

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD – TLEMCEN

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers



Laboratoire de recherche N°25

KNAUF Plâtres

**PROMOTION DES RESSOURCES HYDRIQUES, PEDOLOGIQUES ET
MINIERES LEGISLATION ET CHOIX TECHNOLOGIQUE**

MEMOIRE

Présenté Par

SI BOUAZZA Maïssa

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

Géologie des bassins sédimentaires

Thème

**La remise en état des lieux : analyse du cadre législatif et
exigences environnementales – Cas de la carrière de Fleurus
(Wilaya d'Oran)**

Soutenu le 30 Juin 2026, devant le jury :

KACEMI Ali	MCB	Président	Université Tlemcen
ADACI Mohamed	Professeur	Examineur	Université Tlemcen
BOUCIF Abdelkader	MAA	Encadreur	Université Tlemcen
MEDDANE Sofiane	Entreprise Knauf Oran	Co-encadreur	Développeur des carrières
CHAIB Idir	Entreprise Knauf Oran	Invité d'honneur	Responsable HSE

Année universitaire : 2025-2026

Dédicaces

Je dédie ce travail
A ma chère mère,
Source d'amour et de prières,
Qui a été mon soutien à chaque étape.

À mon cher père,
Symbole de générosité et de sacrifice,
Merci pour ton soutien constant et ta confiance.

À mon frère Abdelali,
Pour sa présence et son aide tout au long de mon parcours.

À mes amies chères :
Halima, Fatima, Khouloud,
Qui ont partagé avec moi ce chemin,
Et dont la présence a allégé les difficultés et donné du courage.

À mes enseignants,
Pour leur savoir, leurs conseils et leur accompagnement précieux.

Et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin,
A la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail avec gratitude, espérant qu'il reflète tous mes efforts.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens ensuite à me remercier moi-même pour ma persévérance, ma détermination et les efforts fournis tout au long de ce parcours.

Le travail présenté doit beaucoup aux orientations et aux conseils de mon encadreur, Monsieur **BOUCIF Abdelkader**, qui m'a accompagnée avec sérieux et bienveillance durant toute la période de réalisation. Je le remercie sincèrement pour sa disponibilité, sa patience et la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens à remercier Monsieur **KACEMI Ali** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. C'est une personne que je respecte beaucoup, et je n'oublierai jamais sa gentillesse et sa sympathie. Je serai très heureuse de vous voir le jour de ma soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur **ADACI Mohammed** d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je lui exprime ma sincère gratitude pour l'intérêt qu'il porte à cette étude ainsi que pour les remarques et suggestions qu'il pourra apporter afin d'en améliorer la qualité.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon Co-encadreur, Monsieur **MEDDANE Sofiane** responsable des carrières de Knauf Oran, de nous avoir facilité l'accès à l'entreprise, pour son accompagnement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de cette expérience.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur **CHAIB Idir** pour les précieuses explications données, la documentation offertes et l'accompagnement sur terrain et sans oublier de remercier Madame **BENOUIS Souad** pour son aide précieuse, sa disponibilité et son accueil chaleureux.

Un grand merci à notre professeur **BENALAH Mustapha** pour sa précieuse contribution à notre formation, ainsi qu'à Monsieur **HEBIB Hakim** pour son aide et son accompagnement tout au long de nos travaux au laboratoire.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble du personnel de **la société Knauf Oran** pour leur collaboration, leur professionnalisme et les conditions favorables qu'ils m'ont offertes durant la réalisation de ce travail.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **HAMOUDA**, Ingénieur au laboratoire N°25, pour son aide, sa disponibilité et les conseils qu'il m'a apportés tout au long de la réalisation de ce travail.

Je souhaite également remercier l'ensemble de mes enseignants du département, pour leur savoir, leurs conseils et leur soutien tout au long de ma formation.

الملخص

يقع محجر فلوروس بولاية وهران ضمن هضبة بوفاتيس التابعة لحوض الشلف السفلي، الذي يُعدّ من أهم الأحواض الرسوبية في شمال غرب الجزائر. ويُستغل هذا المحجر من طرف شركة كناوف الجزائر لاستخراج الجبس ذي العمر الميسيني، والذي يُمثل المادة الأولية الأساسية في صناعة الجبس ومشتقاته المختلفة.

حيث يؤدي استغلال هذا المكنن إلى مجموعة من التأثيرات البيئية التي تنعكس بشكل مباشر على مختلف مكونات الوسط الطبيعي، من خلال تغيير المظهر الطبوغرافي للموقع، وإزالة الغطاء الترابي والغطاء النباتي، والتأثير على التربة والموارد المائية، فضلاً عن انبعاث الغبار والغازات والضجيج الناتجة عن مختلف أنشطة الاستغلال. وتكتسب هذه التأثيرات أهمية متزايدة بالنظر إلى طابعها التراكمي واستمراريتها على المدى الطويل، وما ينجم عنها من اختلال في توازن النظم البيئية المحلية وتدهور تدريجي لخصائص الوسط الطبيعي.

أمام هذا الوضع، تصبح إعادة تأهيل المحاجر ضرورة بيئية ومسؤولية أخلاقية قبل أن تكون التزاماً قانونياً، باعتبارها أداة أساسية للحد من آثار التدهور وإعادة إدماج المواقع المستغلة ضمن محيطها الطبيعي. وفي هذا الإطار، تناولت هذه الدراسة تحليل الإطار التشريعي والتنظيمي المنظم لعمليات إعادة التأهيل في الجزائر، مع تقييم المتطلبات البيئية المرتبطة بها من خلال دراسة حالة محجر فلوروس بولاية وهران. كما سمحت النتائج المتوصل إليها بإبراز مجموعة من الإجراءات والتدابير القابلة للتطبيق، الكفيلة باستعادة التوازن البيئي للموقع، وتحقيق استغلال منجمي أكثر انسجاماً مع مبادئ التنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية:

محجر فلوروس، هضبة بوفاتيس، حوض الشلف السفلي، الجبس الميسيني، شركة كناوف الجزائر، الاستغلال المنجمي، التأثيرات البيئية، إعادة تأهيل المحاجر، الإطار التشريعي والتنظيمي.

Résumé

La carrière de Fleurus, située dans la wilaya d'Oran, est implantée sur le plateau de Boufatis, appartenant au bassin du Bas Chélif, l'un des plus importants bassins sédimentaires néogènes de l'Algérie nord-occidentale. Cette carrière est exploitée par l'entreprise Knauf Algérie pour l'extraction du gypse d'âge messinien, qui constitue la matière première essentielle à la fabrication du plâtre et de ses dérivés.

L'exploitation de ce gisement génère un ensemble d'impacts environnementaux affectant directement les différentes composantes du milieu naturel, notamment par l'altération du paysage naturel, le décapage du couvert pédologique et végétal, ainsi que la dégradation des sols et des ressources en eau. À cela s'ajoutent les émissions de poussières, de gaz et les nuisances sonores générées par les différentes activités d'exploitation. Ces impacts se caractérisent par leur effet cumulatif et leur persistance dans le temps, entraînant un déséquilibre des écosystèmes locaux ainsi qu'une dégradation progressive du milieu naturel.

Dans ce contexte, la remise en état des carrières s'impose comme une nécessité environnementale et une responsabilité morale avant d'être une obligation juridique, en tant qu'outil essentiel de limitation des dégradations et de réintégration des sites exploités dans leur environnement naturel. Cette étude a porté sur l'analyse du cadre législatif et réglementaire régissant les opérations de réhabilitation en Algérie, ainsi que sur l'évaluation des exigences environnementales associées, à travers le cas de la carrière de Fleurus. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence un ensemble de mesures et de recommandations visant la restauration de l'équilibre écologique du site et la promotion d'une exploitation minière plus respectueuse de l'environnement.

Mots-clés:

Carrière de Fleurus, plateau de Boufatis, bassin du Bas Chélif, gypse messinien, knauf Algérie, exploitation minière, impacts environnementaux, Remise en état des carrières, cadre législatif.

Abstract

The Fleurus quarry, located in the Oran province, is situated on the Boufatis plateau, which belongs to the Lower Chelif Basin, one of the most important sedimentary basins in northwestern Algeria. It is operated by Knauf Algeria for the extraction of Messinian-age gypsum, which represents the main raw material used in the production of plaster and its various derivatives.

The exploitation of this deposit generates a range of environmental impacts that directly affect the different components of the natural environment, notably through the alteration of the natural landscape, the stripping of soil and vegetation cover, as well as the degradation of soils and water resources. In addition, dust, gas emissions, and noise generated by the various extraction activities further contribute to environmental disturbance. These impacts are characterized by their cumulative effect and long-term persistence, leading to an imbalance in local ecosystems and a progressive degradation of the natural environment.

In this context, the rehabilitation of quarries is considered an environmental necessity and a moral responsibility before being a legal obligation, as it represents a key tool for mitigating environmental degradation and reintegrating exploited sites into their natural surroundings. This study focused on the analysis of the legislative and regulatory framework governing rehabilitation operations in Algeria, as well as the assessment of the associated environmental requirements, through the case study of the Fleurus quarry. The results obtained highlight a set of measures and recommendations aimed at restoring the ecological balance of the site and promoting more environmentally responsible mining practices.

Keywords:

Fleurus quarry, Boufatis plateau, Lower Chelif Basin, Messinian gypsum, Knauf Algeria, mining exploitation, environmental impacts, quarry rehabilitation, legislative framework.

Table des matières

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

الملخص	1
Résumé	2
Abstract	3
Table des matières	4
INTRODUCTION GENERALE	8

CHAPITRE I : Généralités

I. INTRODUCTION	11
II. CADRE GEOGRAPHIQUE	11
1. A l'échelle régionale	11
2. Secteur d'étude	13
III. CADRE GEOLOGIQUE	14
1. Contexte général.....	14
1.1. Sur le plan structural.....	14
1.2. Sur le plan lithostratigraphique	15
1.2.1. Miocène inférieur	15
1.2.2. Miocène supérieur	15
1.2.3. Pliocène	16
1.2.4. Quaternaire	16
2. Géologie du secteur d'étude	18
IV. APERÇU CLIMATIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	19
1. Le climat.....	19
1.1. Pluviométrie	19
1.2. Température.....	20
1.3. Humidité et Vents.....	20
2. Contexte hydrologique	21
2.1. Réseau hydrographique	21
V. APERÇU MINIER	22
VI. HISTORIQUE DES TRAVAUX.....	23
VII. BUT ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	26
1. But du Travail.....	26
2. Méthodologie.....	26
2.1. Sur terrain.....	26
2.2. Outils et moyen de Travail	26

CHAPITRE II : Extraction du gypse et environnement

I. INTRODUCTION	28
II. ETAPE D'EXTRACTION DU GYPSE.....	28
1. Phase préparatoire	28

1.1. Le décapage ou travaux de découverte	28
2. Phase d'exploitation	29
2.2.1. La foration.....	30
2.2.3. Le tir de mine	32
2.2.4. Types d'explosifs	33
3. Le chargement	34
4. Le transport.....	34
5. Le concassage.....	35
III. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAL D'EXTRACTION DE LA ROCHE.....	36
1. Impact sur le sol	36
2. Impact sur les eaux	37
2.1. Pollution mécanique (physique).....	38
2.2. Pollution chimique	38
3. Impact Sur l'air.....	39
3.1. Émissions de poussières	39
3.1.1. Poussières liées à l'extraction	39
3.1.2. Poussières liées au chargement et au transport	39
3.1.3. Poussières liées au traitement (concassage).....	39
3.2. Émissions gazeuses	41
4. Impact sur la flore et la faune	41
5. Impact sur Paysage	42
6. Nuisances sonores	43
7. Vibrations	44
8. Impact sur la santé et sécurité.....	45
8.1. Mesures de sécurité lors du tir de mine	45
8.2. Santé et prévention	46
IV. GESTION DES REJETS MINIERES	46
1. Classification des rejets dans la carrière de Fleurus :.....	46
1.1. Les stériles francs de découverte :	47
1.2. Résidus d'exploitation :	47
1.3. Résidus de traitement :	47
2. Cadre réglementaire de la gestion des déchets miniers	47

CHAPITRE III : Remise en état des lieux

I. INTRODUCTION :	50
II. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL DE LA REMISE EN ETAT DES SITES MINIERES.....	50

1. Cadre législatif de la remise en état	50
2. Rôle de l'ANAM dans la remise en état	51
3. Compte séquestre	51
III. TYPES DE REMISE EN ETAT	51
1. Remise en état finale (après fermeture)	51
2. Remise en état continue (simultané)	52
3. La remise en état progressive.....	52
IV. LES ETAPES DE LA REMISE EN ETAT DE LA CARRIERE DE FLEURUS.....	52
1. Planification de la remise en état	52
2. Travaux de terrassement	55
2.1. Talutage des gradins du front de taille.....	55
2.2. Remblayage	56
2.3. Nivellement.....	57
2.4. Apport et préparation de la terre végétale.....	57
2.4.1. Préparation mécanique du support (sous-solage).....	57
2.4.2. Epannage de la terre végétale	58
2.4.3. Amélioration et fertilisation du sol.....	58
3. Revégétalisation.....	58
3.1. Etat initial du site (avant exploitation).....	59
3.2. Choix des espèces végétale.....	61
3.2.1. Productoin des espèces végétales en pépinière	62
3.2.2. Transplantation des espèces végétale locales	66
3.3. Mise en place du couvert végétal.....	68
4. Reverdissement du site	69
V. Remise en état et évolution de la carrière de Fleurus	69
1. Analyse diachronique de la carrière de Fleurus à partir des images satellitaires (Google Earth)	69
2. Simulation de la remise en état future de la carrière de Fleurus à l'aide de l'intelligence artificielle	72
VI. Exemple d'une réussite de la remise en état du site de Menatsia	74
CONCLUSION GENERALE	77
Liste des figures et des tableaux.....	80
Références bibliographiques	84

INTRODUCTION GENERALE

Il est bien connu que les carrières à ciel ouvert constituent l'une des principales méthodes d'extraction des matières premières, permettant d'accéder aux gisements et de les exploiter de manière économiquement rentable afin de répondre aux besoins des différents secteurs industriels et du développement urbain. Cependant, ces exploitations minières, en raison de leur grande superficie et des importantes quantités de déchets miniers qu'elles génèrent, engendrent généralement des impacts environnementaux plus marqués que ceux des mines souterraines. Ces impacts se traduisent par des modifications du relief, la suppression du couvert végétal, la dégradation des sols, ainsi que par des perturbations des équilibres écologiques et des paysages naturels environnants.

Avec l'intérêt croissant accordé à la protection de l'environnement et au développement durable, il devient nécessaire d'intégrer la dimension environnementale dans toutes les phases des projets miniers. Cette démarche ne se limite plus à une simple mesure appliquée après la fin de l'exploitation, mais s'inscrit comme une composante essentielle du cycle de vie du projet minier, visant à réduire les impacts négatifs et à favoriser la réintégration des sites dans leur environnement naturel de manière stable et équilibrée.

En Algérie, le cadre législatif et réglementaire relatif aux activités minières a connu une évolution importante, notamment à travers l'adoption de plusieurs textes juridiques, en particulier la loi minière **n° 25-12 du 03 août 2025** et la loi **n° 13-19 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement, qui imposent aux entreprises opérant dans ce secteur de prendre les mesures nécessaires pour protéger l'environnement et assurer la réhabilitation des sites selon des plans définis, sous le contrôle des autorités compétentes. Cette orientation reflète la volonté d'assurer un équilibre entre l'exploitation des ressources naturelles et la préservation de l'environnement.

La carrière de Fleurus, située dans la wilaya d'Oran, s'inscrit parmi les sites ayant fait l'objet de mesures de remise en état, ce qui en fait un cas d'étude pertinent pour l'analyse des aspects juridiques et environnementaux liés à ce processus. L'étude de ce site permet également de comprendre les mécanismes adoptés pour la réhabilitation des terrains et d'évaluer leur efficacité dans la réduction des impacts générés par l'activité extractive, y compris les aspects liés à l'organisation et à la gestion des écoulements des eaux au sein du site, en raison de leur influence sur la stabilité des sols.

Cette étude vise à analyser le cadre législatif régissant les opérations de remise en état, ainsi qu'à mettre en évidence les principales exigences environnementales associées à ces interventions, en prenant la carrière de Fleurus comme exemple de cas d'étude. Pour atteindre cet objectif, une analyse des textes juridiques et réglementaires en vigueur a été réalisée, complétée par l'examen des opérations de remise en état effectuées sur le site et le suivi de son évolution au cours des différentes phases d'exploitation et de réhabilitation.

Dans le cadre de ce travail, le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre présente les notions générales relatives au cadre géographique, géologique et climatique du bassin du Bas Chlef, ainsi que du site d'étude qui est la carrière de Fleurus.

Le deuxième chapitre traite les différentes phases d'exploitation, les principaux impacts environnementaux générés, ainsi que de la gestion des déchets miniers et des mesures d'atténuation proposées.

Le troisième chapitre est consacré à la remise en état à travers l'analyse du cadre réglementaire et des exigences environnementales, ainsi qu'à la présentation des techniques de réhabilitation mises en œuvre au niveau de la carrière et l'évaluation de leurs résultats.

Enfin, **une conclusion générale** vient clore ce travail en récapitulant les principaux résultats obtenus et en ouvrant des perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE I

Généralités

I. INTRODUCTION

Le bassin du Bas Chélif constitue l'un des principaux bassins néogènes de l'Algérie nord-occidentale. Son évolution mio-pliocène a été fortement contrôlée par la tectonique alpine, les variations du niveau marin et les changements paléoenvironnementaux ayant affecté la marge sud-occidentale de la Méditerranée (Perrodon, 1957 ; Thomas, 1985 ; Neurdin-Trescartes, 1995 ; Hebib, 2016, Benyoucef, 2021). À partir du Miocène supérieur, ce bassin évolue comme un domaine intramontagneux mobile, marqué par l'alternance de phases tectoniques compressives et extensives, favorisant la mise en place de dépôts détritiques, marneux, carbonatés et évaporitiques et déatomique.

Les formations évaporitiques, en particulier les dépôts de gypse messiniens, s'inscrivent dans le contexte plus large de la crise de salinité messinienne, événement majeur de l'histoire méditerranéenne daté entre environ 5,97 et 5,33 Ma, durant lequel les restrictions des échanges avec l'Atlantique ont favorisé la précipitation d'importants dépôts évaporitiques dans plusieurs bassins marginaux (Roveri et al., 2014 ; Belhadji, 2021 ; Krijgsman et al., 2024 ; Boucif, 2025).

Dans ce cadre, le plateau de Boufatis, situé à l'extrémité occidentale du bassin du Bas Chélif, présente un intérêt géologique et économique particulier. Le gypse de Sidi Boutbal, exploités au niveau de la commune de Boufatis par la société Knauf, constituent une ressource importante pour la production du plâtre et de ses dérivés. Une exploitation qui s'inscrit dans un contexte géologique et environnemental particulier dont la préservation du milieu naturel en limitant les impacts sur l'environnement est l'objet principale de cette étude.

II. CADRE GEOGRAPHIQUE

1. A l'échelle régionale

Le bassin du Bas Chélif se situe dans le nord-ouest de l'Algérie et fait partie des bassins néogènes sublittoraux parallèles à la mer Méditerranée. Ce bassin, étudié notamment par Perrodon (1957), se présente sous la forme d'une gouttière allongée orientée ENE-WSW. Il s'inscrit dans un ensemble de bassins néogènes répartis d'Est en Ouest : le bassin de la Mitidja, le bassin du Moyen Chélif, le bassin du Bas Chélif et le bassin de la Tafna.

Le bassin du Bas Chélif couvre une vaste dépression comprise entre les reliefs du Dahra au Nord et les monts de l'Ouarsenis au Sud. Il est traversé par l'oued Chélif, principal cours d'eau de l'Algérie, qui draine une grande partie du Nord-Ouest du pays avant de se jeter dans la mer Méditerranée (**Fig. 01**).

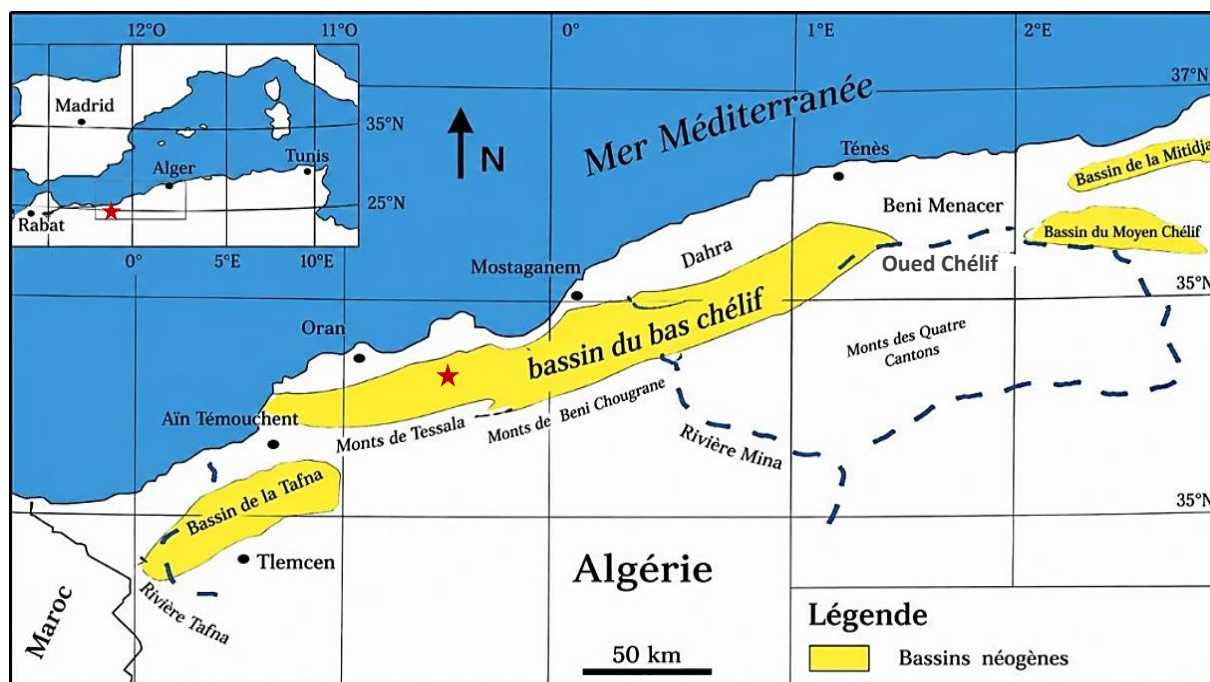


Figure 01 : les bassins néogènes de l'Algérie du Nord (D'après Perrodon, 1957, légèrement modifiée, ★ : secteur d'étude).

Le bassin du Bas Chélif est limité d'Ouest en Est par deux grandes lignes de reliefs d'une direction sensiblement NE-SO (**Fig. 02**) :

- Au Nord, les massifs du Murdjajo, d'Arzew, du Dahra et de Beni Menacer ;
- Au Sud, les monts de Tessala, d'Ouled Ali, des Beni Chougrane et de l'Ouarsenis.

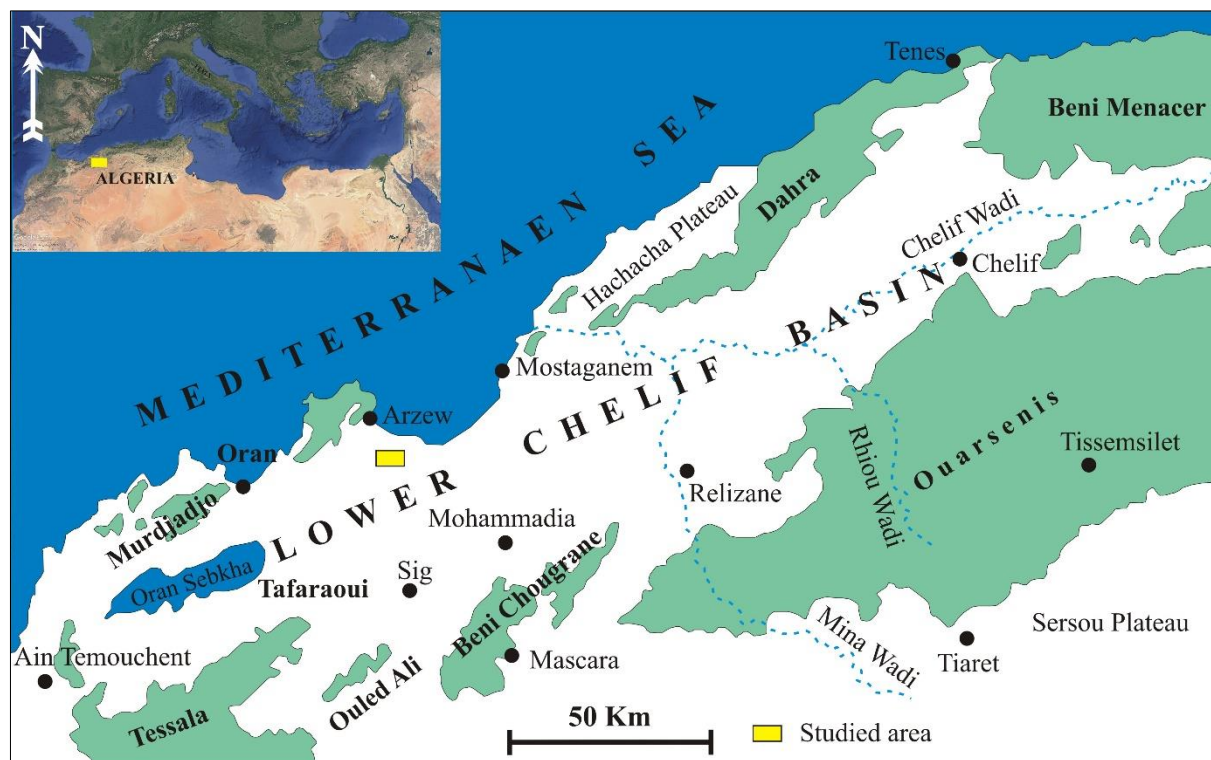


Figure 02 : Situation géographique et bordures du bassin du Bas Chélif

2. Secteur d'étude

La région d'étude est située dans la partie occidentale du plateau de Boufatis qui est en réalité une carrière de gypse exploitée par l'entreprise allemande Knauf. Elle se trouve à environ 22 km à l'Est de la ville d'Oran. Elle est facilement repérable sur la carte topographique car elle occupe une position intermédiaire entre deux importantes étendues d'eau, le lac de Témamine au Nord-Ouest et les salines d'Arzew au Sud-Est. Administrativement, la carrière relève de la commune de Benfreha, Daïra de Gdyl, Wilaya d'Oran (**Fig. 03**).

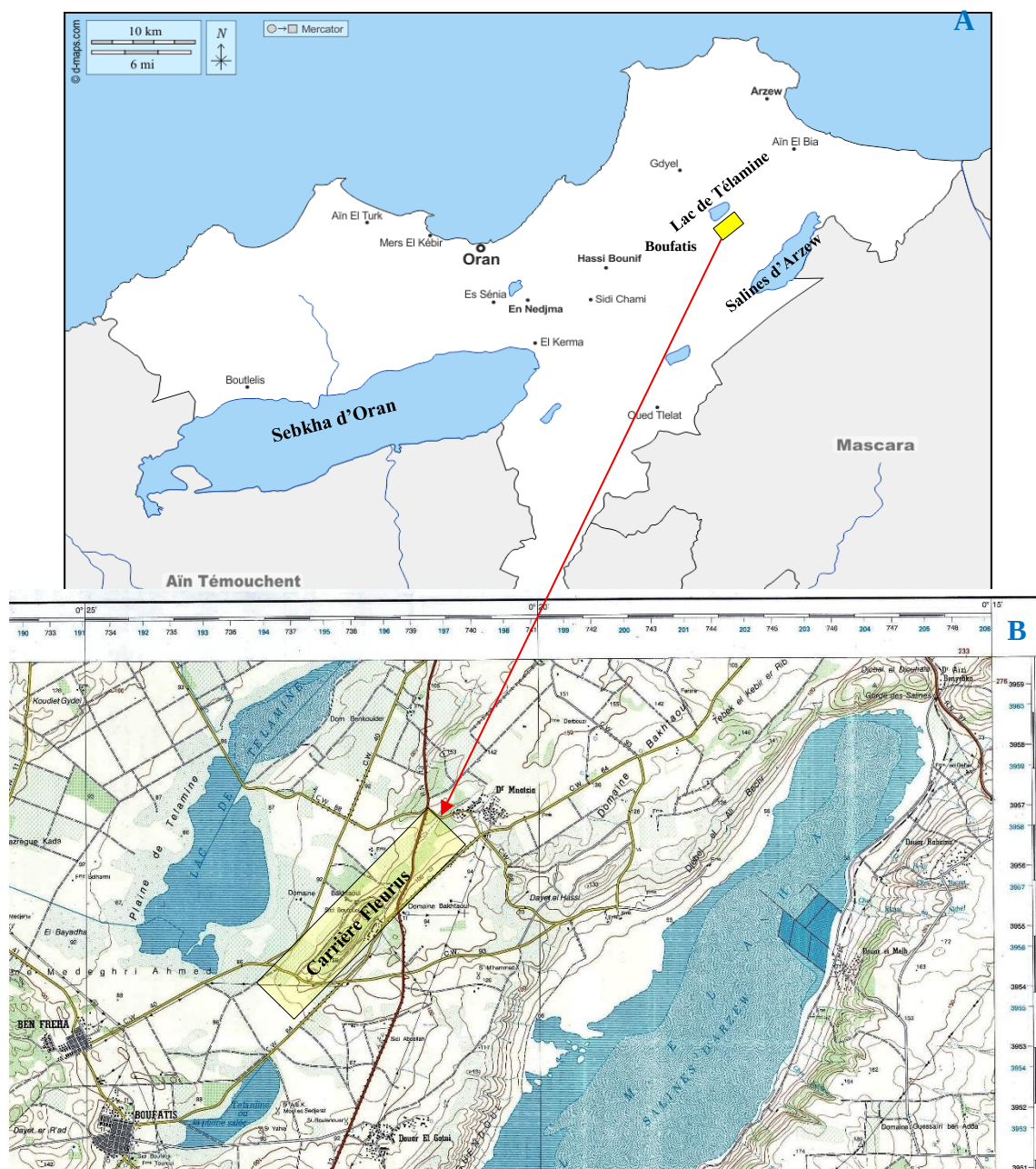


Figure 03: A ; Carte administrative de la Wilaya d'Oran. B ; localisation de la carrière de Knauf Fleurus (extrait de la carte topographique de Sig, au 1/50000)

III. CADRE GEOLOGIQUE

1. Contexte général

1.1. Sur le plan structural

Le bassin du Bas Chélif faisant partie des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie nord-occidentale, correspond à un bassin synorogénique dont la mise en place est directement liée aux principales phases de l'orogénèse alpine (Perrodon, 1957 ; Delfaud et al., 1973 ; Delteil, 1974 ; Guardia, 1975). Son remplissage sédimentaire mio-pliocène repose en discordance sur un substratum mésozoïque, constitué principalement de schistes crétacés, ce qui témoigne d'une évolution tectonique et sédimentaire complexe au cours du Néogène (Meghraoui, 1982 ; Thomas, 1985 ; Neurdin-Trescartes, 1995).

Cette dynamique sédimentaire explique la grande diversité des faciès observés dans le bassin du Bas Chélif, où les dépôts varient latéralement entre marnes profondes, formations diatomitiques, plates-formes carbonatées et formations évaporitiques, tout en montrant une évolution verticale marquée du Miocène au Pliocène (Perrodon, 1957 ; Rouchy, 1982 ; Saint-Martin, 1987, 1990 ; Cornée et al., 1994 ; Belkebir et al., 1996, 2002 ; Atif et al., 2008).

L'évolution tectonique du bassin s'est déroulée en plusieurs étapes majeures, en relation avec l'évolution mio-plio-quaternaire du bassin du Chélif et la dynamique compressive de l'Atlas tellien (Meghraoui, 1982 ; Thomas, 1985 ; Neurdin-Trescartes, 1995).

Au Serravallien supérieur et au Tortonien inférieur, une phase distensive favorise l'ouverture du bassin et la mise en place de structures en horsts et grabens (Meghraoui, 1982 ; Thomas, 1985). Ces dépressions sont ensuite progressivement comblées, au Tortonien supérieur et au Messinien, par une épaisse série marneuse, localement enrichie en diatomites, liée à la transgression tortonienne (Meghraoui, 1982 ; Neurdin-Trescartes, 1995 ; Atif et al., 2008). Au Pliocène inférieur, le régime tectonique devient compressif, entraînant la formation de plis orientés globalement N110° (Meghraoui, 1982 ; Meghraoui et al., 1986). Cette compression s'intensifie après le dépôt des formations du Pliocène inférieur, accentuant les structures déjà individualisées dans les séries tortoniennes et messiniennes (Meghraoui, 1982 ; Thomas, 1985).

Au Pliocène supérieur, la compression devient principalement Nord-Sud, provoquant la déformation des niveaux continentaux contemporains selon des plis de direction Est-Ouest (Meghraoui, 1988 ; Yelles-Chaouche et al., 2006) (**Fig. 04**).

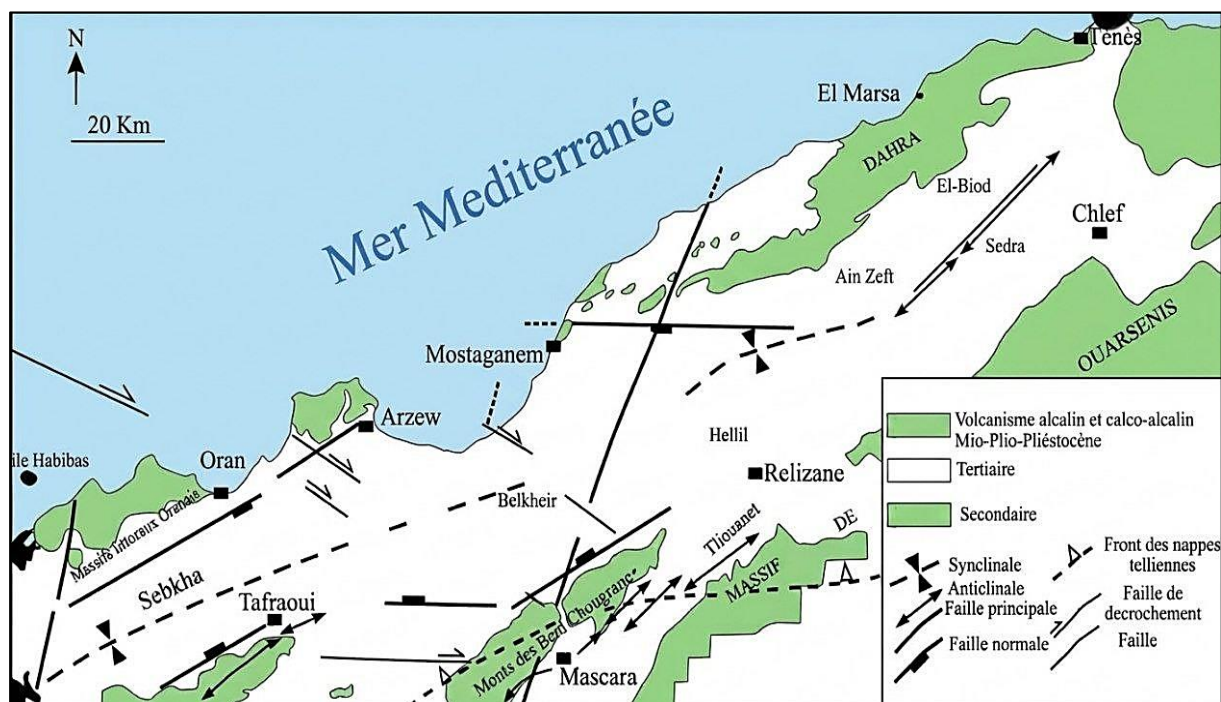


Figure 04 : Cadre structural du bassin du Bas Chélif (d'après Arab et al., 2015)

1.2. Sur le plan lithostratigraphique

Du point de vue stratigraphique, le bassin du Chélif est constitué par une succession de formations géologiques allant du Miocène inférieur au Quaternaire.

1.2.1. Miocène inférieur

Le Miocène inférieur, attribué principalement au Burdigalien, repose de manière discontinue et transgressive sur le substratum crétacé. Il est représenté par des dépôts détritiques de base, notamment des conglomérats et des grès, auxquels s'associent des marnes bleues. Cet ensemble correspond à la Mégaséquence I définie par Delfaud et al. (1973). Il marque les premières étapes du remplissage néogène du bassin, dans un contexte d'instabilité tectonique et de subsidence progressive.

1.2.2. Miocène supérieur

Il est marqué par une nouvelle phase transgressive, correspondant au deuxième cycle post-nappes décrit par Delteil (1974), Fenet (1975), ainsi que Bessedik et Belkebir (1991). Ce cycle, équivalent à la Mégaséquence II de Delfaud et al. (1973), occupe une grande partie du bassin du Bas Chélif. Les dépôts sont généralement transgressifs et reposent en discordance sur les terrains plus anciens (Belkebir et al., 1996). Cette série est encadrée par deux discontinuités majeures, bien visibles sur les marges septentrionale et méridionale du bassin : la première

correspond à la transgression tortonienne, tandis que la seconde marque la base de la transgression pliocène (Belkebir et al., 2002).

Durant le Messinien, la sédimentation devient plus contrastée. Au centre du bassin, dans les zones relativement profondes, se développent des dépôts marneux et diatomitiques. Sur les marges et les hauts-fonds, des plates-formes carbonatées se mettent en place, avec un développement important de constructions coralliennes et bioclastiques (Perrodon, 1957 ; Gourinard, 1958 ; Rouchy, 1982 ; Saint-Martin, 1987, 1990 ; Saint-Martin et al., 1992 ; Cornée et al., 1994). Ces édifices carbonatés ont progressivement contribué à restreindre les communications entre le bassin et la mer ouverte. Cette évolution a favorisé l'installation de conditions confinées, conduisant à une sédimentation évaporitique, notamment gypseuse, caractéristique de la fin du Miocène dans le bassin du Bas Chélif (Rouchy, 1982 ; Rouchy et al., 2007 ; Boucif et al., 2025).

1.2.3. Pliocène

Le Pliocène correspond, dans le bassin du Bas Chélif, à un cycle sédimentaire relativement complet. Il débute par une transgression marine reposant sur les dépôts évaporitiques de la fin du Miocène et s'achève par une phase régressive attribuée à l'Astien. La série pliocène comprend généralement des niveaux détritiques de base, suivis de marnes blanc et de calcaires construits du Plaisancien, puis de grès marins astiens et enfin de grès continentaux (Perrodon, 1957 ; Belkebir, 1986). Cette succession traduit le passage progressif d'un milieu marin ouvert vers des environnements littoraux, puis continentaux (Perrodon 1957, Benyoucef, 2021).

1.2.4. Quaternaire

Les formations quaternaires occupent principalement les plaines et les zones basses, notamment la plaine de l'Oued Chélif. Elles sont constituées essentiellement de dépôts continentaux récents, comprenant des alluvions, des conglomérats, des argiles sableuses, des limons et des terrasses fluviatiles. Ces formations témoignent de l'évolution récente du réseau hydrographique, du remaniement des reliefs bordiers et du comblement progressif des dépressions actuelles (**Fig. 5**).

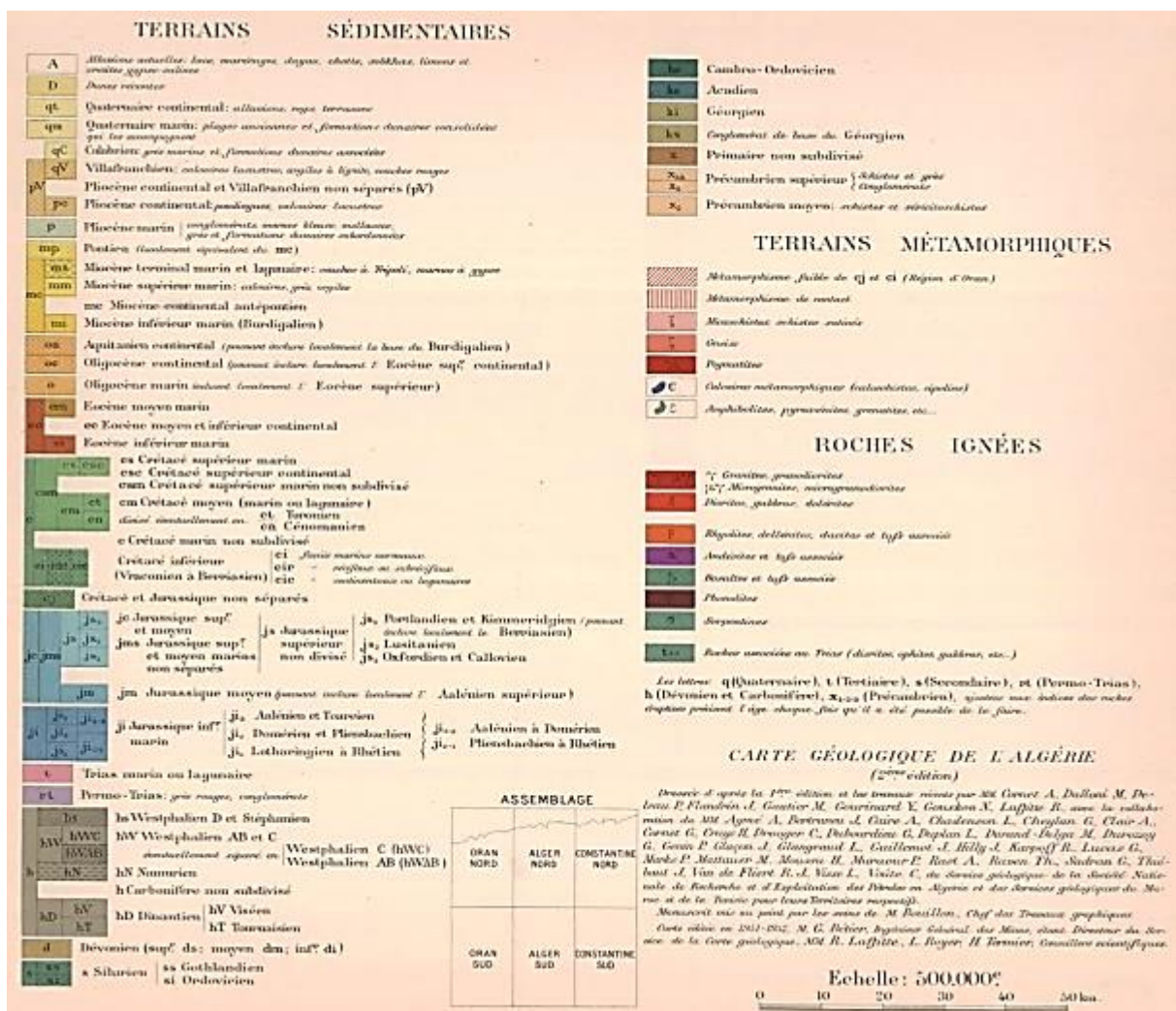
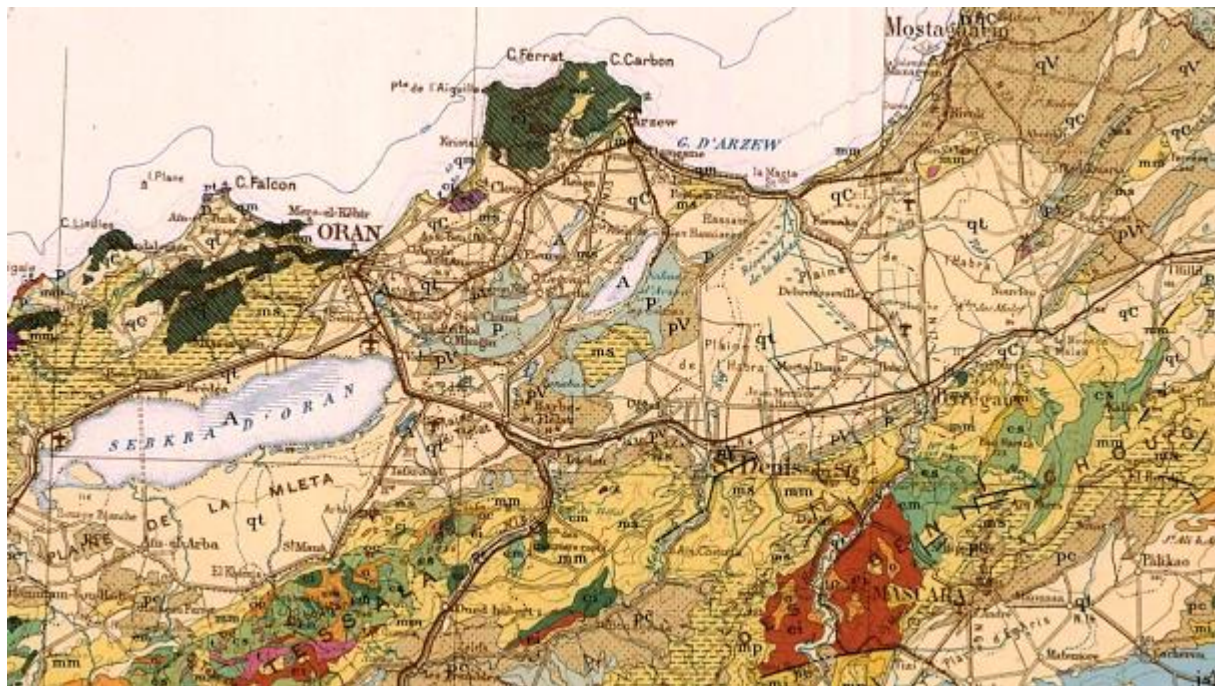


Figure 05 : Carte géologique du bassin bas Chélif (Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/800 000) Secteur d'étude ★

Les terrains néogènes affleurent en bordure et plongent vers le centre sous une couverture quaternaire formant les plaines actuelles, dans un contexte tectonique encore actif (Thomas, 1985). Hassani en 1987 synthétisa les principales formations géologiques présentées dans le bassin du Bas Chélif à partir des travaux de Perrodon (1957), de Delfaud et al., (1975), des travaux de Fenet (1975) et de la thèse de Thomas (1985) (**Fig. 6**).

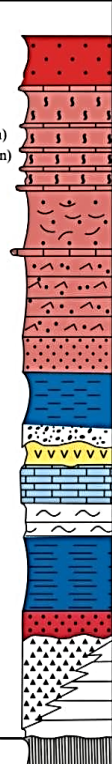
A. PERRODON, 1957		J. DELFAUD et al., 1975	B. FENET, 1975			G. THOMAS, 1985			LOG SYNTHETIQUE				
VI récent = Thyreennien	Couches à strombes		Pléistocène moyen et supérieur			Holocène	Lunettes éoliennes Sables éoliens Limons gris			Limons rouges			
VI intermédiaire					Pléistocène supérieur	Q	IV	Formation d'oued Oggaz (Soltanien)		Terrasses limoneuses rouges + dalles			
			Pléistocène moyen	III	F. Rochers (Tensifien)		II	F. Hammam (Amirien)					
						I	F. Remchi (Saletien)						
Villafranchien	Formations rouges		Calabrien-Villafranchien		Formations dunaires et formations rouges continentales	Pléistocène inférieur	P II	B	Formation de la Mekerra	Limons et conglomérats rouges			
Calabrien	Grès et lumachelles conglom-limoneux			4 cycle M 4	Lumachelles + dalles calcaires	Calabrien		A	Formation Mettemoura - golfe d'Arzew	Grès lumachelliques et sables dunaires			
Pliocène continental						Plaisancien							
Pliocène marin	Astien : grès marin plaisancien : marnes		Astien		Formations détritiques	Tabianien	P I	A, B	Formation du bas-chelif	Grès			
			Plaisancien	3 cycle M 3	Formation marneuses					Marnes bleues			
Miocène supérieur	Formations terminales	Méga-séquence 2	Messinien	2 cycle post nappes M 2	Calcaire messinien	Messinien	2 cycle M III	D	F. Évaporitiques	conglomérats et sables			
vindobonien	Formation médianes										C	Formation du Murdjadjo	Evaporites
	Formations de base										B	F. des marnes bleues médianes	Calcaires
											A	F. Grès roux	Tripolis
Miocène inférieur	Continental : conglomérats		Tortonien		Formations rouges continentales de Tafaraoui	Tortonien I	1 cycle M II		F. de Bouhanifatafaraoui	Marnes bleues			
	Marin : marnes grises			1 cycle M I	Serie de Mers El Kebir et O. Hamadi	Serravalien				F. Grès roux	Grès		
						Langnien				Conglomérats			
										Marnes pélagiques			
										Schistes et marnoschistes			

Figure 06 : Les différentes formations géologiques du bassin Bas Chélif (Hassani, 1987)

2. Géologie du secteur d'étude

Le plateau de Boufatis est essentiellement formé par des terrains mio-plio-quaternaires, reposant en discordance sur des massifs d'âge secondaire. Son relief est caractérisé par des collines aux sommets plats, avec des altitudes variantes entre 95 et 125 m.

La carrière de Fleurus connue aussi par Sidi Boutbal, située sur ce plateau, présente une structure en anticlinal orienté NE-SO, d'une longueur d'environ 4 km et d'une largeur de 500 m. Les flancs de l'anticlinal sont asymétriques, avec un pendage plus marqué sur le flanc Nord-Ouest, tandis que le cœur de l'anticlinal est constitué de couches épaisses de gypse (**Fig. 07**).

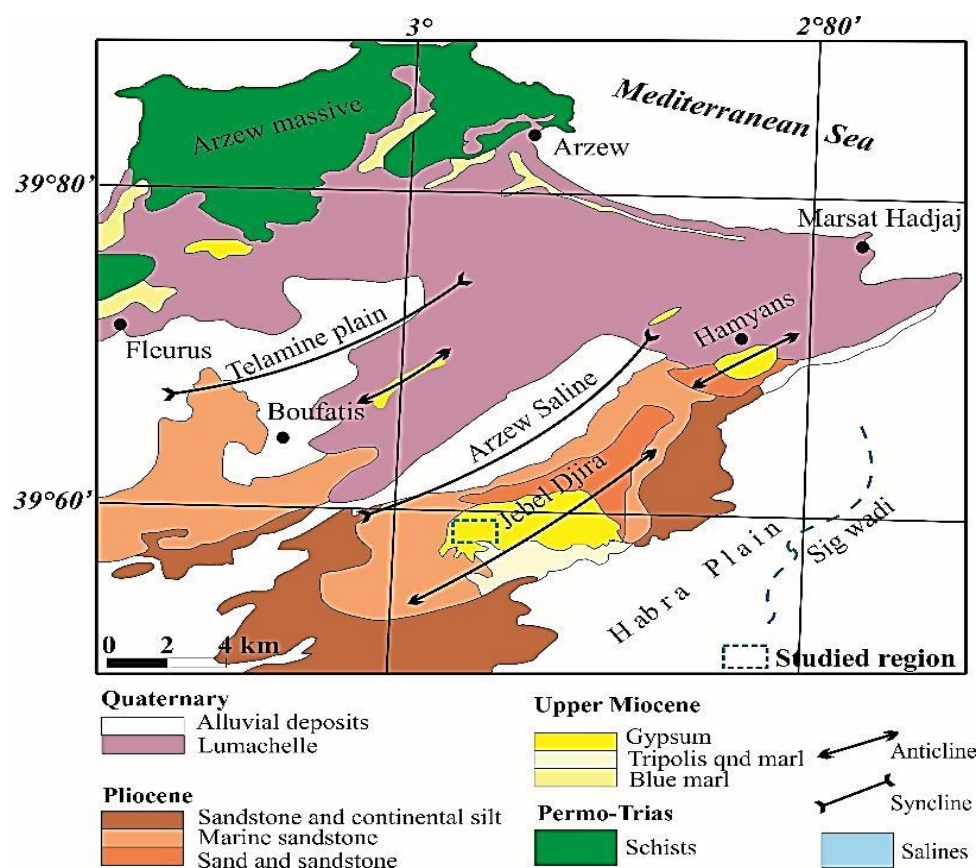


Figure 07 : Carte géologique du plateau de Boufatis (Perrodon, 1957, légèrement modifiée).

IV. APERÇU CLIMATIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

1. Le climat

La région est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride à aride, avec des étés chauds et secs et des hivers doux. Ce type de climat influence directement sur les conditions hydrologiques et environnementales de la zone et constitue un facteur déterminant à prendre en compte dans la planification des travaux de remise en état des sites miniers.

1.1. Pluviométrie

Les précipitations dans le bassin du Bas Chélif ont montré une forte tendance à la baisse depuis le milieu des années 70. La moyenne annuelle varie actuellement entre 161 et 662 mm, avec environ 80 % des pluies concentrées entre novembre et mars (**Fig. 08**). Une diminution supérieure à 20 mm par décennie a été observée particulièrement dans les zones nord et ouest du bassin (Achite et al., 2021).

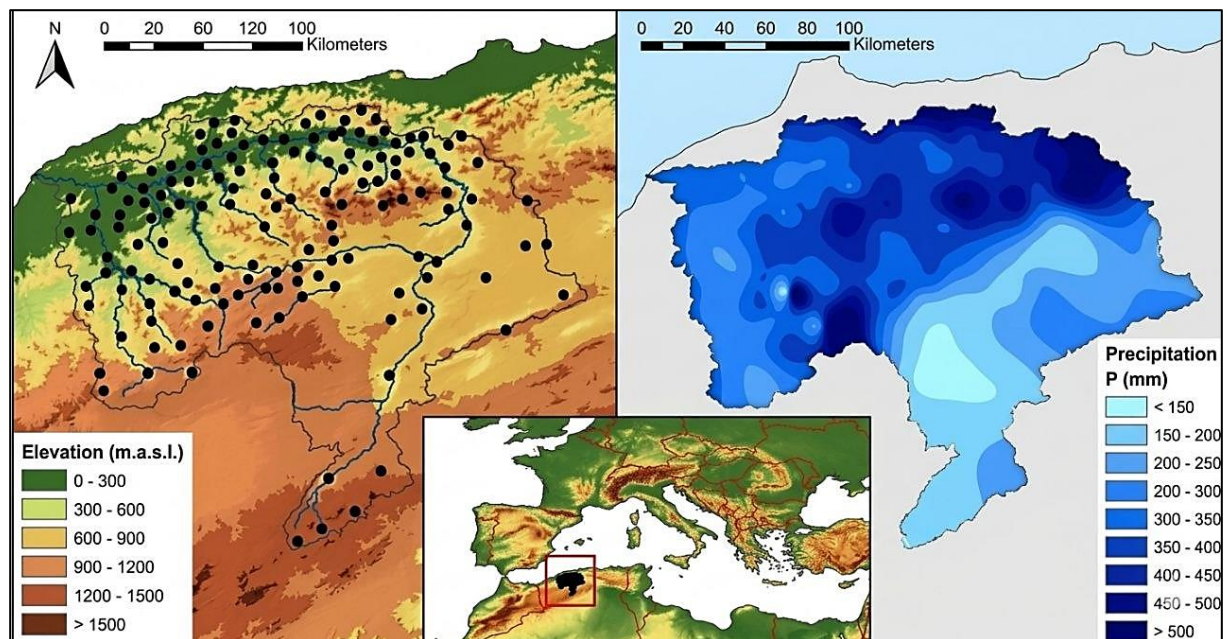


Figure 08 : Carte de la répartition des précipitations annuelles dans le bassin du Bas Chélif (d'après Achite et al., 2021)

1.2. Température

La région présente une variabilité thermique annuelle allant de 14,2°C à 18,7°C. Les étés sont chauds, atteignant jusqu'à 42°C, tandis que les hivers peuvent être froids. Une hausse de la température de 0,9°C accentue le phénomène de sécheresse (Elmeddahi et al., 2016).

1.3. Humidité et Vents

Le climat du bassin du Bas Chélif est influencé par des vents humides de secteur nord-ouest et des vents secs de secteur sud-ouest. L'humidité atmosphérique diminue fortement durant la saison estivale en raison de l'éloignement relatif de la mer et de l'influence des vents continentaux secs.

Dans la partie occidentale du bassin, la vitesse moyenne du vent enregistrée à Oran atteint 4 m/s à une hauteur de 10 mètres ce qui traduit un régime de vents modérément soutenu par rapport à d'autres régions côtières (**Fig. 09**).

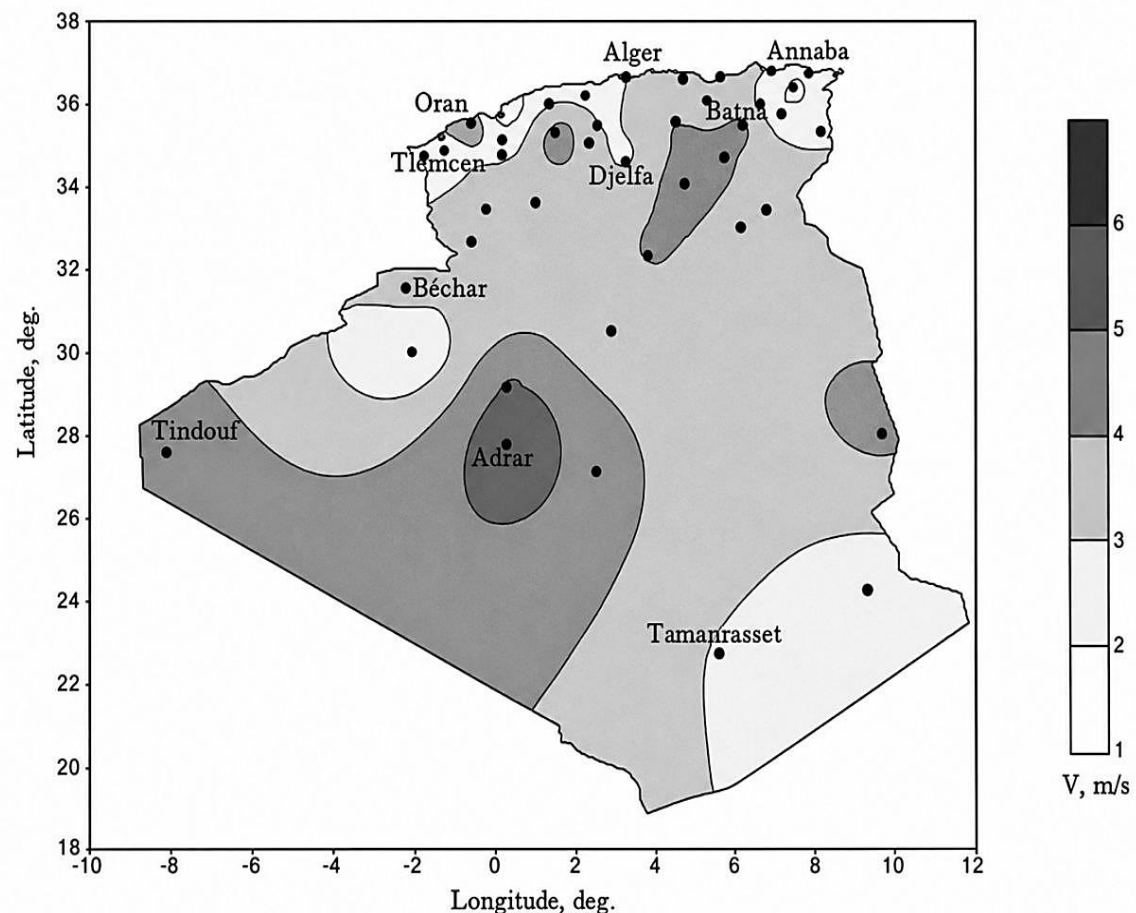


Figure 09 : Carte des vitesses moyennes annuelles du vent à 10 m d'altitude en Algérie (d'après Kasbadji, 1999)

2. Contexte hydrologique

La région du Bas Chélif, constitue une unité hydrogéologique importante couvrant une superficie d'environ 1134 km². Elle se distingue par des caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques liées à sa position géographique et à sa formation géologique.

2.1. Réseau hydrographique

L'oued Chélif est le cours d'eau principal contrôlant l'hydrologie du bassin (**Fig. 10**). Il est alimenté par plusieurs affluents provenant des hauteurs environnantes (Douaci et Goudjili, 2019) :

- **Du côté des montagnes de l'Ouarsenis :** oueds d'Oran et de Ras.**Du côté des monts de Ouled Nacer :** oueds El Fadja, Sly, Rehio et Djediouia.

Le réseau présente un écoulement intermittent et irrégulier, parfois absent, reflétant une hydrologie instable.

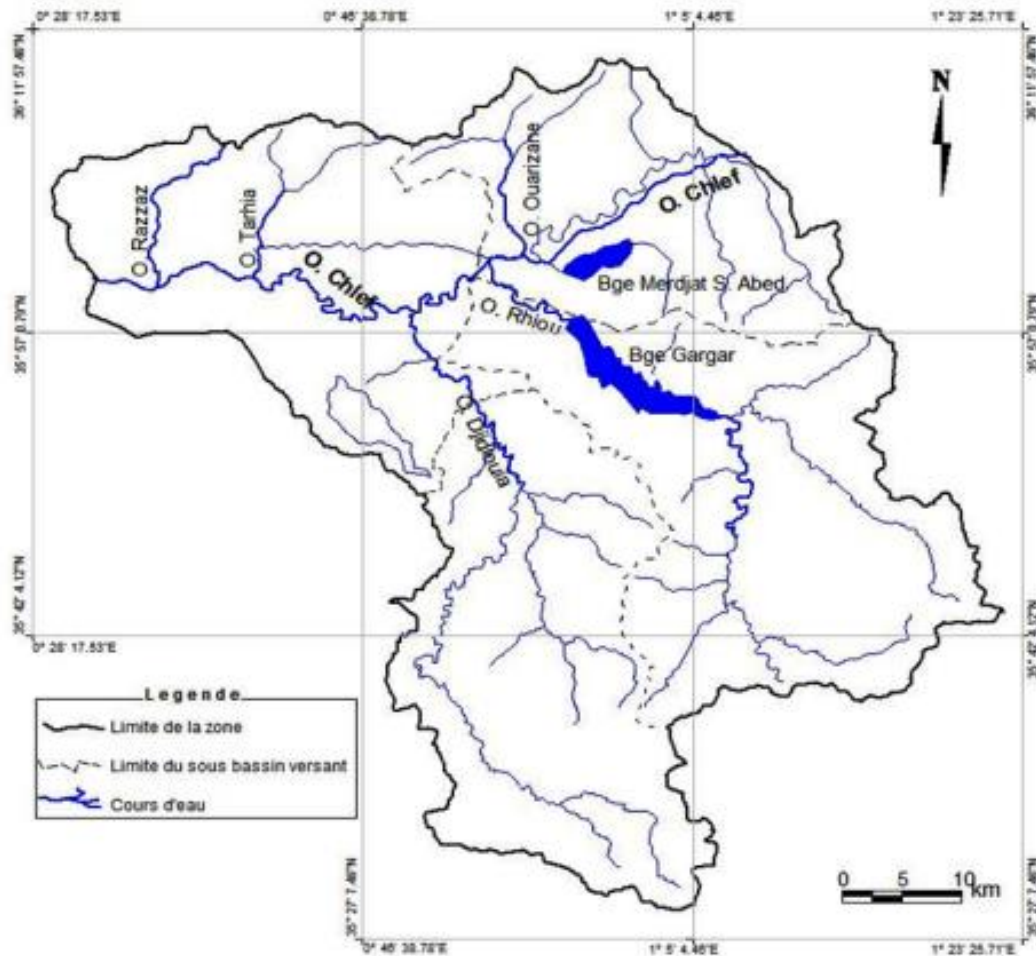


Figure 10 : Carte des sous-bassins versants et des unités hydrogéologiques de la plaine alluviale du Bas Chélif (d'après Bellague, 2017)

V. APERÇU MINIER

Le groupe Knauf, fondé en 1932 en Allemagne par Alfons et Karl Knauf, est un leader international dans la fabrication de matériaux et de systèmes de construction à base de plâtre. En Algérie, Knauf est actif depuis 1974 avec la construction de plusieurs unités de production de plâtre. Le développement du groupe dans le pays s'est accentué en 2006 avec la reprise de la plâtrière de Fleurus, située dans la commune de Benfréha, Wilaya d'Oran (**Fig. 11**).

Le site de Fleurus constitue aujourd'hui le principal site de production de plaques de plâtre en Algérie ainsi que de profilés métalliques utilisés dans le bâtiment. Sa superficie est d'environ 150 hectares, et il fait partie d'un ensemble de carrières locales exploitées par Knauf, incluant Menatsia, Djebel Djira, Sidi Abed, ainsi que deux carrières à Ouled Djellal.

Knauf Algérie accorde une grande importance à la durabilité. La gestion responsable des ressources, la réhabilitation progressive des carrières par le reboisement, ainsi que le recyclage complet des déchets, font partie des mesures mises en œuvre pour minimiser l'impact environnemental.



Figure 11 : Vue générale de l'usine de plâtre Knauf à Oran.

VI. HISTORIQUE DES TRAVAUX

Depuis la seconde moitié du **XIX^e siècle**, le bassin du Bas Chélif a suscité l'intérêt de nombreux géologues et paléontologues, qui ont réalisé une série d'études scientifiques et cartographiques visant à mieux comprendre ses formations sédimentaires et sa dynamique géologique.

Les premières reconnaissances géologiques furent réalisées par Bleicher (1875), Pomel (1892), Repelin (1895) et Brives (1897), qui ont permis de définir les bases stratigraphiques des terrains néogènes.

En 1903, Gentil a fourni une étude détaillée de l'Oranie occidentale, puis, en 1908 et 1915, Doumergue et Dalloni ont établi les premières cartes géologiques de la province d'Oran et du bassin du Bas Chélif, consolidant ainsi la connaissance régionale.

En 1936, Anderson a proposé un découpage de la série miocène en deux groupes : le Carténien et le Tellien. Les travaux de Deflandre (1939, 1942) sur les coccolithes du Miocène supérieur, poursuivis par Deflandre et Fert (1954), ainsi que les précisions systématiques de Gardet (1955) et Clocchiati (1971) sur les nannofossiles du Néogène, ont enrichi la paléontologie régionale.

À partir des années 1950, les études se sont intensifiées grâce à la création de la Société Nouvelle de Recherche et d'Exploitation des Pétroles en Algérie (S.N. Repal), permettant des levés à grande échelle et des forages détaillés. En 1957, Perrodon a proposé une subdivision de la série miocène du Bas Chélif en deux cycles sédimentaires : un cycle transgressif d'âge Burdigalien et un cycle d'âge Vindobonien, comprenant des faciès variés tels que conglomérats, grès, marnes, tripolis, calcaires et gypses.

Les premières études géodynamiques du bassin ont été réalisées dans les années 1970 par Delteil (1974), Fenet (1975) et Guardia (1975). Entre 1979 et 1982, Rouchy a caractérisé la sédimentation messinienne, proposant de nouvelles datations et identifiant les principaux faciès liés aux phénomènes évaporitiques.

En 1985, Thomas a proposé une stratigraphie basée sur les événements tectoniques liés à l'évolution géodynamique du bassin, mettant en évidence deux cycles post-nappes séparés par une discordance majeure dans le Tortonien (N16/N17) selon Blow (1969). La même année, Belkebir et Anglada, puis Belkebir (1986), ont réalisé une étude biostratigraphique détaillée de la bordure nord-occidentale du massif du Dahra.

En 1987, Saint Martin a étudié les constructions récifales messiniennes, soulignant la relation précise entre récifs et diatomites, tandis que Moissette (1988) s'est intéressé à la faune de bryozoaires du Messinien de l'Algérie occidentale. Dès cette période, le bassin est devenu l'objet permanent de recherches inédites sous la conduite du laboratoire de Paléontologie Stratigraphique et Paléoenvironnement du département des Sciences de la Terre d'Oran.

En 1991, Belkebir et Bessedik ont proposé une synthèse biostratigraphique du Miocène post-nappes de la Tafna et du bassin du Bas Chélif, complétée en 1992 par Neurdin-Trescartes qui a défini des séquences types dans le Néogène de ces bassins. En 1996, Belkebir et al., ont publié une synthèse actualisée des terrains néogènes des bassins de la Tafna et du Chélif, distinguant deux phases eustatiques au cours du Miocène supérieur.

Au XXI^e siècle, les recherches sur le bassin du Bas Chélif se sont intensifiées, portant sur la biostratigraphie, la paléoécologie et la paléontologie.

En 2001, Atif a analysé les modalités du passage Mio-Pliocène dans le bassin, tandis que Mansouri a étudié les nannofossiles calcaires à Djbel Ben Dourda. En 2004, Mansour a entrepris une étude paléontologique et paléoécologique des diatomées du faciès tripoli du Messinien inférieur. La même année, Satour a étudié systématiquement les bivalves de deux sites tortoniens dans le sud-ouest du Dahra.

En 2005, Belhadji, dans le cadre de son Magister, a étudié la série miocène supérieure et pliocène du bassin, en particulier la région de Djebel Diss (Mostaganem), en apportant de nouvelles données sur l'évolution stratigraphique et en identifiant six biozones compris entre le Tortonien inférieur et le Plaisancien inférieur grâce aux foraminifères planctoniques. En 2007, Rouchy et al. ont relaté les événements de la fin du Messinien dans plusieurs secteurs du bassin à travers une étude sédimentologique et biostratigraphique.

En 2008, Atif et al. ont étudié le passage Mio-Pliocène dans le secteur du Télégraphe de Sidi Brahim, identifiant un régime de confinement correspondant à la « crise de salinité » du Messinien, suivi d'une pulsation marine intra-messinienne. La même année, Mansouri et al. ont réalisé une étude biostratigraphique et paléoenvironnementale sur les nannofossiles calcaires des dépôts tortono-messiniens du bassin du Chélif.

En 2013, Tchouar L. a analysé les dinoflagellés de la série mio-pliocène du Télégraphe de Sidi Brahim, précisant le cadre paléoécologique de la région.

En 2014, Hebib Hakim a étudié la limite tortono-messinienne dans la marge nord du bassin du Bas Chélif, en se basant sur la répartition spatio-temporelle des assemblages de foraminifères benthiques afin de préciser les conditions paléoenvironnementales du bassin.

En 2021, Belhadji a étudié la sédimentation du Miocène supérieur au Pliocène dans les monts du Dahra, avec une attention particulière aux aspects lithostratigraphiques et paléoenvironnementaux des dépôts pré-, syn- et post-crise de salinité messinienne dans le bassin du Chélif. La même année, Mansouri a réalisé une étude systématique et biostratigraphique sur les nannofossiles calcaires néogènes du bassin du Bas Chélif, apportant une synthèse actualisée de la paléontologie et de la biostratigraphie de ce bassin.

En 2024, Atik et al., ont étudié la série stratigraphique du Messinien terminal au Piacenzien dans le Massif du Dahra (bassin du Bas Chélif), apportant de nouvelles données sur les événements du Lago Mare, le reflooding et les bio-événements marquant cette période de transition.

En 2025, Boucif et al., ont réalisé une étude sur la caractérisation chimique et le potentiel de valorisation des dépôts de gypse souterrain du plateau de Boufatis dans le bassin du Bas Chélif, basée sur des données de forages réalisés à Djebel Djira.

VII. BUT ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

1. But du Travail

Cette étude a pour objectif de déterminer les exigences légales et environnementales nécessaires à la remise en état de la carrière de Fleurus. Elle vise également à évaluer l'état actuel du site et à proposer des recommandations pour sa réhabilitation conformément aux lois et réglementations environnementales en vigueur.

2. Méthodologie

2.1. Sur terrain

Nous avons effectué un stage de 03 jours où nous avons effectué les travaux suivants :

- Visite de l'entreprise Knauf Oran, où nous avons été accueillis par messieurs Meddane Sofiane et Chaïb Idir, et où nous avons pris connaissance des aspects généraux liés au thème de la sortie.
- Visite du site de Fleurus, où nous avons découvert les activités d'extraction ainsi que les opérations de remise en état.
- Visite de la pépinière de l'entreprise, où nous avons identifié différentes espèces de plantes utilisées dans les travaux de réhabilitation.
- Visite du site de Menatsia, exemple d'une réhabilitation antérieure, où nous avons observé les résultats obtenus sur le terrain.

2.2. Outils et moyen de Travail

Dans le cadre de ce travail, plusieurs outils et moyens ont été utilisés afin d'analyser et d'interpréter les données du terrain. Google Earth a permis de consulter les images satellitaires anciennes de la carrière de Fleurus et d'observer son évolution dans le temps. L'intelligence artificielle a également été mobilisée afin de proposer des scénarios de réhabilitation et de visualiser l'évolution au futur du site après la remise en état. Enfin, les observations de terrain et les supports cartographiques existants ont constitué une base essentielle pour l'analyse.

CHAPITRE II

*Extraction du gypse et
impacts environnementaux*

I. INTRODUCTION

L'exploitation du gypse en carrière à ciel ouvert repose sur une série d'opérations techniques allant de la préparation du site aux phases d'extraction, de transport, de concassage et de traitement de la matière première. Malgré son importance économique et son rôle essentiel dans l'industrie des matériaux de construction, cette activité peut engendrer divers impacts sur l'environnement ainsi que sur la santé humaine.

Dans ce contexte, la carrière de Fleurus constitue le site d'étude permettant d'analyser les différentes étapes d'exploitation ainsi que les impacts environnementaux associés, à travers une approche reliant les opérations techniques à leurs effets sur le milieu naturel, dans le cadre réglementaire algérien.

II. ETAPE D'EXTRACTION DU GYPSE

1. Phase préparatoire

1.1. Le décapage ou travaux de découverte

Avant le décapage, une étude préliminaire de la flore et de la faune présentes sur le site est réalisée afin d'identifier les caractéristiques écologiques originelles du milieu, dans le but de permettre sa réhabilitation et de le ramener à un état proche de son état naturel après l'exploitation.

Dans la carrière de Fleurus, le décapage consiste en l'enlèvement des couches superficielles, notamment la terre végétale, les sols et les roches stériles, à l'aide d'une pelle hydraulique, afin d'atteindre les formations gypseuses exploitables, tout en conservant ces matériaux pour leur réutilisation ultérieure dans les opérations de remise en état du site (**Fig. 12**).



Figure 12 : Opération de décapage réalisée à l'aide d'une pelle hydraulique

2. Phase d'exploitation

La société Knauf procède par deux méthodes, l'extraction mécanique à l'aide de brise-roches hydrauliques et l'abattage par explosifs, en fonction des caractéristiques géologique du massif rocheux observées au niveau des fronts de taille, notamment la fracturation, la dureté et la structure du gypse.

L'exploitation est organisée selon un régime de travail en une seule équipe (8 h) ou en deux équipes (2×8 h), en fonction des besoins de production et de la cadence d'extraction exigée, afin d'assurer la continuité des opérations de production.

2.1. Extraction mécanique

L'extraction mécanique du gypse est réalisée directement au niveau du front de taille à l'aide de brise-roches hydrauliques, sans recours aux explosifs, et ce pour les niveaux de gypse présentant une dureté moyenne. Cette technique permet une fragmentation progressive et contrôlée de la roche, tout en réduisant les vibrations et les impacts environnementaux généralement associés aux tirs de mines. Elle assure également une meilleure maîtrise de la granulométrie du matériau extrait, facilitant ainsi l'alimentation régulière du concasseur primaire (**Fig. 13**).

Par ailleurs, cette méthode favorise une exploitation plus sélective du gisement en limitant le mélange du gypse avec les matériaux stériles, ce qui contribue à préserver la qualité de la matière première. Des mesures de sécurité strictes sont appliquées, notamment le respect des distances de sécurité, le port des équipements de protection individuelle et la surveillance de la stabilité du front de taille afin de prévenir les risques d'accidents.



Figure 13 : Extraction mécanique à la carrière Knauf effectuée par des brises-roche

2.2. Abattage par les explosifs

2.2.1. La foration

C'est une étape fondamentale lors de la préparation du tir de mine. Elle consiste à réaliser des trous sub-verticaux à la surface des gradins afin d'y remplir par des charges explosives. La profondeur, le diamètre et l'inclinaison des trous sont déterminés en fonction de la hauteur des gradins et du plan de tir adopté. Selon les caractéristiques mécaniques de la roche, la foration des trous peut être réalisée par percussion, par rotation ou selon un mode roto-percussif combinant la rotation de l'outil et des chocs successifs, ce dernier étant particulièrement adapté aux formations rocheuses les plus résistantes.

Dans la carrière de Fleurus, cette opération est réalisée à l'aide d'une sondeuse à cabine de type *Atlas Copco*, les trous étant forés en position sub-verticale avec des profondeurs adaptées à chaque gradin (**Fig. 14**).



Figure 14 : Sondeuse *Atlas copco* destinée pour les travaux de foration

2.2.2. Plan de tir

a. Détermination des paramètres

Avant le début des opérations de forage, une étude technique est réalisée afin de déterminer les paramètres appropriés du plan de tir, en conformité avec les caractéristiques géologiques et géomécaniques du massif rocheux ainsi que les exigences d'exploitation. Cette étude s'appuie sur l'analyse de la nature de la roche, de son degré de cohésion et de fracturation, ainsi que sur

les dimensions de la banquette et les conditions de travail dans la carrière. La détermination de ces paramètres vise à assurer une répartition adéquate de l'énergie explosive dans le massif, permettant d'obtenir une fragmentation homogène des roches, d'améliorer le rendement de l'extraction et de maintenir la stabilité du front après le tir (**Fig. 15**).

Elle contribue également à limiter les impacts négatifs potentiels tels que les vibrations, les projections de blocs et les émissions de poussières, renforçant ainsi la sécurité et l'efficacité globale des opérations d'exploitation.

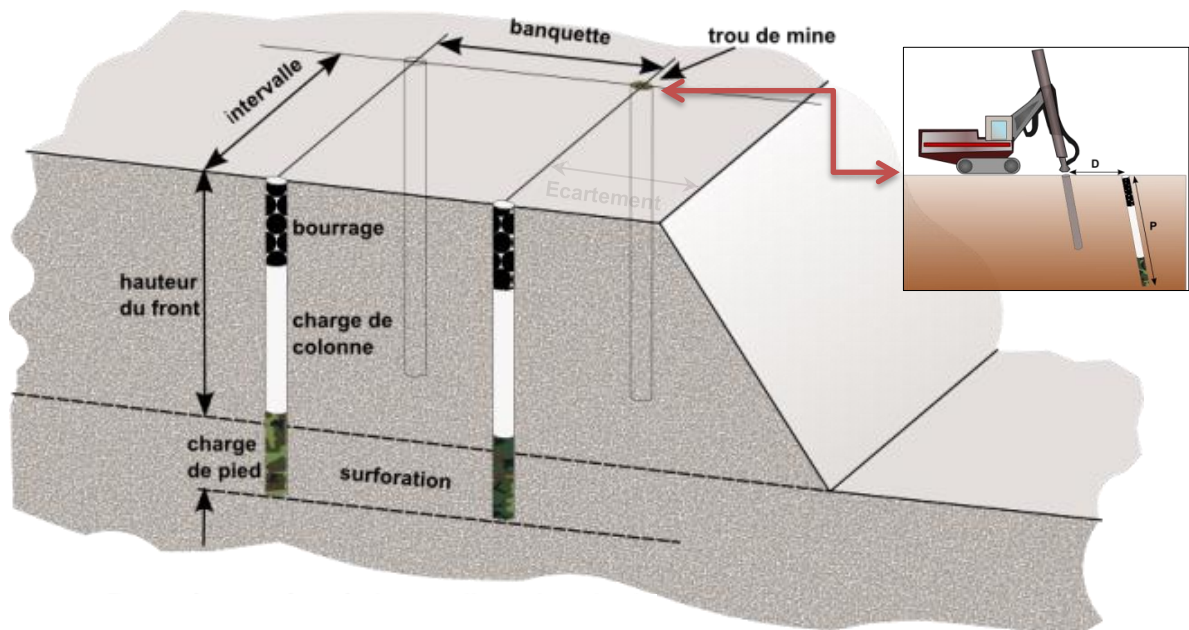


Figure 15 : Exemple des paramètres géométriques d'un plan de tir (Source internet)

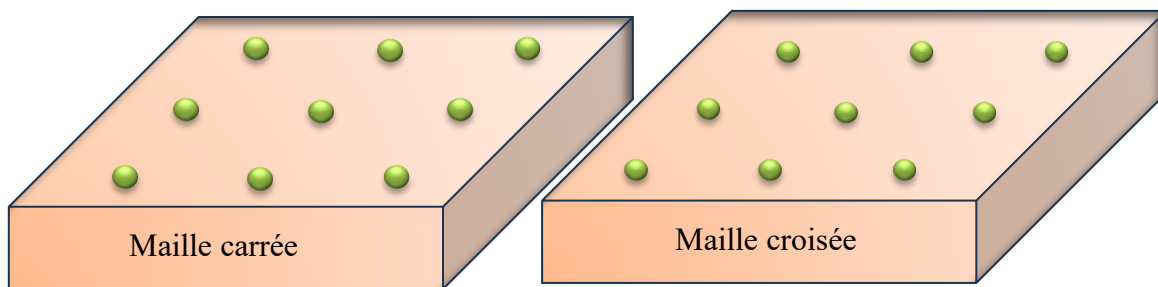
b. Paramètres liés au plan

- **Écartement** : distance entre la première rangée de trous et la face libre, influençant directement la fragmentation et le déplacement des matériaux.
- **Espacement ou intervalle (S)** : distance entre deux trous voisins dans une même rangée, permettant d'assurer une répartition homogène de l'énergie explosive.
- **Banquette (B)** : distance entre deux trous de deux rangées successives, jouant un rôle essentiel dans le dégagement de la roche et l'efficacité du tir (**Tab. 1**).

Tableau 1 : Paramètres des différents types de mailles de tir de mine

Type de Maille	Rapport ($a = S/B$)	Analyse technique
Rectangulaire (Général)	1,0 - 1,5	Configuration standard (trous alignés).
Carrée	1,0	idéale pour des bordures de banquettes droites.
Croisée (Quinconce)	1,15	Meilleure distribution d'énergie.

Le choix de la maille dépend du rapport $a = S/B$. Ce paramètre est essentiel pour garantir une fragmentation uniforme du massif (Fig. 16).

**Figure 16** : Différents types de mailles selon la nature du massif rocheux

2.2.3. Le tir de mine

L'opération de fragmentation de la roche par explosion des charges placées dans les trous forés est un processus dont la fréquence et le choix des explosifs dépendent de la nature de la roche ainsi que des objectifs de production. En régime normal, le service de la matière première programme un tir de mine par semaine et utilise principalement la Marmanit, un explosif composé de 80 % de nitrate d'ammonium et d'un explosif pur (TNT). Ce produit est particulièrement recommandé pour les roches tendres à mi-dures, telles que le gypse, tout en recourant occasionnellement à d'autres types d'explosifs selon les besoins (Fig. 17).

**Figure 17** : A ; Chargement d'un trou de mine et B ; exemple d'un tir de mine

2.2.4. Types d'explosifs

Trois principaux types d'explosifs utilisés dans les travaux de tir de mine aux différentes carrières de l'entreprise Knauf, classés selon leur composition, leur performance énergétique et leurs domaines d'application (**Fig. 18**) :

- Les explosifs gélatineux : ce sont des explosifs à base de nitroglycérine, caractérisés par une très forte puissance énergétique et une excellente résistance à l'eau. Leur vitesse de détonation est élevée, généralement comprise entre 4000 et 6000 m/s. Ils sont utilisés dans des conditions géologiques difficiles et pour les formations rocheuses dures nécessitant une fragmentation intense.
- Les explosifs nitrates (pulvérulents) : tels que la Marmanit, ils appartiennent à la famille des explosifs à base de nitrate d'ammonium sensibilisé. Ils sont largement utilisés en exploitation à ciel ouvert en raison de leur bon compromis entre coût et performance. Leur vitesse de détonation est en moyenne de 3500 à 4000 m/s, ce qui les rend adaptés aux roches tendres à mi-dures, comme le gypse (ISEE, 2011).
- Les explosifs nitrate-fuels (ANFO) : comme l'Anfomil, ils sont constitués d'un mélange de nitrate d'ammonium et de combustible (fuel oil). Ils sont très utilisés dans l'industrie minière en raison de leur faible coût, leur simplicité de fabrication et leur sécurité relative. Leur vitesse de détonation varie généralement entre 3000 et 4000 m/s, et ils sont principalement employés dans les roches peu résistantes à moyennement résistantes (Katsabanis, 2020).



Figure 18 : Types d'explosifs utilisés dans les tirs de mine **A** : Marmanit, **B** : Les explosifs gélatineux ; Gélanite, **C** : explosif en vrac : Anfomil

3. Le chargement

La phase qui suit immédiatement le tir de mine consiste à rassembler le matériau abattu, à procéder à l'élimination des matériaux stériles associés, puis à les charger sur des camions en vue de leur transport. Au niveau de la carrière de Fleurus, ce chargement s'effectue selon deux orientations en fonction de la nature des matériaux extraits : le gypse exploitable est acheminé vers la station de concassage pour sa transformation, tandis que les matériaux stériles sont stockés dans les zones prévues pour le remblayage dans le cadre des opérations de remise en état du site.

Cette opération est réalisée à l'aide de chargeuses sur pneus et de pelles hydrauliques, dans le respect strict des règles de sécurité en vigueur au sein de la carrière, notamment les distances de sécurité entre les engins et les camions, ainsi que la prise en compte des risques de glissements ou d'éboulement au niveau du front de taille. Elle se caractérise également par une organisation homogène du chargement dans les camions et par un contrôle de la granulométrie du gypse, afin d'assurer un transport efficace vers la station de concassage (**Fig. 19**).



Figure 19 : Etape de chargement des matériaux à l'aide d'un chargeur sur pneus

4. Le transport

Le transport vise à acheminer le gypse depuis la zone d'extraction vers le concasseur primaire et les unités de traitement selon une organisation rigoureuse garantissant la continuité de la production. Cette opération repose sur un plan de transport précis appelé cycle de rotation

avec des itinéraires bien définis afin d'éviter les encombrements et d'assurer la sécurité de la circulation des engins (**Fig. 20**).

Dans la carrière de Fleurus, cette phase est confiée à un sous-traitant spécialisé chargé de fournir les camions et les conducteurs. Par ailleurs, le gypse est soumis à un système de pesage par pont bascule permettant de déterminer avec précision les tonnages transportés, de suivre la production quotidienne et d'assurer la traçabilité des flux de matières au sein du site.



Figure 20 : transport du gypse vers l'unité de traitement

5. Le concassage

Il permet de réduire progressivement la taille des blocs de gypse afin d'obtenir une granulométrie adaptée aux utilisations industrielles. Différents types de concasseurs peuvent être mobilisés selon les étapes du processus. Dans le cas de la société Knauf, le concassage est assuré par un concasseur à mâchoires utilisé comme concasseur primaire. Un concasseur secondaire à deux cylindres est aussi utilisé pour affiner d'avantage la granulométrie. Ces équipements sont constitués de mâchoires, dont l'une est fixe et l'autre mobile, permettant ainsi de réduire successivement la taille des éléments (**Fig. 21**).

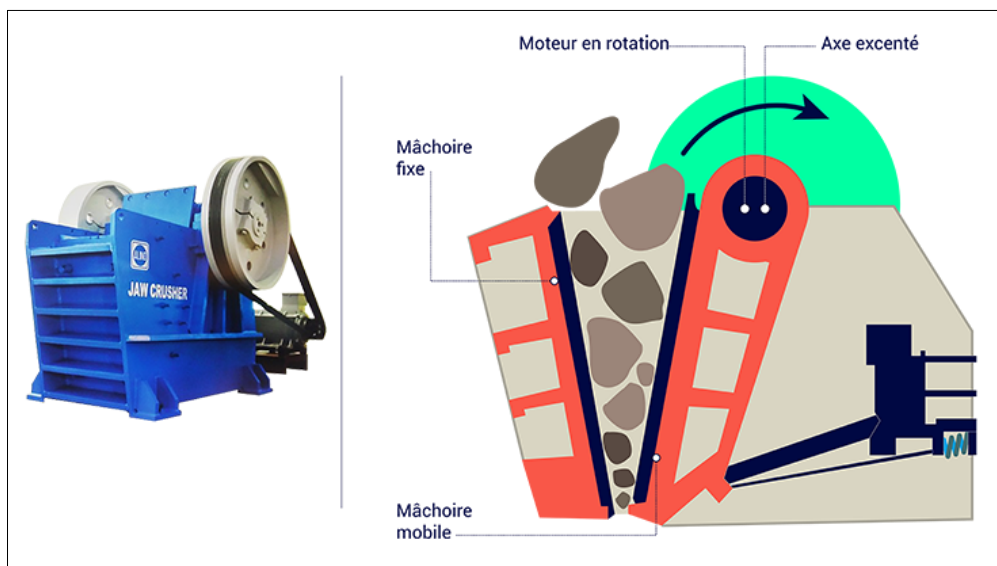


Figure 21 : Schéma explicatif du principe de fonctionnement d'un concasseur à mâchoires

III. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAL D'EXTRACTION DE LA ROCHE

1. Impact sur le sol

L'exploitation des carrières de gypse entraîne des impacts directs sur le sol, qui commencent dès l'étape de décapage, conduisant à la perte de la couche superficielle fertile et à la diminution de la capacité naturelle de régénération du sol. De plus, la circulation des engins lourds provoque le compactage du sol et la réduction de sa porosité, ce qui affecte négativement la perméabilité à l'eau et à l'air et augmente sa sensibilité à l'érosion, notamment dans les zones mises à nu.

Les opérations de foration et de tir de mine contribuent également à perturber la structure géologique superficielle, ce qui peut compromettre la stabilité du sol et entraîner des fissures ou une érosion localisée. Par ailleurs, le sol peut subir une contamination ponctuelle due aux fuites d'hydrocarbures et de lubrifiants provenant des équipements, ainsi qu'au dépôt de poussières industrielles et à l'accumulation de matériaux non exploités sur le site.

Dans ce cadre, **la loi n° 03-10 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable impose la préservation du sol contre toute forme de dégradation et de pollution, ainsi que la mise en œuvre de mesures préventives et la réhabilitation des sites après exploitation, notamment par la conservation adéquate de la couche de sol superficielle en vue de sa réutilisation dans la reconstitution du couvert végétal.

2. Impact sur les eaux

Les activités d'exploitation des carrières de gypse peuvent affecter les ressources en eaux superficielles et souterraines, entraînant une altération de leur qualité et une contamination progressive. Ces impacts peuvent également concerner l'homme, la faune et les écosystèmes environnants, particulièrement dans les zones situées à proximité des sites d'exploitation.

Dans ce cadre, **la loi n° 05-12 du 4 août 2005** relative à la protection et à la gestion des ressources en eau impose la réalisation d'une étude d'impact environnemental préalable à toute autorisation d'exploitation, ainsi que le respect des normes environnementales et le suivi des effets de l'activité sur les ressources hydriques.

Par ailleurs, **le décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006** fixe les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels afin de limiter les impacts sur le milieu récepteur. **L'article 3**, ainsi que son annexe II, définissent les concentrations maximales admissibles des principaux paramètres de pollution des eaux (**Tab. 2**).

Tableau 2 : Valeurs limites des principaux paramètres de pollution des eaux

Paramètre	Valeur limite autorisée	Source du polluant
Température	30°C	Utilisation des équipements industriels et rejets des eaux de lavage.
PH	Entre 5.5 et 8.5	Contact des eaux avec les matériaux exploités et les résidus de traitement.
DCO (Demande Chimique en Oxygène)	80 mg/l	Résidus industriels et eaux de lavage des équipements et des unités de concassage.
Matières décantables	0.5 mg/l	Poussières et particules fines issues du décapage, du transport et du concassage.
Plomb (Pb)	0.5 mg/l	Corrosion et usure des équipements métalliques et des pièces mécaniques.
Cadmium (Cd)	0.07 mg/l	
Chrome (Cr)	0.1 mg/l	
Cobalt (Co)	0.1 mg/l	
Cuivre (Cu)	0.1 mg/l	
Nickel (Ni)	0.1 mg/l	
Zinc (Zn)	2 mg/l	

De plus, **les articles 4 et 5** du même texte réglementaire imposent le traitement préalable des eaux usées avant leur rejet, ainsi que la réduction ou la suspension temporaire de l'activité en cas de défaillance des systèmes de traitement, afin d'éviter tout rejet non conforme susceptible d'affecter les ressources hydriques.

2.1. Pollution mécanique (physique)

La pollution mécanique des eaux résulte principalement des activités d'exploitation des carrières de gypse, notamment le décapage, le concassage et le lavage des matériaux. Ces opérations entraînent une augmentation des matières en suspension ainsi qu'une élévation de la turbidité des eaux, affectant leur qualité physico-chimique et leur équilibre écologique.

Afin de limiter ce type de pollution, plusieurs mesures techniques sont mises en œuvre :

- Mise en place de bassins de décantation pour la séparation des matières solides en suspension.
- Utilisation de flocculants afin d'améliorer la sédimentation des particules fines.
- Recyclage des eaux de lavage dans un système fermé au sein des unités de traitement et de concassage.

2.2. Pollution chimique

La pollution chimique est principalement liée aux fuites d'huiles, d'hydrocarbures et aux substances issues du fonctionnement et de la maintenance des équipements industriels.

Conformément au **décret exécutif n° 93-161** du 10 juillet 1993 relatif à la protection des eaux contre les rejets d'huiles et de lubrifiants, notamment ses **articles 2 et 3**, le rejet des huiles et hydrocarbures dans les milieux aquatiques ou dans les réseaux d'assainissement est strictement interdit. Ces substances constituent des polluants persistants, perturbant les échanges gazeux au niveau des milieux aquatiques et compromettant les processus de traitement biologique. De plus, les huiles usées, notamment les huiles de moteurs et les huiles isolantes, présentent un risque élevé de contamination des nappes phréatiques.

Afin de limiter ce type de pollution, les mesures suivantes sont adoptées :

- Installation de séparateurs d'huiles et d'hydrocarbures.
- Contrôle rigoureux du stockage des substances polluantes sur site.
- Prévention des infiltrations vers les sols et les eaux souterraines.

3. Impact Sur l'air

3.1. Émissions de poussières

Les émissions de poussières dans les carrières sont soumises à la réglementation algérienne, notamment au **décret exécutif n° 06-138**, qui fixe les valeurs limites des rejets de particules et impose aux exploitants de mettre en œuvre des mesures visant à réduire la pollution.

3.1.1. Poussières liées à l'extraction :

Les opérations de décapage, d'extraction mécanique (**Fig. 22-A**), de foration (**Fig. 22-B**), et de tir de mine (**Fig. 22-C**), génèrent d'importantes quantités de poussières. Ces activités entraînent la libération de particules fines qui se dispersent dans l'air sous l'effet des conditions climatiques, notamment le vent, pouvant ainsi affecter la qualité de l'air aux alentours du site. Afin de limiter ces émissions, des techniques telles que le forage humide, l'utilisation de systèmes d'aspiration ou encore l'emploi d'additifs antipoussières peuvent être mises en œuvre.

3.1.2. Poussières liées au chargement et au transport :

Les opérations de chargement (**Fig. 22-D**), et de transport (**Fig. 22-E**), constituent une source majeure de poussières diffuses. Ces émissions sont encadrées par les normes de qualité de l'air ambiant issues de **l'article 3** et de l'annexe du même décret, fixant une limite de concentration de **150 µg/m³** en moyenne journalière. Selon **l'article 5**, qui oblige à confiner les rejets, le bâchage des camions et l'arrosage régulier des pistes deviennent des obligations techniques pour éviter la suspension des particules, complétées par la limitation de la vitesse à l'intérieur de carrière.

3.1.3. Poussières liées au traitement (concassage) :

Les installations de concassage (**Fig. 22-F**), représentent une source ponctuelle importante d'émission de poussières, en raison de la fragmentation mécanique des roches. Conformément à **l'article 3**, ces émissions sont soumises à des valeurs limites au point de rejet, dont la concentration ne doit pas dépasser **50 mg/Nm³**. Pour respecter ces seuils, **l'article 7** impose l'installation et l'entretien régulier de dispositifs de dépoussiérage performants tels que les filtres à manches ou les précipitateurs électrostatiques.

**A : Extraction mécanique****B : Foration****C : Tir de mine****D : Chargement****E : Transport****F : Concassage**

Figure 22 : Sources d'émission de poussières au cours des différentes étapes d'exploitation des carrières de manière générale

3.2. Émissions gazeuses

Les émissions gazeuses proviennent principalement des gaz d'échappement des engins, des camions de transport et des groupes électrogènes fonctionnant au diesel au sein de la carrière. La combustion du carburant entraîne le rejet de plusieurs polluants atmosphériques, notamment le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), les hydrocarbures (HC) ainsi que les particules solides, pouvant altérer la qualité de l'air et présenter des risques pour la santé humaine et l'environnement.

Dans ce cadre, l'**article 3** du **décret exécutif n° 03-410** du 5 novembre 2003 relatif aux émissions de fumées et de gaz provenant des moteurs diesel impose le respect des limites admissibles de l'opacité des fumées émises par les moteurs fonctionnant par allumage par compression (diesel). Le coefficient d'absorption lumineuse ne doit pas dépasser $2,5 \text{ m}^{-1}$ pour les moteurs à aspiration naturelle et $3,0 \text{ m}^{-1}$ pour les moteurs équipés d'un turbocompresseur.

Par ailleurs, l'**article 4** du même décret fixe les valeurs limites admissibles des principaux gaz et particules émis par les moteurs diesel (**Tab. 3**) utilisés dans les engins industriels et les équipements de travaux publics.

Tableau 3 : Valeurs limites des émissions des moteurs diesel des engins industriels

Type de contrôle	Polluant	Valeur limite admissible
Contrôle de conformité	Monoxyde de carbone (CO)	6 g/KM
	Hydrocarbures (HC)	1.3 g/KM
	Oxydes d'azote (NOx)	9.2 g/KM
	Particules solides	0.9 g/KM
Contrôle technique périodique	CO (sans catalyseur)	4.5 % du volume

Afin de limiter ces émissions, plusieurs mesures préventives sont mises en œuvre :

- Entretien régulier des moteurs et des équipements.
- Contrôle périodique des émissions des gaz d'échappement.
- Réduction du fonctionnement excessif et inutile des engins.
- Utilisation de carburants conformes aux normes environnementales.
- Renouvellement des équipements anciens à fortes émissions.

4. Impact sur la flore et la faune

L'exploitation des carrières à ciel ouvert engendre des perturbations notables de l'équilibre environnemental, en affectant directement la flore et la faune. Les opérations de décapage

entraînent la destruction de la couverture végétale, conduisant ainsi à la perte des habitats naturels de nombreuses espèces. De plus, l'utilisation d'engins lourds ainsi que les travaux de foration et de tir de mine provoquent des nuisances qui perturbent la faune, pouvant entraîner sa migration ou sa disparition de la zone.

Par ailleurs, les végétaux sont affectés par le dépôt de poussières sur leurs feuilles, ce qui entrave le processus de photosynthèse et entraîne une diminution de leur croissance et de leur productivité. En outre, la dégradation des sols liée à l'exploitation limite leur capacité de régénération naturelle. L'ensemble de ces impacts se traduit par une régression de la biodiversité et un déséquilibre de l'écosystème. Toutefois, ces effets peuvent être atténués par la mise en œuvre de mesures de réhabilitation, telles que le reboisement et la restauration des terrains dégradés.

5. Impact sur le paysage

L'exploitation des carrières à ciel ouvert engendre des modifications profondes du paysage, notamment par le déplacement de grandes quantités de matériaux lors du décapage. Les opérations de foration et de tir de mine entraînent la formation d'excavations visibles et de fronts de taille abrupts, altérant ainsi la morphologie naturelle du site. Par ailleurs, les phases de chargement et de transport contribuent à l'accumulation de stériles sous forme de terrils ainsi qu'à la multiplication des pistes de circulation, ce qui accentue le caractère artificiel du milieu. L'ensemble de ces transformations se traduit par une dégradation marquée du paysage, caractérisée par l'absence de couverture végétale, la présence de pentes accentuées et l'accumulation de matériaux. Toutefois, ces impacts peuvent être atténués par la mise en œuvre de mesures appropriées de réhabilitation et de remise en état des lieux (**Fig. 23**).

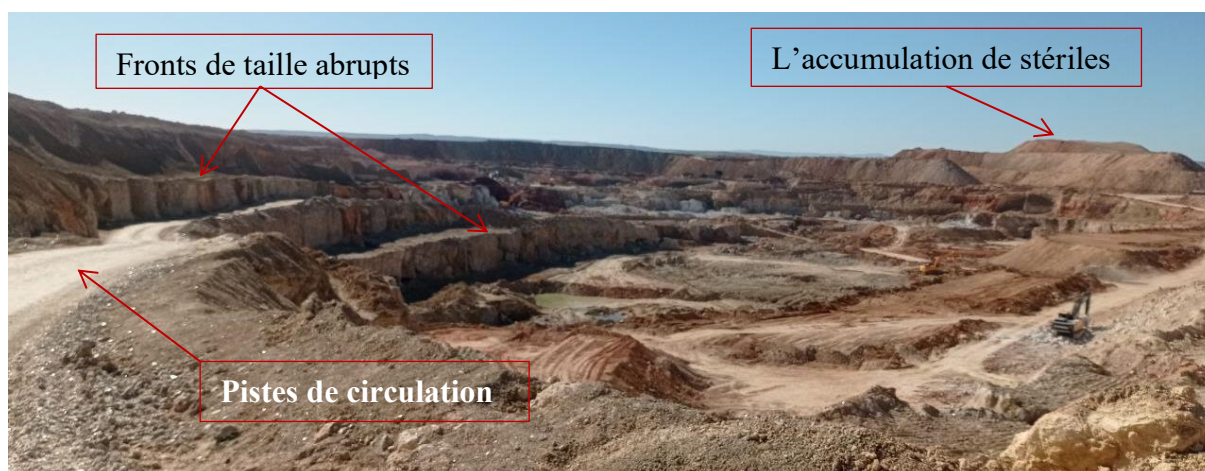


Figure 23 : Impact de l'exploitation de la carrière sur le paysage

6. Nuisances sonores

L'exploitation des carrières constitue l'une des principales sources de pollution sonore, en raison des opérations mécaniques intensives qu'elle implique, telles que le forage, le tir de mine, le concassage et le transport. Ces activités génèrent des niveaux élevés de bruit pouvant dépasser les seuils admissibles, ce qui entraîne des effets négatifs sur la santé humaine, notamment des troubles auditifs et psychologiques, ainsi que des nuisances pour les populations riveraines et un impact sur la faune.

Dans ce cadre, le **décret exécutif n° 93-184 du 27 juillet 1993** vise à réglementer les émissions sonores et à protéger la santé publique. Les **articles 2 et 3** fixent les seuils maximaux de bruit selon la nature des zones et les périodes de la journée : dans les zones résidentielles, le niveau sonore ne doit pas dépasser **70 dB** en période diurne (6 h à 22 h) et **45 dB** en période nocturne (22 h à 6 h), tandis que dans les zones sensibles, notamment les établissements de santé et d'enseignement, ces seuils sont réduits à **45 dB** en période diurne (6 h à 22 h) et **40 dB** en période nocturne (22 h à 6 h).

Par ailleurs, les **articles 6 et 9** du même décret imposent aux exploitants de carrières de mettre en œuvre des mesures techniques et organisationnelles visant à réduire le bruit, notamment par l'équipement des machines, telles que les moteurs à combustion interne, les marteaux pneumatiques, les groupes électrogènes et les compresseurs d'air, avec des dispositifs d'insonorisation ou d'atténuation du bruit, tout en respectant les normes environnementales en vigueur. En cas de non-respect de ces dispositions, des sanctions administratives pouvant aller jusqu'à la suspension de l'activité peuvent être appliquées.

Dans le cas étudié, les agglomérations se situent à des distances variables du site d'exploitation : le **douar El Menatsia** à environ 2,5 km, la zone **d'El Gatni** à 4,5 km, et **Boufatis** ainsi que **Ben Freha** à environ 5,5 km. Ces distances contribuent à réduire l'intensité du bruit avant qu'il n'atteigne les habitants, notamment pour les activités de dynamitage et de concassage. Toutefois, le respect des seuils réglementaires ne peut être confirmé qu'à travers des mesures sur le terrain ou une modélisation acoustique.

Afin de limiter les impacts négatifs, les mesures suivantes peuvent être envisagées :

- L'installation de barrières acoustiques
- La maintenance régulière des équipements afin de réduire le bruit mécanique
- L'organisation des horaires de travail de manière à éviter les périodes nocturnes

- La mise en place de ceintures végétales constituant des barrières naturelles à la propagation du bruit.

7. Vibrations

Les vibrations dans les carrières de gypse résultent principalement des opérations de tir de mine, ainsi que des travaux de foration et du déplacement des engins lourds au sein du site d'exploitation. Ces vibrations se propagent à travers les sols et les roches vers les zones environnantes, avec une atténuation progressive de leur intensité en fonction de la distance par rapport à la source.

Ces vibrations se manifestent principalement sous forme de vibrations terrestres se propageant dans le sol et les formations rocheuses, ainsi que sous forme de surpression aérienne générée par les tirs de mine et se propageant dans l'air. Elles se propagent également sous forme de différentes ondes, notamment les ondes de compression (ondes P), les ondes de cisaillement (ondes S) et les ondes de Rayleigh, qui se propagent à la surface du sol et sont les plus impactantes pour les structures avoisinantes.

Ces phénomènes peuvent entraîner des fissures au niveau des infrastructures et des routes proches, ainsi que des nuisances pour les populations riveraines. Ils peuvent également affecter la stabilité des sols et perturber certains éléments de l'environnement. Par ailleurs, les vibrations peuvent influencer la faune en provoquant des perturbations de leurs habitats naturels et en entraînant leur déplacement vers des zones plus calmes.

Afin de limiter ces impacts, plusieurs mesures sont adoptées, notamment :

- Le respect des distances de sécurité par rapport aux zones habitées et aux infrastructures sensibles.
- Le contrôle de l'intensité des tirs et la réduction de la quantité d'explosifs utilisée lorsque cela est possible.
- La maintenance régulière des équipements de foration et des engins utilisés sur le site.
- La surveillance des vibrations générées à l'aide d'appareils de mesure spécialisés.
- L'organisation des horaires de tir et d'exploitation afin de réduire les nuisances pour les populations riveraines.

8. Impact sur la santé et sécurité

8.1. Mesures de sécurité lors du tir de mine

Les opérations de tir de mines constituent l'une des phases les plus dangereuses dans l'exploitation des carrières, en raison des multiples risques qu'elles peuvent engendrer et qui affectent la sécurité des travailleurs, des installations ainsi que l'environnement environnant, tels que les projections de roches (flyrock) et les vibrations du sol. Elles peuvent également entraîner des explosions non contrôlées, la présence de trous ratés, ainsi que l'éventuel effondrement ou l'instabilité des fronts rocheux. C'est pourquoi il est nécessaire de respecter strictement les mesures de prévention et les procédures de sécurité.

Conformément aux **articles 37 et 38 du décret présidentiel n° 90-198**, les tirs de mines ne peuvent être réalisés qu'après l'élaboration d'une étude de sécurité validée par les services compétents des mines. Cette étude comprend notamment le plan de tir ainsi que l'ensemble des mesures préventives associées. L'opération doit être exécutée sous la responsabilité d'un préposé au tir disposant d'une autorisation valide, et assumant la responsabilité directe du déroulement du tir.

Avant l'exécution du tir, la zone de danger est entièrement évacuée afin d'éloigner les travailleurs et les engins. Des signaux d'alerte clairs et préalables sont également déclenchés pour prévenir toute présence humaine à proximité du site. L'accès à la zone de tir est strictement interdit pendant l'opération ainsi qu'après celle-ci, jusqu'à la levée officielle des restrictions.

Après le tir, une inspection minutieuse du chantier est effectuée afin de détecter toute anomalie ou la présence éventuelle de trous ratés, susceptibles de représenter un danger en cas de réactivation accidentelle. La stabilité du front de taille est également vérifiée avant la reprise des travaux.

Le préposé au tir est en outre responsable de l'inventaire des explosifs utilisés et de la restitution des quantités non consommées, conformément aux procédures réglementaires en vigueur. En cas de non-respect de ces dispositions, les sanctions prévues par le même décret sont appliquées.

8.2. Santé et prévention

Il est fréquent que dans le secteur minier des maladies peuvent affectées les travailleurs surtout ceux qui sont exposés directement aux engins et aux sites de traitement. Des mesures de préventions doivent être appliquées afin de réduire ces impacts (**Tab. 4**).

Tableau 4 : Maladies professionnelles liées aux activités d'exploitation et les mesures de prévention appliquées.

Maladie	Cause	Mesures de prévention
Troubles respiratoires	Résultent de l'inhalation des poussières en suspension et des gaz émis lors des opérations d'exploitation, provoquant une irritation du système respiratoire et des difficultés respiratoires.	• Port de masques de protection. • Arrosage des pistes pour réduire la poussière. • Maintenance régulière des engins et équipements afin de limiter les émissions de gaz polluants. • Surveillance de la concentration des poussières dans l'air.
Silicose	Maladie pulmonaire due à l'inhalation de poussières de silice cristalline (SiO ₂).	
Perte auditive	Résulte d'une exposition prolongée au bruit généré par les engins lourds et les équipements d'exploitation	• Port de protections auditives. • Maintenance régulière des équipements. • Réduction du bruit à la source lorsque possible.
Troubles visuels	Résultent de l'exposition des yeux aux poussières fines en suspension dans la carrière	• Port de lunettes de protection. • Limitation de la dispersion des poussières sur le site.

IV. GESTION DES REJETS MINIERS

1. Classification des rejets dans la carrière de Fleurus :

Dans la carrière de Fleurus, où est exploitée la matière gypseuse, les rejets solides résultent directement des différentes étapes d'extraction et de traitement du gypse. On distingue principalement les types suivants :

1.1. Les stériles francs de découverte :

Ils correspondent aux couches qui recouvrent le gisement de gypse et qui sont enlevées afin d'accéder à la matière utile. Ces matériaux sont généralement réutilisés dans les opérations de remblayage et de réaménagement du site.

1.2. Résidus d'exploitation :

Ils regroupent les fragments de gypse ou les roches associées qui ne répondent pas aux exigences d'utilisation. Ces matériaux sont généralement séparés et stockés au sein de la carrière.

1.3. Résidus de traitement :

Ils proviennent des opérations de concassage et de criblage du gypse, où les matériaux sont classés selon leur granulométrie. Les fractions non conformes peuvent être orientées vers d'autres usages ou commercialisées, contribuant ainsi à la réduction des déchets.

2. Cadre réglementaire de la gestion des déchets miniers**Décret exécutif n° 05-315 du 10 septembre 2005 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux**

La présence potentielle de déchets spéciaux dangereux, tels que les huiles usagées issues de l'utilisation des équipements, implique pour l'exploitant de se conformer aux exigences réglementaires en matière de déclaration. Ainsi, il est tenu de déclarer ces déchets en précisant leur nature, leur quantité et leur origine (art. 2), dans un délai n'excédant pas trois mois, selon des modalités définies et transmises aux autorités concernées (art. 3 et 4), afin d'assurer leur suivi et de limiter leur impact sur l'environnement.

Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets

Les articles 6 à 11 consacrent un ensemble d'obligations incombant au producteur de déchets, lesquelles s'appliquent, dans le cadre de l'exploitation des carrières, à l'exploitant en tant que producteur de déchets. Ces dispositions imposent la réduction des déchets à la source, leur gestion dans le respect des exigences environnementales, la valorisation lorsque cela est possible, ainsi que l'interdiction de leur élimination anarchique. Elles prévoient également la nécessité de séparer les différents types de déchets, notamment les déchets dangereux, afin de mieux maîtriser leurs impacts sur l'environnement.

Décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux :

L'article 2 prévoit la classification des déchets en différentes catégories selon leur degré de dangerosité (**Tab. 5**).

Tableau 5 : Nomenclature et classification réglementaire des déchets

Type de déchet	Classe	Caractéristiques	Mode de gestion
Déchets inertes	I	Non réactifs, impact faible	Réutilisation ou remblayage
Déchets ménagers et assimilés	MA	Non dangereux	Collecte et traitement classique
Déchets spéciaux	S	Potentiellement polluants	Traitement spécifique
Déchets dangereux	SD	Toxiques / inflammables	Traitement strict et confinement

CHAPITRE III

Remise en état des lieux

I. INTRODUCTION

La remise en état des carrières constitue une composante essentielle de la gestion environnementale des activités minières, visant à réduire les impacts de l'exploitation et à restaurer les sites dégradés dans une perspective de stabilité écologique et paysagère. Elle s'inscrit dans un cadre réglementaire et technique qui impose l'intégration des mesures de réhabilitation dès la conception des projets et tout au long de leur cycle de vie.

Dans cette perspective, ce chapitre traite le cadre réglementaire et institutionnel de la remise en état des sites miniers, ainsi que des différents types de réhabilitation appliquées. Il présente également les étapes de réaménagement de la carrière de Fleurus, appuyées par une simulation de l'évolution au futur du site suite à une remise en état graduelle programmée à l'extrémité occidentale de la carrière, avant de proposer un exemple comparatif illustrant une opération réussie de réhabilitation environnementale réalisée au site de Menatsia.

II. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL DE LA REMISE EN ETAT DES SITES MINIERES

1. Cadre législatif de la remise en état

Le cadre juridique régissant la remise en état des sites miniers en Algérie est défini par la loi **n° 25-12 du 3 août 2025** relative aux activités minières, qui impose un ensemble d'obligations environnementales aux exploitants afin d'assurer la protection et la restauration des sites après exploitation.

Selon les articles 142 et 143, l'exploitant doit élaborer et mettre en œuvre un plan de remise en état, tout en assurant un suivi régulier et la présentation de rapports attestant du respect des mesures environnementales adoptées.

Selon l'article 149, l'exploitant est tenu de réaliser les travaux de remise en état du site à ses frais, immédiatement après l'expiration du titre d'exploitation.

Selon l'article 195, tout exploitant ne respectant pas les opérations de remise en état est passible de sanctions pénales allant de six (6) mois à deux (2) ans d'emprisonnement, ainsi que d'une amende comprise entre 500 000 et 2 000 000 dinars algériens.

2. Rôle de l'ANAM dans la remise en état

Dans le cadre de la réglementation des activités minières en Algérie, l'Agence Nationale des Activités Minières **ANAM** édicte un ensemble de directives relatives à la remise en état des sites exploités. Celles-ci imposent à l'opérateur minier l'élaboration d'un plan de restauration des zones affectées, intégré dans la gestion de l'après-mine, ainsi qu'un suivi rigoureux des différentes phases de mise en œuvre dans le respect des délais approuvés. Elles prévoient également des opérations de stabilisation des terrains conformément aux prescriptions validées dans le dossier d'exploitation, avec la possibilité de libération progressive des superficies remises en état après validation des travaux réalisés.

Par ailleurs, en cas de non-respect des obligations environnementales et réglementaires, des mécanismes de contrôle et de sanctions peuvent être appliqués, incluant, le cas échéant, une intervention des autorités compétentes afin d'assurer la remise en état des sites, exécutée aux frais de l'opérateur défaillant.

3. Compte séquestre

Le compte séquestre constitue une provision financière obligatoire destinée à garantir la remise en état des sites miniers après l'exploitation. Il est ouvert auprès du Trésor public au nom du titulaire du permis minier. L'exploitant est tenu de constituer annuellement cette provision afin de couvrir les coûts de restauration des sites ainsi que la gestion des impacts environnementaux liés à l'après-exploitation. Le montant et les modalités de cette contribution sont fixés par l'**ANAM**, en fonction de la nature de l'activité et de l'ampleur des impacts environnementaux de chaque site, garantissant ainsi la disponibilité des fonds nécessaires à la réalisation des opérations de remise en état, de manière progressive ou finale.

III. TYPES DE REMISE EN ETAT

1. Remise en état finale (après fermeture)

La remise en état finale du site intervient après la fermeture complète de la carrière et l'arrêt de toutes les activités d'extraction, dans le but de restaurer le sol, la topographie, la couverture végétale et l'écosystème. Elle se caractérise par une réalisation globale en une seule phase sur l'ensemble du site, ce qui nécessite un budget important ainsi que des garanties financières préalables pour assurer son exécution. Cette approche est généralement appliquée aux sites de

petite taille, aux projets de courte durée, ainsi qu'aux zones présentant une topographie difficile ou des pentes fortes ne permettant pas une réhabilitation progressive durant l'exploitation.

Cependant, la réalisation de cette méthode comporte plusieurs risques potentiels, parmi lesquels :

- L'accumulation de zones découvertes pendant de longues périodes, ce qui peut augmenter l'érosion, la perte de couverture végétale et la pollution de l'eau.
- La difficulté de contrôler la stabilité du sol et des pentes lors de la réhabilitation de l'ensemble du site en une seule fois.

2. Remise en état continue (simultané)

Cette méthode se réalise parallèlement aux opérations d'extraction, où les travaux sont répartis en plusieurs phases afin de faciliter les interventions sur le terrain, et ce dans le but de réduire les impacts environnementaux ainsi que l'accumulation des surfaces rocheuses dénudées. Elle est particulièrement appliquée dans les sites de grande taille à topographie stable, où le contrôle des pentes et des sols est effectué progressivement, accompagné du développement harmonieux du couvert végétal.

3. La remise en état progressive

C'est le model adopté à la carrière de Fleurus et consiste à réhabiliter le site progressivement au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'extraction, en traitant les zones déjà exploitées et devenues inactives, afin d'assurer un équilibre entre l'exploitation et la réhabilitation et de réduire progressivement les impacts environnementaux.

Cette approche permet également une meilleure intégration du site dans son environnement naturel ainsi qu'un suivi continu de son évolution géotechnique et écologique. Elle est généralement adaptée aux carrières de moyenne et grande taille organisées en secteurs successifs, et constitue une solution intermédiaire entre la remise en état simultanée et finale.

IV. LES ETAPES DE LA REMISE EN ETAT DE LA CARRIERE DE FLEURUS

1. Planification de la remise en état

Cette planification constitue une étape essentielle dans la gestion environnementale des carrières. Elle intervient dès les premières phases du projet et s'appuie sur les exigences législatives et réglementaires visant à limiter les impacts de l'exploitation sur l'environnement.

À l'issue des travaux d'extraction, l'arrêt de l'activité laisse souvent des modifications importantes du milieu naturel, notamment au niveau du relief, des sols, du couvert végétal et du paysage. Dans ce contexte, la remise en état devient nécessaire afin de restaurer la stabilité du site, réduire les risques environnementaux et assurer sa réintégration dans son environnement naturel.

Dans la carrière de Fleurus, les travaux de la remise en état ont été lancés à la suite de l'arrêt des travaux exploitation du gypse dans une partie de la carrière après l'apparition d'une nappe phréatique à une profondeur d'environ 84 m. La présence de cette nappe a constitué une contrainte technique limitant la poursuite des opérations d'extraction dans ce secteur, ce qui a conduit à l'arrêt de l'activité extractive et au lancement des travaux de remise en état (**Fig. 24**).



Figure 24 : Apparition de la nappe phréatique au niveau 84 mètres à la carrière de Fleurus

Parallèlement, une remise en état progressive a été adoptée. Ces travaux ont été réalisés de manière graduelle, au fur et à mesure de l'avancement de l'exploitation, suivant une direction allant du NW vers SE (**Fig. 25**).



Figure 25 : Remise en état progressive en parallèle des travaux d'exploitations

2. Travaux de terrassement

2.1. Talutage des gradins du front de taille

L'adoucissement des pentes constitue une étape fondamentale dans la remise en état de la carrière de Fleurus, visant à transformer les fronts rocheux abrupts issus de l'exploitation en talus stables et sécurisés, permettant leur intégration dans le milieu naturel. Cette opération consiste à réduire les angles de pente d'une configuration quasi verticale vers des inclinaisons adaptées aux conditions géotechniques du massif rocheux, généralement inférieures à 45° , pouvant atteindre des rapports d'un tiers dans les matériaux meubles (Lansiart et Odent, 1999), tout en remodelant les arêtes supérieures et en atténuant le caractère géométrique des fronts, à l'aide de moyens mécaniques tels que les bulldozers équipés de ripper et les pelles hydrauliques, et en recourant, dans les cas de fronts rocheux élevés, aux tirs de mine de réaménagement pour faciliter le remodelage.

Elle comprend également le déroctage des parties instables ainsi que la redistribution des stériles afin de former des pentes régulières et des banquettes de faible largeur, contribuant à la stabilisation des sols et à la limitation de l'érosion. L'ensemble de ces travaux permet d'améliorer la stabilité globale du site et de préparer une surface favorable à la mise en place de la couverture végétale, assurant ainsi une réintégration environnementale durable du site réhabilité (Fig. 26).

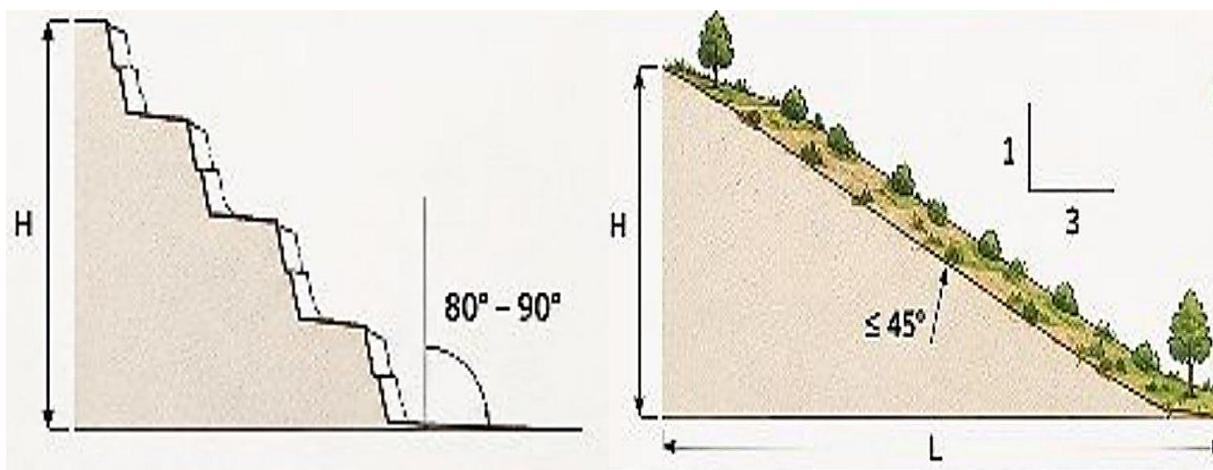


Figure 26 : Schéma de talutage des gradins du front de taille (Source internet)

2.2. Remblayage

Au niveau de la carrière de Fleurus, le remblayage consiste à combler les vides à l'aide de matériaux stériles issus de l'exploitation comme le montre la figure ci-dessous (**Fig. 27**).

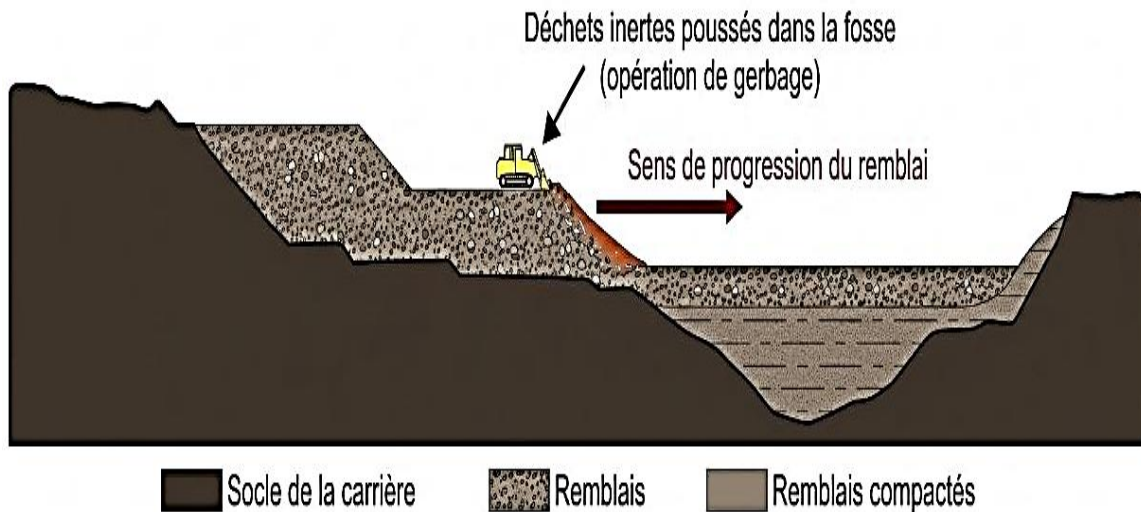


Figure 27 : Schéma illustrant le principe du remblayage par couches successives

Cette opération est réalisée de manière progressive sous forme de couches successives avec compactage de chaque couche, afin d'assurer la stabilité du sol et de limiter les phénomènes de tassement. Par ailleurs, une mise en place progressive des matériaux est adoptée, notamment au niveau des gradins, ce qui garantit une répartition homogène et réduit les risques de glissement. De plus, l'intégration d'éléments drainants tels que les graviers et les roches concassées contribue à prévenir l'accumulation des eaux et à maintenir la stabilité du site (**Fig. 28**).



Figure 28 : Photo de terrain illustrant l'opération de remblayage dans la carrière de Fleurus

Dans ce cadre, la perméabilité de la zone remblayée doit être suffisante pour permettre la circulation naturelle des eaux souterraines et le maintien du battement de la nappe phréatique, sans modification de la surface piézométrique. En cas de présence de matériaux à faible perméabilité, notamment les matériaux argileux, un système de drainage adapté doit être mis en place afin d'assurer une bonne évacuation des eaux et d'éviter leur stagnation.

2.3. Nivellement

Cette opération consiste à améliorer la régularité de la surface du terrain après remblayage, en réduisant les différences entre les altitudes et en atténuant la pente des talus. Elle est réalisée à l'aide d'équipements mécaniques tels que les niveleuses, avec l'aménagement d'une légère pente permettant d'assurer l'écoulement des eaux, ce qui contribue à renforcer la stabilité du sol de manière efficace (**Fig. 29**).



Figure 29 : État final de la surface après nivellement dans la carrière de Fleurus

2.4. Apport et préparation de la terre végétale

2.4.1. Préparation mécanique du support (sous-solage)

Avant la mise en place de la terre végétale, le support peut faire l'objet d'une préparation mécanique profonde appelée sous-solage. Cette opération consiste à décompacter les sols fortement tassés par l'utilisation des engins lourds lors de l'exploitation, à l'aide d'équipements tels que le ripper. Elle permet d'améliorer la perméabilité du sol, son aération et de faciliter la pénétration des racines lors des étapes ultérieures de la remise en état.

2.4.2. Épandage de la terre végétale

Après la préparation du support, la terre végétale préalablement stockée peut être épandue sur la surface du site. Cette couche, généralement comprise entre 15 et 30 cm d'épaisseur, est riche en matière organique, en micro-organismes et en éléments nutritifs. Son apport vise à recréer un milieu fertile favorable au développement du couvert végétal (**Fig. 30**).



Figure 30 : Mise en place de la terre végétale dans la carrière de Fleurus

2.4.3. Amélioration et fertilisation du sol

Après l'épandage, des améliorations peuvent être apportées au sol afin d'augmenter sa fertilité et d'optimiser ses propriétés physico-chimiques. Cela se fait par l'ajout de matières organiques ou minérales permettant de corriger les déficiences en éléments nutritifs et de stimuler l'activité biologique du sol. Des techniques de fertilisation biologique, telles que l'inoculation mycorhizienne (champignons racinaires en symbiose avec les racines des plantes, facilitant l'absorption de l'eau et des nutriments), peuvent également être utilisées afin de renforcer la capacité d'adaptation des plantes aux conditions difficiles.

3. Revégétalisation

Après l'épandage de la terre végétale, une opération de travail superficiel du sol est réalisée afin de travailler la couche superficielle sur une profondeur d'environ 15 à 20 cm. Cette intervention a pour objectif de décompacter les agrégats de sol, d'améliorer l'aération et de

favoriser une meilleure structuration physique du substrat, garantissant ainsi la mise en place d'un milieu homogène et favorable au développement végétal. Une fois ce lit de semence correctement préparé, la phase biologique de revégétalisation est engagée par l'implantation du couvert végétal, soit par semis direct, soit par plantation, ou encore par l'ensemencement hydraulique, notamment dans les zones à fortes pentes ou à conditions difficiles (**Fig. 31**).

Ces différentes opérations contribuent conjointement à la stabilisation des sols grâce au développement du réseau racinaire des végétaux et à la réduction de l'érosion, à l'amélioration de l'intégration paysagère par la diminution des impacts visuels liés à l'exploitation minière, ainsi qu'à la restauration de la biodiversité par la création d'un nouvel écosystème favorable au retour de la faune et à la stabilisation du système écologique à long terme.



Figure 31 : Plantations sur les bordures de la carrière Fleurus

3.1. État initial du site (avant exploitation)

L'étude de l'état initial du site constitue une étape essentielle dans le processus de réhabilitation écologique de la carrière, puisqu'elle permet de définir l'état de référence du milieu naturel avant le début des travaux d'exploitation. Cette analyse porte principalement sur le couvert végétal, les caractéristiques du sol ainsi que les conditions topographiques et environnementales du site. L'ensemble de ces données a servi de base pour orienter le choix des espèces végétales utilisées ultérieurement dans les opérations de revégétalisation, afin d'assurer une meilleure réintégration écologique et paysagère du site après sa réhabilitation.

Avant l'exploitation, le site présentait un couvert végétal naturel relativement stable et adapté aux conditions climatiques locales de type méditerranéen semi-aride. La flore dominante

était composée d'espèces autochtones capables de résister à la sécheresse et aux sols pauvres, telles que *Chamaerops humilis*, *Salvia dorrii*, *Tephrosia apollinea*, *Castela erecta* et Pin d'Alep. Ces espèces jouaient un rôle important dans la stabilisation des sols et le maintien de l'équilibre écologique du site. Par ailleurs, la couche superficielle du sol était relativement riche en matière organique et en micro-organismes, offrant ainsi un milieu favorable au développement naturel de la végétation (Fig. 32).



Figure 32 : Flore initiale du site avant exploitation

3.2. Choix des espèces végétales

Le choix des espèces végétales a été effectué sur la base des résultats de l'étude de l'état initial du site, afin de garantir leur adéquation avec les caractéristiques environnementales locales et d'assurer l'efficacité du processus de revégétalisation. L'accent a été mis sur des espèces locales et adaptées au milieu, en raison de leur capacité d'adaptation et de leur résistance aux conditions naturelles du site.

Dans ce cadre, le Pin d'Alep a été retenu pour son rôle efficace dans la stabilisation des sols et la réduction de l'érosion. L'olivier a également été choisi pour sa forte résistance à la sécheresse et sa capacité à s'adapter aux milieux pauvres. De plus, le Pistachier de l'Atlas constitue une espèce d'intérêt écologique majeur, contribuant à la stabilisation du couvert végétal et à la pérennité de l'écosystème (Fig. 33).

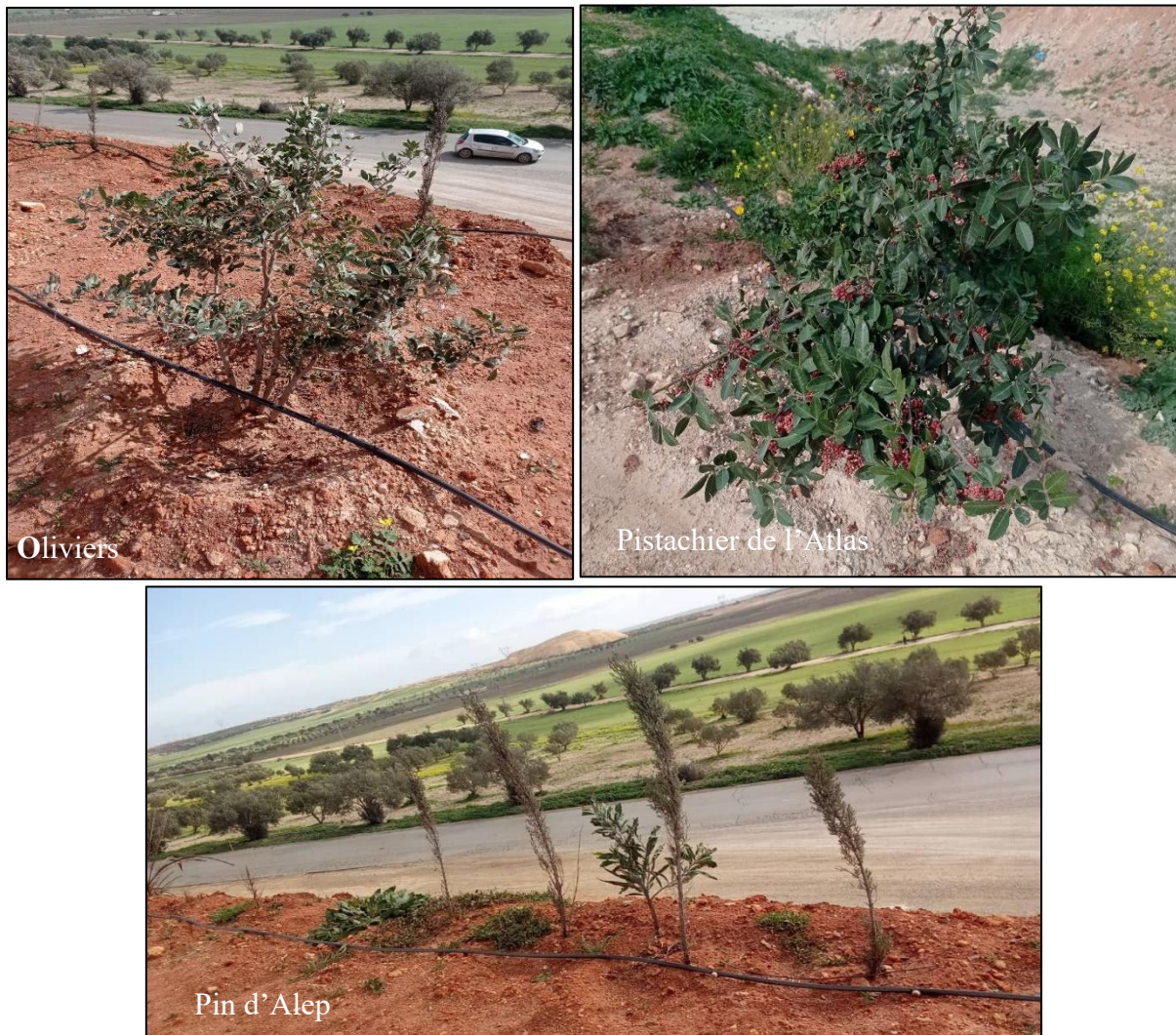


Figure 33 : Espèces végétales utilisées pour la revégétalisation

Dans ce contexte, deux principales méthodes sont envisagées pour la production et la mise à disposition de ces espèces végétales.

3.2.1. Production des espèces végétales en pépinière

La pépinière appartenant à la société Knauf a été créée en janvier 2025 dont le but est la production de plantes destinés aux travaux de réhabilitation environnementale des carrières. Elle dispose d'une capacité de production estimée à environ 30 000 plantes par an, sélectionnés sur la base des résultats de l'étude de l'état initial du site, en tenant compte des caractéristiques climatiques, de la nature du sol et des conditions environnementales locales, afin de produire des espèces adaptées au milieu naturel de la carrière (**Fig. 34**).



Figure 34 : Photos montrant la structure de la pépinière de Knauf

Les espèces végétales produites au sein de cette pépinière sont les suivantes (**Fig. 35**) :

- Caroubier (*Ceratonia siliqua*)
- Pin d'Alep (*Pinus halepensis*)
- Casuarina (*Casuarina sp.*)
- Adenium obesum
- Thuya De Berbérie (*Tetraclinis articulata*)
- Jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*)
- Tamarix (*Tamarix sp.*)



A : Caroubier



B : Pin d'Alep



C : Casuarina



• **D : Adenium obesum**

**E : Thuya De Berbérie****F : Jacaranda****G : Tamarix****Figure 35 : Espèces végétales produites en pépinière Fleurus**

Le processus de production repose sur diverses techniques de multiplication, notamment le trempage préalable des graines dans l'eau afin de favoriser la germination, avec des durées variables selon les espèces, 3 jours pour le pin d'Alep et jusqu'à 45 jours pour le jacaranda, ainsi que le bouturage pour certaines espèces. Un substrat composé de tourbe et de sable est utilisé dans des sacs perforés à la base afin d'assurer le drainage des eaux excédentaires et de limiter la pourriture des racines.

Le développement des plants est soutenu par des traitements phytosanitaires et des apports nutritifs adaptés à la taille et au stade de développement de chaque plante. La pépinière est également équipée de dispositifs techniques comprenant des panneaux solaires pour l'éclairage (**Fig. 36**), une pompe à eau pour l'irrigation, ainsi qu'un système d'extraction d'air permettant le contrôle de l'humidité. Un filet d'ombrage vert est utilisé afin de protéger les plants contre l'exposition directe au soleil et d'améliorer les conditions de croissance (**Fig. 37**).

Enfin, la pépinière applique une technique d'acclimatation progressive, consistant à exposer progressivement les plants aux conditions extérieures sur des périodes de plus en plus longues, allant de 1 à 6 heures par semaine, afin de les préparer aux conditions climatiques du site avant leur transplantation.



Figure 36 : panneaux solaires à la place de l'énergie classique

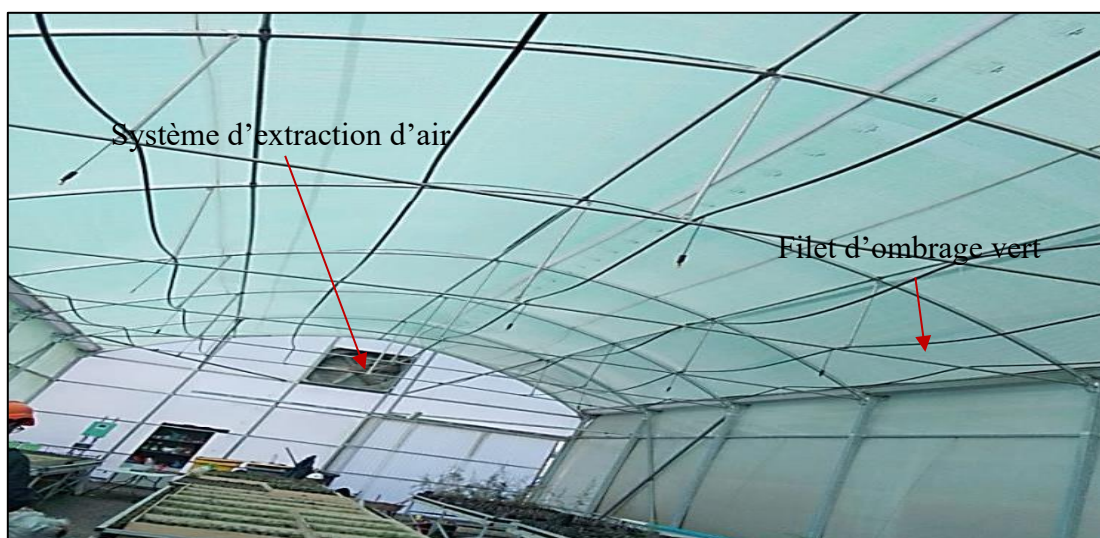


Figure 37 : Équipements techniques de la pépinière Fleurus

3.2.2. Transplantation des espèces végétales locales

La transplantation et la réintroduction des arbres adultes constituent une technique avancée de réhabilitation des carrières, visant à accélérer la reconstitution du couvert végétal grâce à l'utilisation d'arbres déjà développés, capables de contribuer directement à la stabilisation des sols après la fin de l'exploitation. Cette opération se déroule selon plusieurs étapes techniques rigoureuses afin de garantir la survie et la vitalité des individus transplantés.

La première étape correspond à la préparation et à l'élagage préalable, durant laquelle la partie aérienne de l'arbre est taillée de manière contrôlée afin de réduire l'évapotranspiration et de limiter le stress hydrique après l'arrachage. Après cette opération, les zones de coupe sont enduites d'un produit cicatrisant appelé mastic cicatrisant, possédant des propriétés antifongiques, afin de protéger les tissus végétaux contre la pourriture et de favoriser la cicatrisation des plaies. Un fossé est ensuite creusé autour de l'arbre afin de délimiter la motte racinaire et de préserver un maximum de racines fines actives.

L'étape suivante consiste en l'arrachage de l'arbre en conservant une motte de terre cohérente autour du système racinaire, laquelle est immédiatement protégée afin d'éviter sa désagrégation et son dessèchement durant le transport. Les arbres sont ensuite transférés vers une zone temporaire sécurisée située à proximité du site, où les mottes sont mises en jauge dans des fosses préparées avec un sol léger et humide. À ce stade, chaque arbre est identifié par un système de numérotation permettant son suivi sur le terrain.

Avec le temps, on observe une adaptation des arbres au milieu temporaire, accompagnée du développement de certaines herbacées autour des mottes racinaires, lesquelles assurent des conditions d'humidité favorables (**Fig. 38**).



Figure 38 : Arbres transplantés en phase de mise en jauge

À la fin de la phase d'exploitation et après les travaux de remodelage topographique et d'épandage de la terre végétale, les arbres sont réintroduits dans leurs emplacements définitifs sur les pentes ou les terrasses aménagées, généralement durant la période allant de l'automne à l'hiver afin de bénéficier de conditions climatiques favorables. Lors de la plantation finale, il est recommandé d'apporter un soutien organique ainsi qu'une inoculation mycorhizienne afin d'améliorer l'ancrage racinaire et de favoriser l'adaptation des arbres au nouveau milieu.

3.3. Mise en place du couvert végétal

L'opération vise la plantation des espèces végétales sélectionnées selon une répartition adaptée aux caractéristiques topographiques et environnementales du site. Le choix des emplacements de plantation est effectué de manière à garantir la stabilité du sol et à favoriser l'intégration du site dans son milieu naturel. Ainsi, les espèces les plus résistantes, notamment le pin d'Alep, sont installées sur les bordures des talus et les zones exposées à l'érosion, en raison de leur rôle dans la stabilisation des sols et la limitation de l'érosion, tandis que les autres espèces sont réparties dans les zones plus stables afin d'assurer une couverture végétale équilibrée. Les distances de plantation entre les plants sont également respectées afin d'éviter la concurrence directe entre eux pour l'eau et les éléments nutritifs.

Les plants sont soutenus par des tuteurs en bois afin de garantir une croissance verticale et correcte. Il est également exigé de maintenir la propreté du site de plantation et d'éviter la présence de déchets ou de matériaux susceptibles de gêner le développement des plantes ou d'affecter la fertilité du sol. Le système d'irrigation goutte à goutte est utilisé pour assurer un apport en eau régulier et efficace, en acheminant l'eau directement vers la zone racinaire. L'arrosage est programmé à des horaires précis, généralement tôt le matin ou en soirée, afin de réduire l'évaporation et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau (**Fig. 39**).

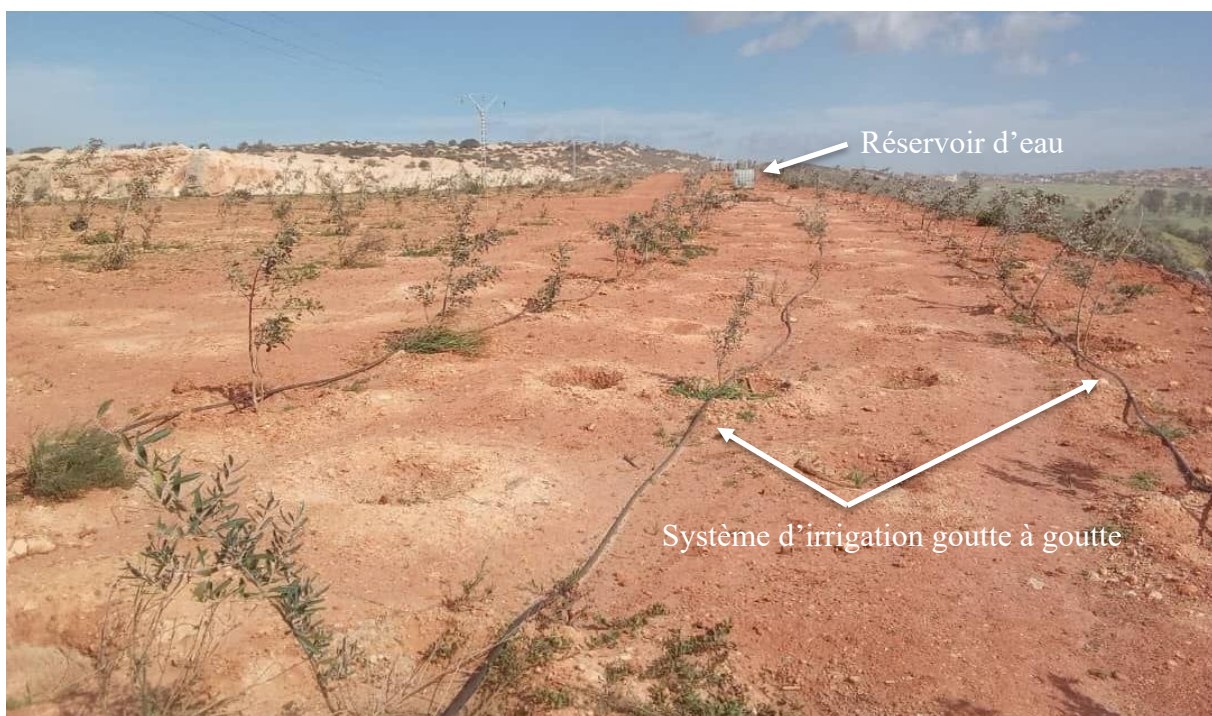


Figure 39 : Mise en place du couvert végétal et aménagement technique du site

4. Reverdissement du site

Le reverdissement constitue une étape complémentaire dans le processus de réhabilitation de la carrière, visant à recouvrir les surfaces mises à nu par une couverture végétale herbacée à croissance rapide. Cette opération permet de limiter immédiatement les phénomènes d'érosion et de ruissellement causés par le vent et les eaux pluviales, tout en contribuant à la stabilisation de la couche superficielle du sol et à la réduction des émissions de poussières.

Cette phase est réalisée en mélangeant de semences herbacées et légumineuses sur le sol préparé. Elle permet d'assurer une germination rapide et une couverture végétale initiale efficace. Le reverdissement représente ainsi une étape préparatoire essentielle qui favorise la stabilisation du milieu et facilite la réussite des opérations ultérieures de revégétalisation.

V. Remise en état graduelle de la carrière de Fleurus

1. Analyse diachronique de la carrière de Fleurus à partir des images satellitaires

En 2016, la carrière se trouvait dans une phase d'exploitation active, où l'image montre le développement des fronts d'extraction ainsi que l'apparition de pentes abruptes résultant des opérations d'exploitation du gypse et d'un réseau de pistes internes destinées à la circulation des engins (**Fig. 40**).

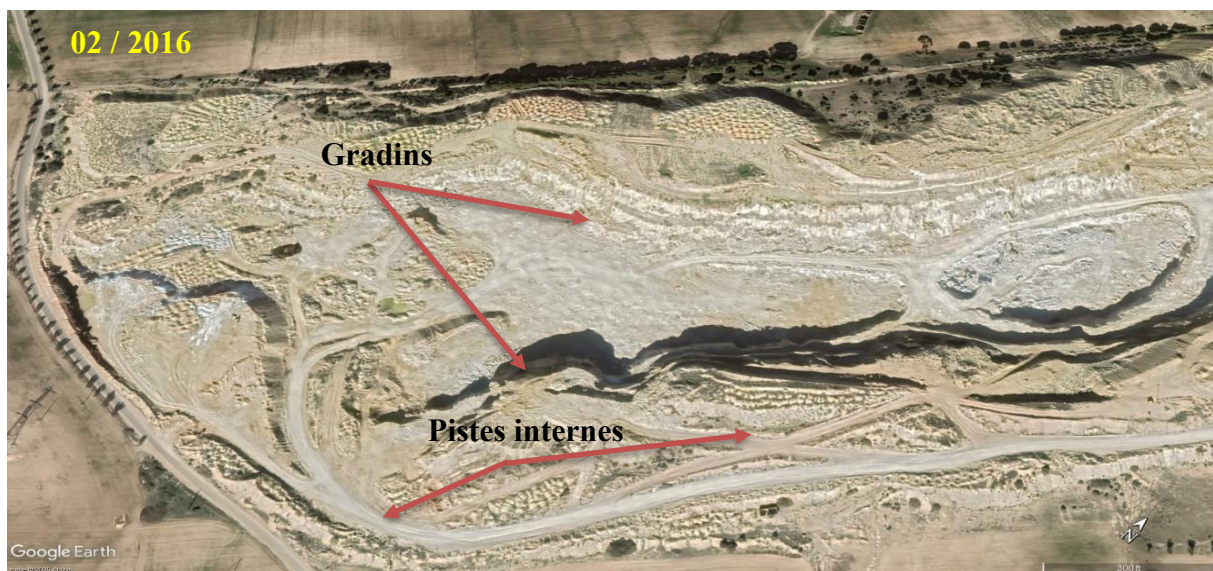


Figure 40 : Vue satellite de la phase d'exploitation active de la carrière en 2016 (Google Earth)

En 2018, il a été constaté l'apparition d'accumulations d'eau dans les parties basses du site, à la suite de l'atteinte du niveau de la nappe phréatique par les travaux d'extraction, ce qui a entraîné l'arrêt de l'activité d'exploitation dans cette zone après plusieurs tentatives (**Fig. 41**).

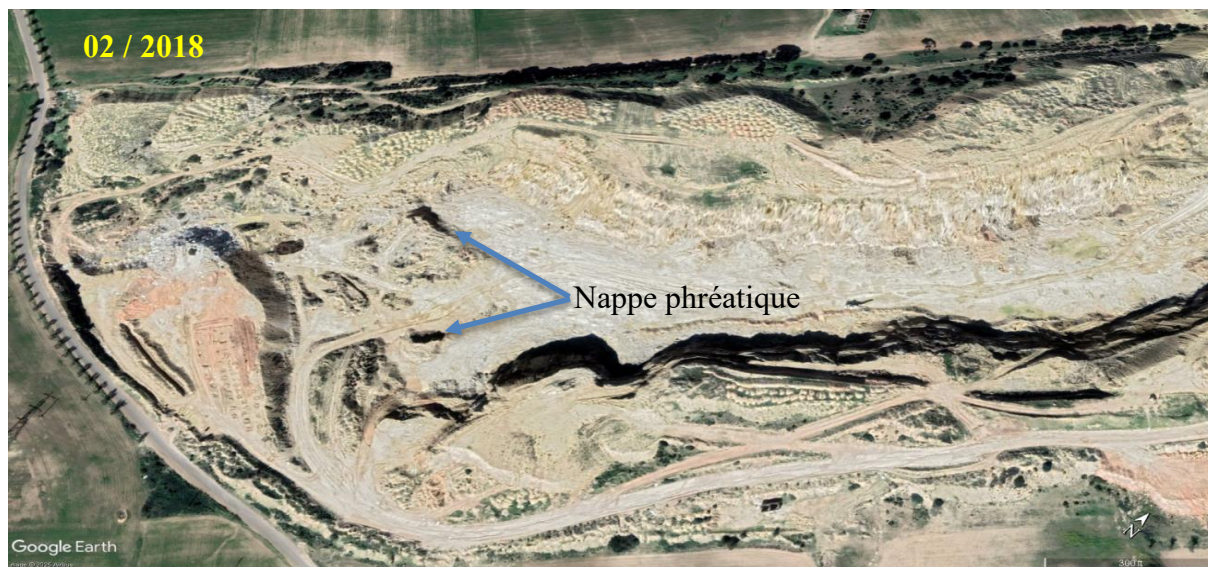


Figure 41 : Vue satellite de l'apparition des accumulations d'eau phréatique dans la carrière en 2018 (Google Earth)

En 2020, le début des travaux de remise en état de la carrière est observé, notamment à travers la réduction de la pente de certains talus et le remblayage de certaines zones affectées par les accumulations d'eau souterraine.

Par ailleurs, les travaux d'exploitation se sont légèrement déplacés vers la direction SE, en parallèle avec la remise en état progressive du site (**Fig. 42**).

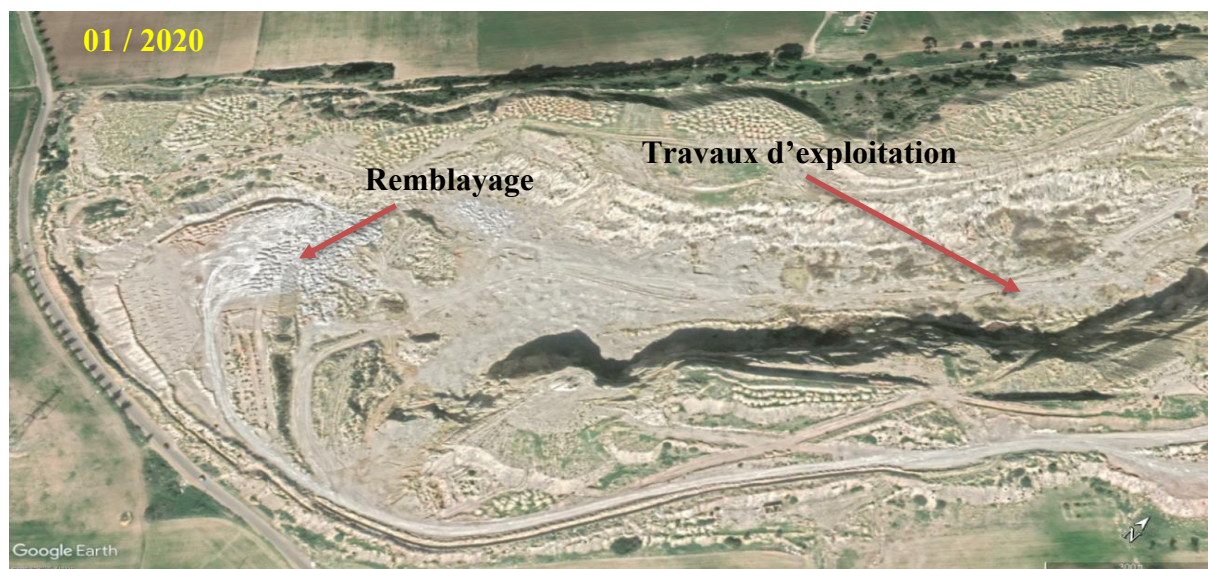


Figure 42 : Vue satellite du début des travaux de remise en état en 2020 (Google Earth)

Entre les années 2022 et de 2024, les travaux de remise en état connaissent une évolution marquée vers le SE, avec la poursuite progressive des opérations de nivellement des pentes et de remodelage du relief, ainsi qu'une extension des zones réhabilitées par rapport aux années précédentes (Fig. 43).



Figure 43 : Vue satellite de l'évolution des travaux de remise en état de la carrière

En 2025, on observe le début de la mise en place d'une couverture pédologique de sol rouge sur certaines zones déjà remblayées et remises en état, dans le cadre des opérations de revégétalisation et de stabilisation des surfaces (Fig. 44).



Figure 44 : Vue satellite du début de la mise en place d'une couverture pédologique en 2025

2. Simulation de la remise en état future de la carrière de Fleurus à l'aide de l'intelligence artificielle

Au alentours de 2028, les premiers signes réels de la réhabilitation environnementale commenceront à apparaître, avec l'installation d'un couvert végétal herbacé pionnier qui contribue à la stabilisation du sol et à sa protection contre l'érosion. On attendra également une répartition organisée des plantations d'oliviers et de caroubiers, accompagnée de jeunes jacarandas implantés dans des zones spécifiques.

Par ailleurs, les pins plantés en périphérie de la carrière joueront un rôle essentiel de brise-vent naturel et contribuent à la stabilisation du sol grâce à leur système racinaire profond, renforçant ainsi la stabilité des talus et assurant une protection durable du site (**Fig. 45**).

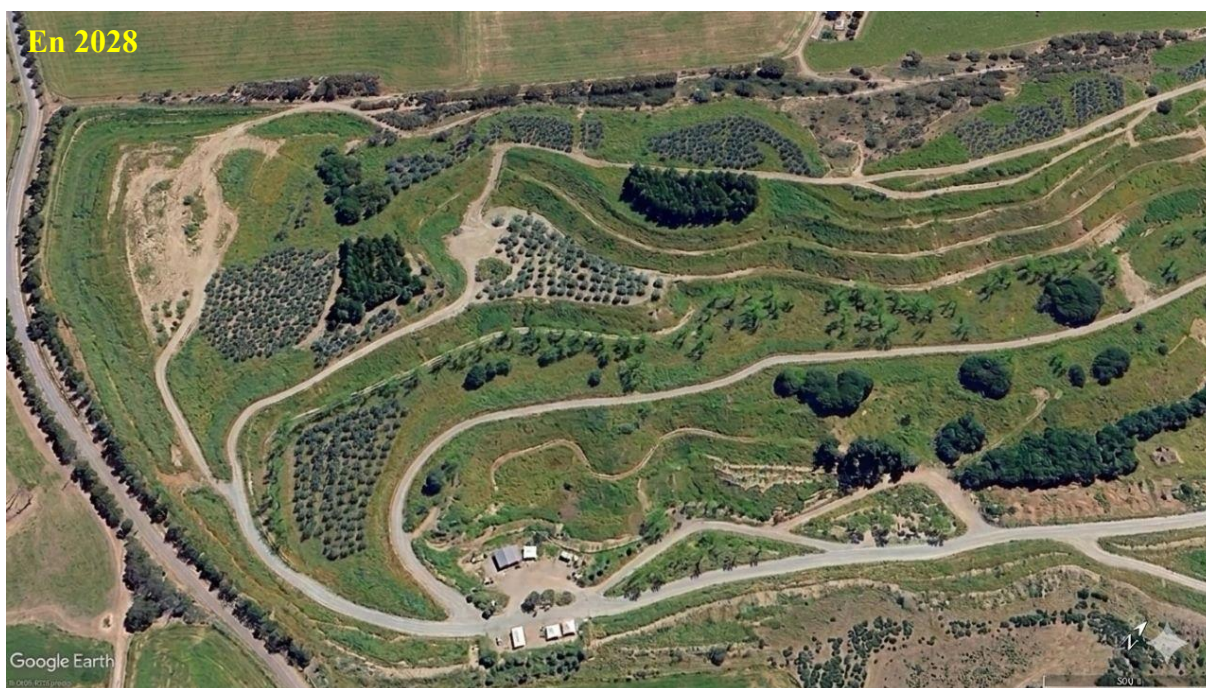


Figure 45 : Évolution de la revégétalisation d'une carrière après deux ans de réhabilitation environnementale

En 2035, le site atteindra un stade avancé de réhabilitation environnementale, caractérisé par une forte stabilité écologique après plusieurs années de mise en place. Le couvert arboré, dominé par les oliviers et les caroubiers, deviendront plus dense et mieux réparti, confirmant la stabilisation progressive de l'écosystème.

Les jacarandas arriveront à un stade quasi mature et commenceront à fleurir, apportant une diversité végétale et un intérêt paysager marqué. Cette évolution témoignera la réussite des

plantations et des opérations d'entretien ayant permis la transformation de l'ancienne carrière en un milieu plus équilibré et durable (**Fig. 46**).

Par ailleurs, une recolonisation progressive de la faune s'observera, avec le retour de plusieurs animaux et insectes comme les oiseaux, les insectes et les petits mammifères, favorisée par l'amélioration des habitats et la reconstitution du couvert végétal.



Figure 46 : Stade avancé de la réhabilitation environnementale d'une carrière après 7 ans de revégétalisation

En 2046, le système écologique atteindra un état d'équilibre stable, où le couvert végétal deviendra dense et diversifié, avec une maturité bien marquée des oliviers et des caroubiers, ainsi qu'une intégration harmonieuse des jacarandas dans le paysage. Ceci reflètera une stabilité complète et une durabilité à long terme du site (**Fig. 47**).



Figure 47 : Équilibre écologique et stabilisation durable du site réhabilité

VI. Exemple d’une opération réussite de la remise en état au site de Menatsia

Dans le cadre de la gestion environnementale des carrières, le site de Menatsia constitue un exemple réussi de remise en état d’une partie de carrière exploitée (**Fig. 48 et 49**). La société Knauf a mis en œuvre un programme de remise en état graduel du site comprenant la plantation de différentes espèces végétales, notamment des pins d’Alep sur les bordures ainsi que des oliviers répartis de manière homogène à l’intérieur de la carrière dans le but de réintégrer le site dans son environnement naturel (**Fig. 50**).

Les résultats montrent le succès de cette opération, puisque les plantations se sont bien adaptées aux conditions locales et ont connu un développement stable. De plus, les oliviers ont commencé à produire, ce qui indique une amélioration notable des conditions écologiques et une stabilité relative du milieu. Par ailleurs, le retour progressif de certains éléments de la faune dans la zone témoigne d’une reprise partielle de l’équilibre écologique et d’une recolonisation naturelle du site. Ce cas met ainsi en évidence l’efficacité des actions de réhabilitation d’une partie de la carrière tout en poursuivant en harmonie les travaux d’extraction du gypse du site de Menatsia (**Fig. 51**).



Figure 48 : État du site de la carrière de Menatsia en phase d'exploitation en 2016

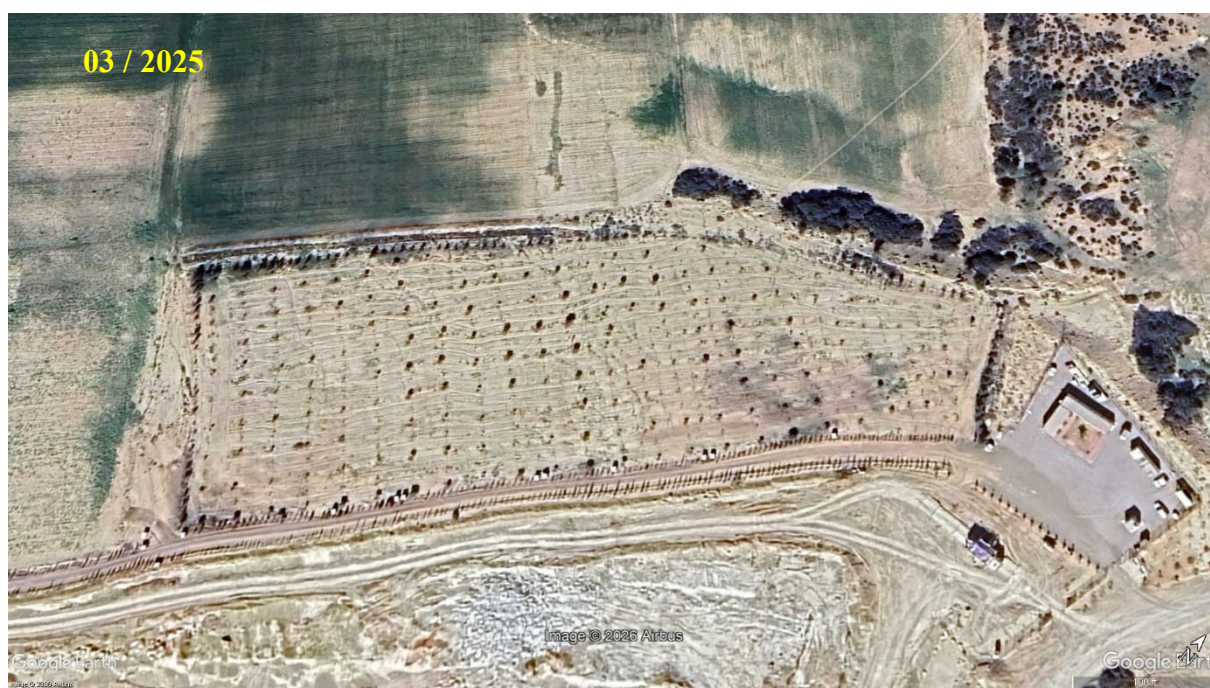


Figure 49 : Évolution d'une partie de la carrière de Menatsia après restauration partielle en 2025 (google earth)



Figure 50 : Développement des plantations de *Pinus halepensis* sur les bordures de la carrière

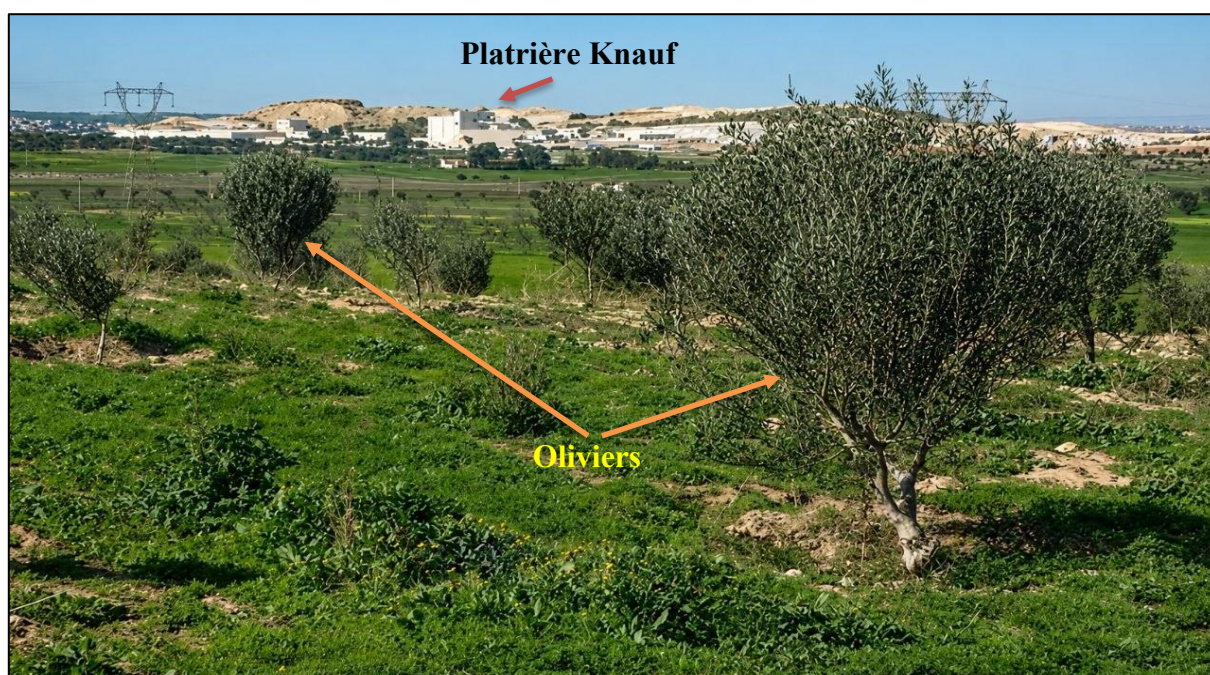


Figure 51 : Implantation et croissance des oliviers à l'intérieur du site réhabilité de Menatsia

CONCLUSION GENERALE

La carrière de Fleurus, exploitée par le groupe Knauf Algérie, est située à environ 22 Km à l'Est de la ville d'Oran. Cette région se trouve au sein du plateau de Boufatis appartenant au bassin du Bas Chélif, l'un des principaux bassins sédimentaires de l'Algérie nord-occidentale. La roche exploitée est du gypse d'âge Messinien et qui forme le cœur de l'anticlinal.

L'exploitation du gypse au niveau de la carrière de Fleurus comprend plusieurs étapes successives, notamment le décapage, l'extraction, le chargement, le transport et le concassage. Bien que ces opérations soient indispensables à la valorisation du gisement, elles engendrent divers impacts environnementaux affectant les différentes composantes du milieu naturel.

Le suivi de ces travaux a montré que ces impacts se traduisent par la dégradation des sols due à l'enlèvement de la couche superficielle fertile et à l'augmentation des phénomènes d'érosion. Ces activités contribuent aussi aux émissions de poussières et de gaz susceptibles d'affecter la qualité de l'air. Par ailleurs, les activités minières sont à l'origine de nuisances sonores et de vibrations liées à l'utilisation des engins lourds et aux opérations de tir de mine, auxquelles s'ajoutent des risques potentiels pour la santé et la sécurité des travailleurs.

Afin de limiter ces effets, l'entreprise Knauf met en œuvre plusieurs mesures préventives et environnementales, notamment la conservation de la terre végétale en vue de sa réutilisation lors des travaux de réhabilitation, le traitement des eaux et le contrôle du stockage des hydrocarbures, la réduction des émissions de poussières par l'arrosage régulier des pistes et l'utilisation de systèmes de dépoussiérage, ainsi que l'application de mesures strictes de sécurité lors des opérations de tir de mine et le suivi des conditions de travail.

Au cours de l'exploitation, l'apparition de la nappe phréatique à une profondeur d'environ 84 mètres dans la partie occidentale de la carrière a mis fin à ces travaux au-delà de ce seuil. Face à cette situation, l'entreprise Knauf a entamé les travaux de remise en état du site de manière graduelle.

La remise en état progressive a débuté par le réaménagement topographique du site à travers l'adoucissement des pentes et le remodelage des gradins afin d'assurer leur stabilité. Cette étape a été suivie par des travaux de remblayage réalisés à l'aide des matériaux stériles issus de l'exploitation, répartis et compactés en couches successives. Des opérations de nivellement et d'épandage de la terre végétale préalablement conservée lors du décapage ont ensuite été réalisées dans le but de restaurer les propriétés du sol et de créer un substrat favorable au développement du couvert végétal. La gestion des eaux a également été prise en considération par la mise en place de conditions de drainage adaptées au sein des zones remblayées, permettant de limiter les accumulations d'eau et d'assurer la stabilité à long terme du site.

Enfin, les travaux de revégétalisation ont été réalisés à l'aide d'espèces locales adaptées au climat méditerranéen semi-aride de la région, notamment le Pin d'Alep, l'olivier et le pistachier de l'Atlas, contribuant ainsi à la stabilisation des sols, à la réduction de l'érosion et à la restauration progressive de l'équilibre écologique du site.

L'étude évolutive de la carrière à partir des images satellitaires a permis de suivre les différentes étapes de la transformation du site durant les phases d'exploitation et de remise en état. À partir de ces observations, la simulation prospective réalisée à l'aide des techniques d'intelligence artificielle a permis d'envisager les différentes étapes d'évolution future du site après sa réhabilitation. Les résultats obtenus suggèrent un développement progressif du couvert végétal, accompagné d'une amélioration graduelle de la stabilité écologique du milieu. À long terme, cette évolution devrait favoriser la réintégration du site dans son environnement naturel et permettre la restauration d'une partie importante de ses fonctions écologiques.

Par ailleurs, l'étude du site de Menatsia, également exploité par Knauf, constitue un exemple concret de réussite en matière de remise en état des carrières de gypse. Les observations de terrain ainsi que l'analyse des images satellitaires ont mis en évidence le succès des opérations de réhabilitation progressive à travers la stabilisation du site et le développement du couvert végétal implanté. Ces résultats confirment que la remise en état progressive menée parallèlement aux activités d'exploitation constitue une approche efficace pour réduire les impacts environnementaux, assurer la stabilité à long terme des sites miniers et favoriser leur réintégration durable dans leur environnement naturel.

Au terme ce travail, il est recommandé de renforcer le suivi environnemental continu des sites d'exploitation minière, notamment à travers la surveillance régulière des sols, des eaux et de la stabilité des terrains, afin de détecter précocement toute forme de dégradation. Il est également essentiel d'intégrer la gestion des eaux et des dispositifs de drainage dès les phases initiales de conception des carrières, afin de contrôler la circulation des eaux souterraines et de limiter les déséquilibres hydrologiques susceptibles d'affecter la stabilité du site.

Le choix des espèces végétales doit être strictement adapté aux conditions climatiques semi-arides, en privilégiant des espèces autochtones résistantes à la sécheresse et favorisant la fixation des sols.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Figure 01 : les bassins néogènes de l'Algérie du Nord (D'après Perrodon, 1957, légèrement modifiée, ★ secteur d'étude).....	12
Figure 02 : Situation géographique et bordures du bassin du Bas Chélif	12
Figure 03: A ; Carte administrative de la Willaya d'Oran. B ; localisation de la carrière de Knauf Fleurus (extrait de la carte topographique de Sig, au 1/50000).....	13
Figure 04 : Cadre structural du bassin du Bas Chélif (d'après Arab et al., 2015).....	15
Figure 05 : Carte géologique du bassin bas Chélif (Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/500 000) Secteur d'étude ★	17
Figure 06 : Les différentes formations géologiques du bassin Bas Chélif (Hassani, 1987).....	18
Figure 07 : Carte géologique du plateau de Boufatis (Perrodon, 1957, légèrement modifiée).....	19
Figure 08 : Carte de la répartition des précipitations annuelles dans le bassin du Bas Chéli (d'après Achite et al., 2021).....	20
Figure 09 : Carte des vitesses moyennes annuelles du vent à 10 m d'altitude en Algérie (d'après CDER, 2005).....	21
Figure 10 : Carte des sous-bassins versants et des unités hydrogéologiques de la plaine alluviale du Bas Chélif (d'après Bellague, 2017).....	22
Figure 11 : Vue générale de l'usine de plâtre Knauf à Oran.....	23
Figure 12 : Opération de décapage réalisée à l'aide d'une pelle hydraulique.....	28
Figure 13 : Extraction mécanique à la carrière Knauf effectuée par des brises-roche...	29
Figure 14 : Sondeuse <i>Atlas copco</i> destinée pour les travaux de foration.....	30
Figure 15 : Exemple des paramètres géométriques d'un plan de tir (Source internet)..	31
Figure 16 : Différents types de mailles selon la nature du massif rocheux.....	32
Figure 17 : A ; Chargement d'un trou de mine et B ; exemple d'un tir de mine.....	32
Figure 18 : Types d'explosifs utilisés dans les tirs de mine A : Marmanit, B : Les explosifs gélatineux ; Gélanite, C : explosif en vrac : Anfomil.....	33

Figure 19 : Etape de chargement des matériaux à l'aide d'un chargeur sur pneus.....	34
Figure 20 : transport du gypse vers l'unité de traitement.....	35
Figure 21 : Schéma explicatif du principe e fonctionnement d'un concasseur à mâchoires.....	36
Figure 22 : Sources d'émission de poussières au cours des différentes étapes d'exploitation des carrières de manière générale.....	40
Figure 23 : Impact de l'exploitation de la carrière sur le paysage.....	42
Figure 24 : Apparition de la nappe phréatique au niveau 84 mètres à la carrière de Fleurus.....	53
Figure 25 : Remise en état progressive en parallèle des travaux d'exploitations.....	54
Figure 26 : Schéma de talutage des gradins du front de taille (Source internet)	55
Figure 27 : Schéma illustrant le principe du remblayage par couches successives.....	56
Figure 28 : Photo de terrain illustrant l'opération de remblayage dans la carrière de Fleurus.....	56
Figure 29 : État final de la surface après nivellement dans la carrière de Fleurus.....	57
Figure 30 : Mise en place de la terre végétale dans la carrière de Fleurus.....	58
Figure 31 : Plantations sur les bordures de la carrière Fleurus.....	59
Figure 32 : Flore initiale du site avant exploitation.....	60
Figure 33 : Espèces végétales utilisées pour la revégétalisation.....	61
Figure 34 : Photos montrant la structure de la pépinière de Knauf.....	62
Figure 35 : Espèces végétales produites en pépinière Fleurus.....	64
Figure 36 : panneaux solaires à la place de l'énergie classique.....	65
Figure 37 : Équipements techniques de la pépinière Fleurus.....	65
Figure 38 : Arbres transplantés en phase de mise en jauge.....	67
Figure 39 : Mise en place du couvert végétal et aménagement technique du site	68
Figure 40 : Vue satellite de la phase d'exploitation active de la carrière en 2016 (Google Earth)	69

Figure 41 : Vue satellite de l'apparition des accumulations d'eau phréatique dans la carrière en 2018 (Google Earth)	70
Figure 42 : Vue satellite du début des travaux de remise en état en 2020 (Google Earth)	70
Figure 43 : Vue satellite de l'évolution des travaux de remise en état de la carrière	71
Figure 44 : Vue satellite du début de la mise en place d'une couverture pédologique en 2025	71
Figure 45 : Évolution de la revégétalisation d'une carrière après deux ans de réhabilitation environnementale	72
Figure 46 : Stade avancé de la réhabilitation environnementale d'une carrière après 7 ans de revégétalisation.....	73
Figure 47 : Équilibre écologique et stabilisation durable du site réhabilité	74
Figure 48 : État du site de la carrière de Menatsia en phase d'exploitation en 2016	75
Figure 49 : Évolution d'une partie de la carrière de Menatsia après restauration partielle en 2025 (google earth)	75
Figure 50 : Développement des plantations de <i>Pinus halepensis</i> sur les bordures de la carrière	76
Figure 51 : Implantation et croissance des oliviers à l'intérieur du site réhabilité de Menatsia	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres des différents types de mailles de tir de mine.....	32
Tableau 2 : Valeurs limites des principaux paramètres de pollution des eaux.....	37
Tableau 3 : Valeurs limites des émissions des moteurs diesel des engins industriels.....	41
Tableau 4 : Maladies professionnelles liées aux activités d'exploitation et mesures de prévention appliquées.....	46

Références bibliographiques

Achite, M., Caloiero, T., Wałęga, A., Krakauer, N., & Hartani, T. (2021). Analysis of the spatiotemporal annual rainfall variability in the Wadi Cheliff Basin (Algeria) over the period 1970 to 2018. *Water*, 13(11), 1477.

Anderson, R. V. (1936). *Geology in the coastal Atlas of Western Algeria*. Geol. Soc. Amer. Mem., New York, 4, 4.50 p.

Arab, M., Bracène, R., Roure, F., Zazoun, R. S., Mahdjoub, Y., & Badji, R. (2015). Source rocks and related petroleum systems of the Chelif Basin (western Tellian domain, North Algeria). *Marine and Petroleum Geology*, 64, 363–385.

Atif, K. F. T. (2001). *Modalités du passage Mio-Pliocène dans le bassin du Bas Chélif*. Mém. Magister, Univ. Oran, 133 p.

Atif, K. F. T., Bessedik, M., Belkebir, L., Mansour, B., & Saint Martin, J. P. (2008). Le passage Mio-Pliocène dans le bassin du Bas Chélif (Algérie). Biostratigraphie et paléoenvironnements. *Geodiversitas*, 30(1), 97-116.

Atik, A., Mansouri, M. E. H., Bessedik, M., Osman, M. K., Belkebir, L., Saint Martin, J. P., & Satour, L. (2024). New insights on the latest Messinian-to-Piacenzian stratigraphic series from the Dahra Massif (Lower Chelif Basin, Algeria) : Lago Mare, reflooding and bio-events. *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 195(1), 2.

Benyoucef, M., Bendella, M., Brunetti, M., Ferré, B., Koci, T., Bouchemla, I., & Ghenim, A.F. (2021). Upper Pliocene bivalve shell concentrations from the Lower Chelif basin (NWAfrica): *Systematics, sedimentologic and taphonomic framework*. *Annales de Paléontologie*, 107, 102509 : 1-23.

BELHADJI A. (2004). *La série Miocène supérieur – Pliocène du versant oriental de Djebel Diss (Dahra occidentale): attribution biostratigraphique*, Mém. Magister, Univ. Oran, 49, 14 fig., 15 pl.

Belhadji, A. (2021). *La sédimentation du Miocène supérieur au Pliocène des monts du Dahra (exemples de Djebel Diss et du Plateau d'Ain Merane) : aspects litho-stratigraphiques et micropaléontologiques*. Thèse, Université d'Oran, Algérie.

Belkebir, L. (1986). *Le Néogène de la bordure nord-occidentale du Massif du Dahra, (Algérie): (Biostratigraphie, paléoécologie, paléogéographie)* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 1).

Belkebir, L., Bessedik, M., (1991). Essai de synthèse biostratigraphique du Miocène post-et syn-chro-nappes en Oranie (Tafna, Bas Chélif). *II^{ème} Séminaire de Géologie pétrolière*, Boumerdès, 32-34.

Belkebir, L., Bessedik, M., Ameer-Chehbeur, A., & Anglada, R. (1996). Le Miocène des bassins nord-occidentaux d'Algérie : Biostratigraphie et eustatisme. *Bulletin des Centres de recherches exploration-production Elf-Aquitaine*. Mémoire, (16), 553-561.

Belkebir, L., Bessedik, M., & Mansour, B. (2002). Le Miocène supérieur du bassin du Bas Chélif : attribution biostratigraphique à partir des foraminifères planctoniques. *Mémoires du Service géologique de l'Algérie*, (11), 187-194.

Bellague, D., Mhamedi Bouzina, M., Khaldi, A., & Abdelguerfi, A. (2017). Adaptation de la luzerne pérenne (*Medicago sativa*) au milieu semi-aride (Bas-Chéliff, Algérie). *Systèmes Agraires et Environnement*, 1(1), 108-113.

Bleicher, G. (1875). Note sur la géologie des environs d'Oran. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1874-1875.

Blow W. H. (1969). Late middle Eocene to recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. *Proceeding on the First International Conference on the Planktonic Microfossils*, Genève, 2: 753-1413.

Boucif, A., Reimann, M., Bensalah, M., Hebib, H., & Kacemi, A. (2025). Chemical characterization and valorization potential of subsurface gypsum deposits in the Boufatis Plateau, Lower Chelif Basin (NW Algeria). *Earth Sciences Research Journal*, 29(3).

Brives, A. (1897). *Les terrains tertiaires du bassin du Chélif et du Dahra*. Impr. P. Fontana & Company.

Cornée, J. J., Saint-Martin, J. P., Conesa, G., & Muller, J. (1994). Geometry, paleoenvironments and relative sea-level (accommodation space) changes in the Messinian Murdjado carbonate platform (Oran, western Algeria): consequences. *Sedimentary Geology*, 89(1-2), 143-158.

Corroy, G., & Gerard, Ch. (1933). Le Toarcien de Lorraine et du Bassigny. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5(3), 193-226

Clochiati M., (1971). *Contribution à l'étude du nannoplancton calcaire du Néogène d'Afrique du Nord*. M2M. Mus. Nat. Hist. Nat., Paris, Sér. C, Sci. Terre., Tome XXIII, 22 fig., 4 table, 135 p., 40 pl.

Dalloni M., (1915). *Recherches sur la période néogène dans l'Algérie occidentale*. Bull Soc Géol Fr, Paris, 4e s., t. XV: 428-457.

Deflandre G., (1939). *Sur la présence de Coccolithophoridées et de Discoastéridées dans les marnes sahéliennes d'El Mehdi*. Bull. Soc. Zool. France., vol. 64, p. 200-202.

Deflandre G., (1942). *Coccolithophoridées fossiles d'Oranie. Genres Scyphosphaera Lohmann et Thorosphaera Ostenfeld*. Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, vol. 77, p. 125-137.

Deflandre G. & Fert C., (1954). *Observations sur les Coccolithophoridées actuels et fossiles en microscopie ordinaire et électronique*. Ann. Paléont., vol. 40, 127 text-figs, p. 115-176, 15 pls.

Delfaud, J., Michaux, J., Neurdin, J., & Revert, J. (1973). Un modèle paléogéographique de la bordure méditerranéenne : évolution de la région oranaise (Algérie) au Miocène supérieur.

Conséquences stratigraphiques. *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle d'Afrique du Nord*, 64, 219-241.

Delteil, J. (1974). *Tectonique de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du Tell oriental (Monts de la Mina, Beni Chougrane, Dahra)*. Thèse de doctorat, Université de Nice, France.

Douaci, A., & Goudjili, C.-E.-H. (2019). Synthèse hydrogéologique et estimation du champ de transmissivité de la plaine alluviale du bas Chelif (Mémoire de master, Université de Khemis Miliana, Algérie).

Doumergue F. & Ficheur E. (1908). *Carte géologique de l'Algérie 1/50 000*, feuille Oran (1ère éd.)

Elmeddahi, Y., Mahmoudi, H., Issaadi, A., Goosen, M. F., & Ragab, R. (2016). Evaluating the effects of climate change and variability on water resources: a case study of the Cheliff Basin in Algeria. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(4), 835-845.

Fenet, B. (1975). *Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du Bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'orogène nord-maghréb: les monts du Djebel Tessala et les massifs du littoral de l'oranais*. Thèse de doctorat, Université de Nice, France.

Gourinard, Y. (1958). *Recherches sur la géologie du littoral oranais. Épirogénèse et nivellements : Par Yves Gourinard*. Service de la carte géologique de l'Algérie.

Guardia, P. (1975). *Géodynamique de la marge alpine du continent africain de l'Oranie Nord-occidentale (Algérie), relation structurale et paléogéographique entre Rif externe et Tell de l'avant pays atlasique*. Thèse de doctorat, Université de Nice, France.

Gentil L. (1903). *Etude géologique du bassin de la Tafna*. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, (2), 4, 425 p.

Hassani, M. I. (1987). *Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride: le bassin versant de la grande Sebkhia d'Oran* (Thèse de 3ème cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, France).

Hebib, H. (2014). *La limite tortono-messénienne dans la marge nord du bassin du bas Chélif. Précisions biostratigraphiques et évolution des assemblages de foraminifères benthiques*. Thèse de doctorat, Université d'Oran 2, Algérie.

International Society of Explosives Engineers (2011) ISEE blasters' handbook. International Society of Explosives Engineers, Cleveland, Ohio

Katsabanis, P. D. (2020). Analysis of the effects of blasting on comminution using experimental results and numerical modelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(7), 3093-3109.

Kasbadji Merzouk, N. (1999). Carte des vents de l'Algérie — Résultats préliminaires. *Revue des Énergies Renouvelables: Valorisation*, 209-214. CDER

Krijgsman, W., Rohling, E. J., Palcu, D. V., Raad, F., Amarathunga, U., Flecker, R., ... & Aloisi, G. (2024). Causes and consequences of the Messinian salinity crisis. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(5), 335-350.

Lansiart M., Odent B. (1999). *La remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation*. Rap. BRGM R 40450, 60 p.

Mansour B. (2004). *Diatomées messiniennes du bassin du bas Chélif (Algérie nord-occidentale)*. Thèse de Doctorat d'état, Univ. Oran, 285p.

Meghraoui M. (1982). *Étude néotectonique de la région nord-ouest d'El-Asnam : relation avec le séisme du 10 octobre 1980*. Thèse de Doctorat de 3e cycle, université de Paris VII, France, 210 p.

Meghraoui, M., Cisternas, A., & Philip, H. (1986). Seismotectonics of the lower Cheliff basin: structural background of the El Asnam (Algeria) earthquake. *Tectonics*, 5(6), 809-836.

Meghraoui, M., Jaegy, R., Lammali, K., & Albarede, F. (1988). Late Holocene earthquake sequences on the El Asnam (Algeria) thrust fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(2), 187-203.

Moissette P. (1988). *Faune de bryozoaires du Messinien d'Algérie occidentale*. Doc. Lab. Géol., Fac. Sc., Lyon, 102, 351 p.

Neurdin-Trescartes, J. (1992). *Le remplissage sédimentaire du bassin néogène du Chélif, modèle de référence de bassins intramontagneux*. Thèse de doctorat, Université de Pau et Pays de l'Adour.

Neurdin-Trescartes, J. (1995). Palaeogeographie du Bassin du Chélif (Algérie) au Miocène. Causes et conséquences. *Géologie Méditerranéenne*, 22(2), 61-71.

Perrodon, A. (1957). Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. *Publication du Service de la Carte géologique d'Algérie*, 12, 1-323.

Pomel, A. (1892). Sur la classification des terrains miocènes de l'Algérie et réponses aux critiques de M. Peron. *Bulletin de la Société géologique de France*, 166-174.

Repelin, J. (1895). *Étude géologique des environs d'Orléansville*. Barthelet, 202 pages.

Rouchy, J. M. (1982). La genèse des évaporites messiniennes de Méditerranée. *Paris: Éditions du Muséum national d'Histoire naturelle*, 50(1-267).

Rouchy, J. M., Caruso, A., Pierre, C., Blanc-Valleron, M., & Bassetti, M. A. (2007). The end of the Messinian salinity crisis: Evidence from the Cheliff Basin (Algeria). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(3-4), 386-417.

Rouchy J. M. & Freneix S., (1979). *Quelques gisements messiniens de bivalves (formation de tripolis de l'Algérie et du Maroc)*.

Roveri, M., Flecker, R., Krijgsman, W., Lofi, J., Lugli, S., Manzi, V., Sierro, F. J., Bertini, A., Camerlenghi, A., De Lange, G., Govers, R., Hilgen, F. J., Hübscher, C., Meijer, P. T., & Stoica, M. (2014). The Messinian Salinity Crisis: Past and future of a great challenge for marine sciences. *Marine Geology*, 352, 25-58.

Saint-Martin, J. P. (1987). *Les formations récifales coralliennes du Miocène supérieur d'Algérie et du Maroc. Aspects paléoécologiques et paléogéographiques.* Thèse de doctorat, Université, d'Aix Marseille, France.

Saint-Martin, J. P., & Rouchy, J. M. (1990). Les plates-formes carbonatées messiniennes en Méditerranée occidentale : leur importance pour la reconstitution des variations du niveau marin au Miocène terminal. *Bulletin de la Société géologique de France*, 6(1), 83-94.

Saint-Martin, J. P., & André, J. P. (1992). Les constructions coralliennes de la plate-forme carbonatée messinienne de Malte. *Géologie Méditerranéenne*, 19(3), 145-163.

S. N. REPAL (1952). *Le Bassin néogène du Chélif.* Publ. XIXe Congr. Intern. Géol. ; Alger, Monographies régionales ser.1 n°16, 56 p.

Tchouar (2013). *Etude des dinoflagellés de la série mio-pliocène du Télégraphe de Sidi Brahim (Bassin du Chélif, Algérie nord-occidentale): Systématique et Paléoécologie-.* Mém. Magister, Univ. Oran, 021 p. (inéd.).

Thomas, G. (1985). *Géodynamique d'un bassin intramontagneux: Le Bassin du Bas-Chelif occidental (Algérie) durant le mio-plio-quaternaire.* Thèse de doctorat, Université de Pau et Pays de l'Adour, France.

Yelles-Chaouche, A., Boudiaf, A., Djellit, H., & Bracene, R. (2006). La tectonique active de la région nord-algérienne. *Comptes Rendus Géoscience*, 338(1-2), 126-139.

Lois et décrets exécutifs :

Décret présidentiel n° 90-198 du 30 juin 1990 portant réglementation des substances explosives. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 29(27), 760-765.

Décret exécutif n° 93-161 du 10 juillet 1993 réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel. *Journal Officiel de la République Algérienne*, 32(46), p. 8.

Décret exécutif n° 93-184 du 27 juillet 1993 réglementant l'émission des bruits. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 32(50), 10-11.

Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 40(77), 7-15.

Loi n° 03-10 du 19 Joumada El Oula 1424 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 42(43), 6-18.

Décret exécutif n° 03-410 du 10 Ramadhan 1424 correspondant au 5 novembre 2003 fixant les seuils limites des émissions des fumées, des gaz toxiques et des bruits par les véhicules automobiles. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 42(68), 15-19.

Loi n° 05-12 du 28 Joumada Ethania 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau. *Journal Officiel de la République Algérienne*, 44(60), 3-18.

Décret exécutif n° 05-315 du 10 septembre 2005 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 44(63), 19-21.

Décret exécutif n° 06-104 du 29 Moharram 1427 correspondant au 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 45(13), 9-33.

Décret exécutif n° 06-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglementant l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exerce leur contrôle. *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire*, 45(26), 4-11.

Décret exécutif n° 06-141 du 21 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 fixant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. *Journal Officiel de la République Algérienne*, 45(26), 4-11.

Loi n° 25-12 du 9 Safar 1447 correspondant au 3 août 2025 régissant les activités minières. *Journal Officiel de la République Algérienne*, 64(52), 4-28.

Résumé

La carrière de Fleurus, située dans la wilaya d'Oran, est implantée sur le plateau de Boufatis, appartenant au bassin du Bas Chélif, l'un des plus importants bassins sédimentaires néogènes de l'Algérie nord-occidentale. Cette carrière est exploitée par l'entreprise Knauf Algérie pour l'extraction du gypse d'âge messinien, qui constitue la matière première essentielle à la fabrication du plâtre et de ses dérivés.

L'exploitation de ce gisement génère un ensemble d'impacts environnementaux affectant directement les différentes composantes du milieu naturel, notamment par l'altération du paysage naturel, le décapage du couvert pédologique et végétal, ainsi que la dégradation des sols et des ressources en eau. À cela s'ajoutent les émissions de poussières, de gaz et les nuisances sonores générées par les différentes activités d'exploitation. Ces impacts se caractérisent par leur effet cumulatif et leur persistance dans le temps,

entraînant un déséquilibre des écosystèmes locaux ainsi qu'une dégradation progressive du milieu naturel.

Dans ce contexte, la remise en état des carrières s'impose comme une nécessité environnementale et une responsabilité morale avant d'être une obligation juridique, en tant qu'outil essentiel de limitation des dégradations et de réintégration des sites exploités dans leur environnement naturel. Cette étude a porté sur l'analyse du cadre législatif et réglementaire régissant les opérations de réhabilitation en Algérie, ainsi que sur l'évaluation des exigences environnementales associées, à travers le cas de la carrière de Fleurus. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence un ensemble de mesures et de recommandations visant la restauration de l'équilibre écologique du site et la promotion d'une exploitation minière plus respectueuse de l'environnement.

Mots-clés:

Carrière de Fleurus, plateau de Boufatis, bassin du Bas Chélif, gypse messinien, knauf Algérie, exploitation minière, impacts environnementaux, Remise en état des carrières, cadre législatif, protection de l'environnement.