0-1%E2%80%99aluminium-par-1%E2%80%99alimentation>
72. Eyankware, M. O., & Akakuru, O. C. (2022). Appraisal of groundwater contamination risk near an abandoned limestone quarry pit in Nkalagu, Nigeria, using enrichment factor and statistical approaches. *International Journal of Energy and Water Resources*, 7(4), 603–621. <https://doi.org/10.1007/s42108-022-00186-0>
73. Enrera, R. (2022, October 8). Open-Pit Mining | Method, Environmental Impact & Examples. *Study.com*. <https://study.com/academy/lesson/open-pit-mining-method-impact-issues.html>
- F
74. Faure-Muret, A., & Choubert, G. (1971). *Tectonique de l'Afrique*. l'organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la

culture. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000014891/PDF/014891mulo.pdf.multi>

75. Foughalia, A., Kessasra, F., Benabbes, D., Bollot, N., Khemissa, Z., Kebabi, B., Aliliche, L., Guerdouh, S., & Berthe, J. (2023). Environmental assessment of heavy metal contamination at Chekfa aggregate quarry (Jijel, North-East Algeria). *Environmental Quality Management*, 33(3), 477–492. <https://doi.org/10.1002/tqem.22136>
76. Forests. (2024). WWF, World Wide Fund for Nature.
77. Fraser, J., & McBride, R. A. (2000). The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation & Development*, 11(1), 1–17. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1099-145x\(200001/02\)11:1<aid-ldr352>3.0.co;2-w](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1099-145x(200001/02)11:1<aid-ldr352>3.0.co;2-w)
78. Fuller, R., Landrigan, P. J., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., Kupka, R., Lanphear, B., ... & Yan, C. (2022). Pollution and health: A progress update. *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(22)00090-0)

G

79. GardenNotes – Colorado Master Gardener.
(n.d.). <https://cmg.extension.colostate.edu/volunteer-information/cmg-gardennotes-class-handouts/>
80. Géologie de l'Algérie. (1994). Coursgeologie. Retrieved May 9, 2024, from <https://coursgeologie.com/ebooks-geology/9/geologie-de-l-agerie/>
81. Google Earth. (2021, May 19). Restoring Appalachian land and water lost to mountaintop mining. YouTube. Retrieved February 25, 2024, from https://www.youtube.com/watch?v=Hu1IBQrd_OE

82. Grinberg, N. (2022). Capital accumulation in the “lucky country”: Australia from the “sheep’s back” to the “quarry economy.” Part I: The colonial period. *Journal of Contemporary Asia*, 52(5), 696–714. <https://doi.org/10.1080/00472336.2022.2032800>
83. Guo, R. (2023, November 28). Methodological development and implementation of fast quantitative hard X-ray fluorescence multi-length-scale tomography for next-generation X-ray imaging at the NANOSCOPIUM beamline of SOLEIL synchrotron and its application to study physico-chemical processes involved in the pathologic calcifications. <https://theses.hal.science/tel-04510721/>
84. Guljahon Jaqsilikovna, J., Bayrambay Rustemovich, A., & Aysulu Baxitbay Qizi, J. (2023). Stages of open pit mining. Mining methods and their processes. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7568885>
85. Getahun, G. T., Etana, A., Munkholm, L. J., & Kirchmann, H. (2021). Liming with CaCO₃ or CaO affects aggregate stability and dissolved reactive phosphorus in a heavy clay subsoil. *Soil and Tillage Research*, 214, 105162. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105162>
86. Geravandi, S., Goudarzi, G., Mohammadi, M. J., Taghavirad, S. S., & Salmanzadeh, S. (2015a). Sulfur and nitrogen dioxide exposure and the incidence of health endpoints in Ahvaz, Iran. *Health Scope*, 4(2). <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-24318>
87. Geravandi, S., Goudarzi, G., Mohammadi, M. J., Taghavirad, S. S., & Salmanzadeh, S. (2015b). Sulfur and nitrogen dioxide exposure and the incidence of health endpoints in Ahvaz, Iran. *Health Scope*, 4(2). <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-24318>
88. Geravandi, S., Goudarzi, G., Mohammadi, M. J., Taghavirad, S. S., & Salmanzadeh, S. (2015c). Sulfur and nitrogen dioxide exposure and the incidence of health endpoints in Ahvaz, Iran. *Health Scope*, 4(2). <https://doi.org/10.17795/jhealthscope-24318>
89. Gueroui, Y., Bousbia, A., Boudalia, S., Touati, H., Benaissa, M., & Maoui, A. (2024a). Groundwater quality and hydrochemical characteristics in the upper Seybouse sub-basin, Northeast Algeria. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32716-0>

90. Gueroui, Y., Bousbia, A., Boudalia, S., Touati, H., Benaissa, M., & Maoui, A. (2024b). Groundwater quality and hydrochemical characteristics in the upper Seybouse sub-basin, Northeast Algeria. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32716-0>
91. Gravel Watch Ontario. (n.d.). <https://gravelwatch.org>
92. Granulats, sables et graviers de proximité : composants indispensables à la fabrication du béton | Groupe Vicat. (n.d.). <https://www.vicat.fr/nos-solutions/nos-expertises/granulats>
- H
93. Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 71–85. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(99)00095-1)
94. Heck, H. D., Casanova, M., & Starr, T. B. (1990). Formaldehyde toxicity—New understanding. *Critical Reviews in Toxicology*, 20(6), 397–426. <https://doi.org/10.3109/10408449009029329>
95. Hendrychová, M., Svobodova, K., & Kabrna, M. (2020). Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use. *Resources Policy*, 69, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101882>
96. Hertz-Picciotto, I., Baker, R. J., Yap, P. S., Dostál, M., Joad, J. P., Lipsett, M., Greenfield, T., Herr, C. E., Beneš, I., Shumway, R. H., Pinkerton, K. E., & Šrám, R. (2007). Early childhood lower respiratory illness and air pollution. *Environmental Health Perspectives*, 115(10), 1510–1518. <https://doi.org/10.1289/ehp.9617>
97. Holk, J., & Clergeat, R. (2019, June 13). Lélia et Sebastião Salgado ressuscitent la forêt. <https://www.parismatch.com/Actu/International/Lelia-et-Sebastiao-Salgado-ressuscitent-la-foret-1630462#8>
98. Horstmann, N., Sevilha, A. C., & Vieira, D. L. M. (2023, February 1). Graminoid-led natural regeneration of dry savannas after severe degradation. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106850>

99. *Humulus scandens* (HUMJA)[Photos] EPPO Global Database. (2024). Retrieved May 31, 2024, from <https://gd.eppo.int/taxon/HUMJA/photos>
100. Huang, Y., Shen, H., Chen, H., Wang, R., Zhang, Y., Su, S., Chen, Y., Lin, N., Zhuo, S., Zhong, Q., Wang, X., Liu, J., Li, B., Liu, W., & Tao, S. (2014). Quantification of global primary emissions of PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP from combustion and industrial process sources. *Environmental Science & Technology*, 48(23), 13834–13843. <https://doi.org/10.1021/es503696k>
101. Huo, J., & Peng, C. (2023). Depletion of natural resources and environmental quality: Prospects of energy use, energy imports, and economic growth hindrances. *Resources Policy*, 86, 104049. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104049>

J

102. Jackson, K., & Meetei, T. T. (2018, December 1). Influence of soil pH on nutrient availability: A review. <https://www.jetir.org/view?paper=JETIRDZ06090>
103. Jae Hyeon, P., Chong M. P., & Joon Wo, L. (2010). Analysis of the restoration actual conditions on the quarries. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* (한국환경복원기술학회지), 128–142.
104. Jasper, D. A. (2007). Beneficial soil microorganisms of the Jarrah forest and their recovery in bauxite mine restoration in southwestern Australia. *Restoration Ecology*, 15(s4). <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2007.00295.x>
105. Jones, L., & Handreck, K. (1967). Silica in soils, plants, and animals. In *Advances in Agronomy* (pp. 107–149). [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60734-8)

K

106. Kalin, M., Fyson, A., & Wheeler, W. N. (2006). The chemistry of conventional and alternative treatment systems for the neutralization of acid mine drainage. *Science of the Total Environment*, 366(2–3), 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.015>

107. Kim, D., Chen, Z., Zhou, L. F., & Huang, S. X. (2018). Air pollutants and early origins of respiratory diseases. *Chronic Diseases and Translational Medicine*, 4(2), 75–94. <https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2018.03.003>
108. Kimour, M. (2006). Caractérisation des discontinuités du massif en vue de l'abattage à l'explosif suivant le concept mine to mill: Cas de la carrière Socar d'Héliopolis (Guelma). <https://www.ccdz.cerist.dz/admin/notice.php?id=0000000000000557582000173>
109. Kimour, M., & Serradj, T. (2015). Characterization of geological rock mass: Case of the Socar Heliopolis – Guelma, Algeria, aggregate quarry. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.050>
110. Kittrick, J. A. (2015). Electron-diffraction techniques for mineral identification. In *Agronomy monograph/Agronomy* (pp. 653–670). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c48>
111. Koch, J. M. (2007). Alcoa's mining and restoration process in South Western Australia. *Restoration Ecology*, 15(s4). <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2007.00288.x>
112. König, L. A., Medina-Vega, J. A., Longo, R. M., Zuidema, P. A., & Jakovac, C. C. (2022). Restoration success in former Amazonian mines is driven by soil amendment and forest proximity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 378(1867). <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0086>
113. Kouahla, C. (2012). Audit environnementale de la carrière Bouzitoune Héliopolis Guelma. Direction de l'environnement.
114. Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>

L

115. Lahondère, J. C., Feinberg, H., & Haq, B. U. (1979). Datation des grès numidiens d'Algérie orientale. *C.I. Acad. Sciences Paris*, 289, 383–386.
116. Lahondère, J. C. (1987). Les séries ultra telliennes d'Algérie nord orient.
117. Le rôle du silicium dans l'agriculture. Partie 1. (2023, November 9). *Biostimulant.com*. <https://www.biostimulant.com/fr/the-role-of-silicon-in-agriculture-part-1-plant-uptake-products-and-applications/>
118. Legislation, regulations and guidelines | Australia Minerals. (2023). Retrieved May 31, 2024, from <https://www.dccew.gov.au/environment/epbc>
119. Langer, W. H., & Arbogast, B. F. (2002). Environmental impacts of mining natural aggregate. In *Deposit and geoenvironmental models for resource exploitation and environmental security* (pp. 151–169). https://doi.org/10.1007/978-94-010-0303-2_8
120. Lghoul, M., Kchikach, A., Hakkou, R., Zouhri, L., Guerin, R., Bendjoudi, H., Teíxido, T., Penã, J. A., Enriquè, L., Jaffal, M., & Hanich, L. (2012). Etude géophysique et hydrogéologique du site minier abandonné de Kettara (région de Marrakech, Maroc): Contribution au projet de réhabilitation. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 370–381. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.637495>
121. Li, M. (2006). Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the Total Environment*, 357(1–3), 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.003>
122. Li, X., Wu, S., Wang, F., You, L., Yang, C., Cui, P., & Zhang, X. (2023, March 10). Quantitative assessments of GHG and VOCs emissions of asphalt pavement contained steel slag. <https://trid.trb.org/view/2116029>
123. Lima, A. T., Mitchell, K., O'Connell, D. W., Verhoeven, J., & Van Cappellen, P. (2016). The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. *Environmental Science & Policy*, 66, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.07.011>

124. Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. S., Saldiva, P. H., Lavigne, E., Matus, P., Ortega, N. V., Garcia, S. O., Pascal, M., Stafoggia, M., Scortichini, M., Hashizume, M., Honda, Y., Hurtado-Díaz, M., Cruz, J., ... Kan, H. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine*, 381(8), 705–715. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1817364>

125. Longo, R. M., Ribeiro, A. R., & Melo, W. J. D. (2005). Caracterização física e química de áreas mineradas pela extração de cassiterita. *Bragantia*, 64(1), 101–107. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052005000100011>

M

126. MEB-EDX Microscopie Electronique à Balayage couplée à une sonde EDX. (2023, October 30). *EMTT*. <https://emtt.fr/meb-edx-microscopie-electronique/M>

127. M. Yuvaraj, & R. Gangothri. (2017). A review of silicon in soils and plants. *Trends in Biosciences*, ISSN 0974-8431. https://www.researchgate.net/publication/330925734_A_Review_of_Silicon_in_Soils_and_Plants

128. Maizi, M. (2021, July 1). Le tourisme thermal à Guelma: Un potentiel à faire valoir cas de Hammam Debagh. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/11585>

129. Majer, J. D., Dunn, A., & Orsini, J. P. (2014). Computer modelling as an aid to forest and woodland restoration. *Open Journal of Forestry*, 4(2), 112–123. <https://doi.org/10.4236/ojf.2014.42017>

130. Mansouri, M., & Sabri, M. (2020). Réalité et perspectives du développement durable en Algérie - Étude analytique à l'aide d'indicateurs statistiques. Retrieved August 27, 2024, from <http://dspace.univ-skikda.dz:4000/items/a0924122-5a07-4414-aa35-455adc3e4376>

131. Mashau, N. S., & Mhlongo, E. (2020). An investigation of factors contributing to occupational accidents among mineworkers in the dimension stone quarry mine of

the Mutoko Rural District Council,

Zimbabwe. <https://univendspace.univen.ac.za/handle/11602/1560>

132. Mathieu, C., & Pieltain, F. (2003). *Analyse chimique des sols*. [http://books.google.ie/books?id=cDmzAAAACAAJ&dq=Mathieu,+C.+and+Pieltain,+F.+\(2009\)+Analyse+chimique+des+sols:+Méthode+choisies,+édition+tec.&hl=&cd=1&source=gs_api](http://books.google.ie/books?id=cDmzAAAACAAJ&dq=Mathieu,+C.+and+Pieltain,+F.+(2009)+Analyse+chimique+des+sols:+Méthode+choisies,+édition+tec.&hl=&cd=1&source=gs_api)
133. McKenna, P. B., Lechner, A. M., Phinn, S., & Erskine, P. D. (2020). Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: A global systematic review. *Remote Sensing*, 12(21), 3535. <https://doi.org/10.3390/rs12213535>
134. Mebarka, M. F. Z. M. (2016, June 1). Caractérisation hydrogéologique et géophysique de la région Héliopolis-El Fedjoudj-Hammam Oulad Ali. <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/1290>
135. Mehmood, M., Yaseen, M., Ullah Khan, E., & Khan, M. J. (2018). Dolomite and dolomitization model - A short review. *International Journal of Hydrology*, 2(5). <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00124>
136. Meur, P. Y. L. (2016). Les ressources minérales profondes en Polynésie française.
137. meteoblue. (n.d.). *Weather Guelma – 7-day forecast* [Web page]. Retrieved October 13, 2025, from [https://www.meteoblue.com/en/weather/week/guelma_algeria_2495662]
138. Miller, A., & Zégre, N. (2014). Mountaintop removal mining and catchment hydrology. *Water*, 6(3), 472–499. <https://doi.org/10.3390/w6030472>
139. Mokobi, F. (2024, May 25). Scanning electron microscope (SEM): Principle, parts, uses - Microbe Notes. *Microbe Notes*. <https://microbenotes.com/scanning-electron-microscope-sem/#scanning-electron-microscope-sem-definition>
140. Moussa, B. (2007). Contribution de la géophysique à l'étude hydrogéologique de la zone mercurielle Nord Numidique (Azzaba) – Détermination du degré de pollution. Retrieved March 18, 2024, from <https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/06/BENHAMZA-Moussa.pdf>

141. Mukhopadhyay, S., & Maiti, S. K. (2018). Techniques for quantitative evaluation of mine site reclamation success. In *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation* (pp. 415–438). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812986-9.00023-3>
142. Mukhopadhyay, S., Masto, R., Yadav, A., George, J., Ram, L., & Shukla, S. (2016). Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. *Science of the Total Environment*, 542, 540–550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.035>
143. Mummey, D. L., Stahl, P. D., & Buyer, J. S. (2002). Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: Spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11), 1717–1725. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(02\)00158-x](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(02)00158-x)
144. Münzel, T., Hahad, O., Daiber, A., & Landrigan, P. J. (2022). Soil and water pollution and human health: What should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, 119(2), 440–449. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvac082>
145. Mutio, J. M., Kebeney, S., Njoroge, R., Churu, H., Ng’etich, W., Mugaa, D., Alkamoi, B., & Wamalwa, F. (2023). Effect of land rehabilitation measures on soil organic carbon fractions in semi-arid environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1095865>
- N
146. Normales et records climatologiques à Guelma - Infoclimat. (2023). Retrieved June 5, 2024, from <https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/2021-2023/guelma/valeurs/60403.html>
147. Normes de l’OMS sur l’eau potable. (2006). Retrieved August 12, 2024, from <https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>
148. Normes de l’OMS sur l’eau potable. (2016). Retrieved August 16, 2024, from <https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>

149. Normes-eau potable-UE-OMS. (n.d.). Retrieved August 20, 2024, from <https://www.lenntech.fr/francais/norme-eau-potable-oms-ue.htm#ixzz3KjoIKpec>
150. Negm, A. M., Bouderbala, A., Chenchouni, H., & Barceló, D. (2020). *Water resources in Algeria - Part II*. Springer Nature. http://books.google.ie/books?id=Uo_DwAAQBAJ&pg=PA79&dq=https://doi.org/10.1007/698_2020_533&hl=&cd=1&source=gbs_api
151. NIOSH, N. I. F. O. S. a. H. (2005). Barium and barium compounds. In www.atsdr.cdc.gov. Retrieved August 24, 2024, from <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp24-c6.pdf>
152. Norman, M. A., Koch, J. M., Grant, C. D., Morald, T. K., & Ward, S. C. (2006). Vegetation succession after bauxite mining in Western Australia. *Restoration Ecology*, 14(2), 278–288. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2006.00130.x>
153. Novák, J., & Prach, K. (2010). Artificial sowing of endangered dry grassland species into disused basalt quarries. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205(3), 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2009.03.003>
- O
154. Office national de la géologie. Algérie (07-1985) - Organisation. Ressources de la Bibliothèque nationale de France. (n.d.). Retrieved August 20, 2024, from https://data.bnf.fr/fr/12218009/office_national_de_la_geologie_algerie/
155. Okamoto, G., Okura, T., & Goto, K. (1957). Properties of silica in water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 12(1–2), 123–132. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(57\)90023-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(57)90023-6)
156. Omar, O., & Al-Sarrag, N. (2020). Impact of contaminated interior finishing materials on the educational buildings. *BAU Journal - Creative Sustainable Development*, 1(1). <https://doi.org/10.54729/2789-8334.1002>
157. Opondo, E. O., Ajayi, D. D., & Makindi, S. M. (2022). Impacts of quarrying activities on the environment and livelihood of people in Border II sub-location,

Nyando sub-county, Kisumu County, Kenya. *Environmental Quality Management*, 32(3), 147–160. <https://doi.org/10.1002/tqem.21881>

158. Ouellet, M. (1995). *Possibilité de réhabilitation de la carrière Goyer par l'aménagement d'un lac artificiel*. Retrieved from http://books.google.ie/books?id=D8wKzQEACAAJ&dq=Possibilit%C3%A9+de+r%C3%A9habilitation+de+la+carri%C3%A8re+Goyer+par+l%27am%C3%A9nagement+d%27un+lac+artificiel.&hl=&cd=1&source=gbs_api
- P
159. Peša, I., & Ross, C. (2021). Extractive industries and the environment: Production, pollution, and protest in global history. *The Extractive Industries and Society*, 8(4), 100933. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100933>
160. Pinto, V., Font, X., Salgot, M., Tapias, J., & Mañá, T. (2001a). Image analysis applied to quantitative evaluation of chromatic impact generated by open-pit quarries and mines. *Environmental Geology*, 41(5), 495–503. <https://doi.org/10.1007/s002540100259>
161. Pinto, V., Font, X., Salgot, M., Tapias, J., & Mañá, T. (2001b). Image analysis applied to quantitative evaluation of chromatic impact generated by open-pit quarries and mines. *Environmental Geology*, 41(5), 495–503. <https://doi.org/10.1007/s002540100259>
162. Pla, L. (n.d.). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. Retrieved August 27, 2024, from http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442006000800008&script=sci_arttext
163. Pomelo. (2022a, November 8). What is the typical water conductivity range? *Atlas Scientific*. <https://atlas-scientific.com/blog/water-conductivity-range/#:~:text=As%20conductivity%20ranges%20determine%20how,lower%20conductance%20ranges%20are%20preferred>
164. Pomelo. (2022b, November 8). What is the typical water conductivity range? *Atlas Scientific*. <https://atlas-scientific.com/blog/water-conductivity->

[range/#:~:text=As%20conductivity%20ranges%20determine%20how,lower%20conductance%20ranges%20are%20preferred](#)

165. Port, C. M. (2013, September 27). The opportunities and challenges of aggregate site rehabilitation in Southern Ontario: An evaluation of the rehabilitation process from 1992-2011. <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/7966>
166. Prévisions météo pour Guelma. (2024). Retrieved May 14, 2024, from <https://fr.weather-forecast.com/locations/Guelma/forecasts/latest>
167. Privé, M. (2021, January 8). Au Brésil, le photographe Sebastião Salgado et sa femme ont replanté 600 hectares de forêt tropicale. *Geo.fr*. <https://www.geo.fr/animaux/au-bresil-le-photographe-sebastiao-salgado-et-sa-femme-ont-replante-600-hectares-de-foret-tropicale-195457>

Q

168. Queensland, C. O. S. O. (2013, September 24). Soil pH. *Environment, Land and Water / Queensland Government*. <https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/soil-properties/ph-levels>

R

169. Rawat, N., & Kumar, P. (2023). Interventions for improving indoor and outdoor air quality in and around schools. *Science of the Total Environment*, 858, 159813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159813>
170. Razakamanantsoa, A. (2021, January 1). Recommandations pour la gestion des émissions de poussières et de l'usage de l'eau lors de la circulation sur pistes non revêtues. <https://hal.science/hal-03555657>
171. Rehabilitation de la carrière de Creys-Mépieu. (2019, August 26). *Nature Isère*. <https://www.nature-isere.fr/temoignage/rehabilitation-de-la-carriere-de-creys-mepieu>
172. REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES RPA 99 / version 2003. (2003).

173. Report on coal mine bonding in Central Appalachia. (2018). The Alliance for Appalachia. Retrieved May 31, 2024, from <https://theallianceforappalachia.org/report-coal-mining-bonding-central-appalachia/>
174. Restoration, S. F. E., Clewell, A., Aronson, J., & Winterhalder, K. (2004, October 2). Society for Ecological Restoration (SER). Society for Ecological Restoration. Retrieved February 24, 2024, from <https://www.ser.org/default.aspx>
175. Rice, C. W., Pires, C. B., Lin, J., & Sarto, M. V. M. (2021). Soil organic carbon assessment methods. In *Soil Health Series* (pp. 38–51). <https://doi.org/10.1002/9780891189831.ch3>
176. Rivas, I., Vicens, L., Basagaña, X., Tobías, A., Katsouyanni, K., Walton, H., Hüglin, C., Alastuey, A., Kulmala, M., Harrison, R. M., Pekkanen, J., Querol, X., Sunyer, J., & Kelly, F. J. (2021). Associations between sources of particle number and mortality in four European cities. *Environment International*, *155*, 106662. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106662>
177. Rodrigue, J. A., & Burger, J. A. (2004). Forest soil productivity of mined land in the Midwestern and Eastern coalfield regions. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(3), 833–844. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.8330>
178. Rout, G. R., Samantaray, S., & Das, P. (2001). Aluminium toxicity in plants: A review. *Agronomie*, *21*(1), 3–21. <https://doi.org/10.1051/agro:2001105>
- S
179. Salinity and drinking water | SA Health. (2022, April 2). Retrieved from <https://www.sahealth.sa.gov.au/wps/wcm/connect/public+content/sa+health+internet/public+health/water+quality/salinity+and+drinking+water#:~:text=World%20Health%20Organization&text=%E2%80%9CThe%20palatability%20of%20water%20with,about%201000%20mg%2FL.%E2%80%9D>
180. Salvator, M. I., Sontrop, J. M., Garg, A. X., Moist, L. M., Suri, R. S., & Clark, W. F. (2009). Factors that led to the Walkerton tragedy. *Kidney International*, *75*, S33–S34. <https://doi.org/10.1038/ki.2008.616>
181. Sánchez Donoso, R., Martins, M., Tejedor Palomino, M., Esbrí Víctor, J. M., Lillo Ramos, F. J., Pereira, A. M., Pinto, L. M., Relvas, J. M., & Martín Duque, J. F.

- (2023a). Geomorphic-based mine rehabilitation coupled with AMD chemical stabilisation in sulphide-rich ore deposits and soils: Insights from a pioneering intervention at the Lousal mine, Iberian pyrite Belt. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(1), 79–
97. <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2247698>
182. Sánchez Donoso, R., Martins, M., Tejedor Palomino, M., Esbrí Víctor, J. M., Lillo Ramos, F. J., Pereira, A. M., Pinto, L. M., Relvas, J. M., & Martín Duque, J. F. (2023b). Geomorphic-based mine rehabilitation coupled with AMD chemical stabilisation in sulphide-rich ore deposits and soils: Insights from a pioneering intervention at the Lousal mine, Iberian pyrite Belt. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(1), 79–
97. <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2247698>
183. Santé Canada. (2015). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Document technique – Le pH. In *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada*. Santé Canada. <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/publications/healthy-living/guidelines-canadian-drinking-water-quality-guideline-technical-document-ph-fra.pdf>
184. Save, M. F. W. O. T. W. D. S. P. F. J. T. S. H. N. L. W. W. T. (2019). What can electrical conductivity tell us about our soil? *Trace and Save*. Retrieved August 19, 2024, from <http://traceandsave.com/what-can-electrical-conductivity-tell-us-about-our-soil/>
185. Schnitzer, S. (2002). The ecology of lianas and their role in forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(5), 223–230. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(02\)02491-6](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(02)02491-6)
186. Schroeder, E. D. (2003). Water Resources. In *Elsevier eBooks* (pp. 721–751). <https://doi.org/10.1016/b0-12-227410-5/00821-8>
187. Shaw, B. H., Mechenich, C., & Klessig, L. (2002). Understanding lake data. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/265738967_Understanding_lake_data
188. Silva, D., & Nunes, S. (2017). Evaluation and economic modeling of forest restoration in the State of Pará, eastern Brazilian Amazon.

189. Silva, R., De Brito, J., & Dhir, R. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117629. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>
190. Singh, A. N., & Kumar, A. (2022). Ecological performances of exotic and native woody species on coal mine spoil in Indian dry tropical region. *Ecological Engineering*, 174, 106470. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106470>
191. Sobczyk, W. (2014). Negative and positive effects of the exploitation of gravel-sand. Retrieved from https://www.academia.edu/93226326/Negative_and_Positive_Effects_of_the_Exploitation_of_Gravel_Sand
192. Soheili, F., Woodward, S., Abdul-Hamid, H., & Naji, H. R. (2023). The effect of dust deposition on the morphology and physiology of tree foliage. *Water, Air and Soil Pollution*, 234(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06349-x>
193. Sreekala, S., Geena, P., & Jyothi, S. N. (2023). Environmental impact assessment of a quarry in a Taluk of Southern Kerala, India. *Physical Mesomechanics of Condensed Matter: Physical Principles of Multiscale Structure Formation and the Mechanisms of Nonlinear Behavior: MESO2022*. <https://doi.org/10.1063/5.0170284>
194. Stoessel, J., & Blanc, M. (2021, December 20). L'économie sociale et solidaire comme pilier du développement durable: une perspective transactionnelle. Retrieved from <https://hal.science/hal-03692677/>
195. Svobodova, K., Yellishetty, M., & Vojar, J. (2019). Coal mining in Australia: Understanding stakeholder knowledge of mining and mine rehabilitation. *Energy Policy*, 126, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.042>
196. Sylvestre, A. (2016, July 19). Caractérisation de l'aérosol industriel et quantification de sa contribution aux PM 2.5 atmosphériques. Retrieved from <https://theses.hal.sc>

T

197. Talento, K., Amado, M., & Kullberg, J. C. (2020). Quarries: From abandoned to renewed places. *Land*, 9(5), 136. <https://doi.org/10.3390/land9050136>
198. Tarannum, N., Rathore, N., Natwadiya, A., Kumar, S., & Chaudhary, N. (2024). Evaluation of the effects of dust pollution on specific plant species near and around the marble mining site in Rajasthan, India. *Environmental Science and Pollution Research International*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33449-w>
199. Tetteh, E., Ampofo, K., & Logah, V. (2015). Adopted practices for mined land reclamation in Ghana: A case study of AngloGold Ashanti Iduapriem mine ltd. *Journal of Science and Technology (Ghana)*, 35(2), 77. <https://doi.org/10.4314/just.v35i2.8>
200. Torbert, J. L., Tuladhar, A. R., Burger, J. A., & Bell, J. C. (1988). Minesoil property effects on the height of ten-year-old white pine. *Journal of Environmental Quality*, 17(2), 189–192. <https://doi.org/10.2134/jeq1988.00472425001700020004x>
201. Troch, K. (2018, February 2). Ne pas grever l'avenir au bénéfice du présent: Une histoire environnementale de l'extraction du charbon de la fin du 18e siècle à l'Entre-deux-guerres: Un développement non soutenable: L'exemple du Couchant de Mons et du Valenciennois. Retrieved from <https://theses.hal.science/tel-02918115/>
202. Tyo, S., & Zeitinova, S. (2023). Optimizing the contours of open pit mining with the use of mining and geological information systems and technologies. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 327(4), 50–56. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.39>
- V
203. Vila, J. M., Busnardo, R., Devries, A., Magne, J., & Sigal, J. (1968). Données stratigraphiques sur la série renversée et charriée du Djebel Bou Sba et étude de son cadre structural (région de Guelma, Constantinois, Algérie). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(2), 206–212.
204. Vila, J. M. (1971). Paléogéographie et tectonique des unités allochtones du type tellien et de type flysch à micro brèches dans le Nord-Est (Algérie). *C.R. Acad. Sc. (D)*, 272, 1047–1050.

205. Vila, J. M (1966). Sur la présence d'un flysch allochtone tithonique et néocomien dans la région située entre Bône et Guelma (Est de la chaîne numidique, Algérie). Retrieved from <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=19265006>
206. Vila, J. M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Université Pierre Et Marie Curie, Paris, France.
- W
207. Wang, X., Zhao, Y., Liu, H., Xiao, W., & Chen, S. (2020). Evaluating the water holding capacity of multilayer soil profiles using Hydrus-1D and multi-criteria decision analysis. *Water*, 12(3), 773. <https://doi.org/10.3390/w12030773>
208. Wang, Z. Q., Wu, L. H., Animesh, S., & Zhu, Y. H. (2009). Phytoremediation of rocky slope surfaces: Selection and growth of pioneer climbing plants. *Pedosphere*, 19(4), 541–544. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(09\)60147-8](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(09)60147-8)
209. What are the WHO air quality guidelines? (2021, September 22). Retrieved from <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>
210. Whittig, L. D., & Allardice, W. R. (2018). X-ray diffraction techniques. In *Soil Science Society of America book series* (pp. 331–362). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c12>
211. Wigenstam, E., Elfsmark, L., Bucht, A., & Jonasson, S. (2016). Inhaled sulfur dioxide causes pulmonary and systemic inflammation leading to fibrotic respiratory disease in a rat model of chemical-induced lung injury. *Toxicology*, 368–369, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2016.08.018>
212. Wiggershaus, B., Franke, E., & Vogt, C. (2024). Total reflection X-ray fluorescence analysis of trace elements in highly saline samples. *X-ray Spectrometry*, 53(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/xrs.3448>

213. Wisniewski, H. M., & Wen, G. Y. (2007). Aluminium and Alzheimer's disease. *Novartis Foundation Symposium*, 42, 142–164. <https://doi.org/10.1002/9780470514306.ch9>
214. Wildi, W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): Structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 24(3), 201–297.
- Z
215. Zhan, N., Huang, Y., Rao, Z., & Zhao, X. L. (2016). Fast detection of carbonate and bicarbonate in groundwater and lake water by coupled ion selective electrode. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 44(3), 355–360. [https://doi.org/10.1016/s1872-2040\(16\)60913-1](https://doi.org/10.1016/s1872-2040(16)60913-1)
216. Zohir, M. (2018). Comportement du laitier de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar sur le mélange clinker: Cas ERCE Hadjar-Soud, Skikda. Retrieved from <https://dspace.univ-annaba.dz/items/f9d7fe65-106f-4ad2-a686-8f8cd5c488bf>
217. Zouak, Z., Benabbas, C., & Benzid, Y. (2014). Néotectonique, anomalies morphostructurales et mouvements de terrain dans la région de Guelma. *Sciences & Technologie*, 73–81. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/3828>