

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de la terre  
Département : Des mines

**Thèse**

**Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de  
Doctorat  
LMD en Génie Minier**

**Option : Exploitation minière et géotechnique**

**Thème:**

**Approche géo-mécanique et analytique du tandem  
explosifs-discontinuités dans les massifs rocheux fissurés,  
cas des mines algériennes.**

**Par : SLIMANE Houcine**

**Soutenue le 08/10/2025**

**Devant le jury:**

Président	BOUNOUALA Mohamed	Pr	Université Badji Mokhtar - Annaba
Directeur de thèse	BERDOUDI Said	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	HAFSAOUI Abdellah	Pr	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	YAHYAOUI Sami	Pr	ENP Alger
Examineur	BOUDIAF Mohamed	MCA	Université de Skikda.

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse. Leur soutien, leurs conseils et leur engagement ont été essentiels pour mener à bien ce travail.

En premier lieu, je souhaite remercier chaleureusement Monsieur le Professeur Berdoudi Said, directeur de cette thèse, pour son encadrement précieux, sa disponibilité et ses orientations éclairées tout au long de ce parcours. Sa rigueur scientifique, son expertise et son soutien constant ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Je suis immensément reconnaissant envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Je remercie tout particulièrement Monsieur le Professeur Bounouala Mohamed, Président du jury, pour son excellence académique et sa disponibilité. Mes sincères remerciements vont également à Monsieur le Professeur Yahyaoui Sami, à Monsieur le Professeur Hafsaoui Abdellah, et à Monsieur le Docteur Boudiaf Mohamed pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrés à l'évaluation de mes recherches. Leurs commentaires constructifs, leurs perspectives enrichissantes et leur rigueur scientifique ont été précieux pour l'amélioration et l'enrichissement de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur le Professeur Hadji Riheb, dont le soutien inébranlable a été une source précieuse tout au long de ce travail. Ses efforts ont été essentiels, en particulier pendant la période difficile marquée par la perte du regretté Professeur Gadri Larbi, dont l'absence a laissé un vide profond.

Un grand merci au personnel de SOMIFER et de la mine de Rouina pour leur collaboration et leur soutien logistique sur le terrain. Leur expertise technique et leur connaissance approfondie du site ont été indispensables pour la collecte des données et la compréhension des enjeux opérationnels.

Je remercie également mes collègues et amis pour leurs encouragements, leurs échanges stimulants et leur soutien moral durant cette aventure. Leur présence a été une source de motivation inestimable.

Mes remerciements vont également aux équipes du laboratoire LAVAMINE et du Département des Mines de l'Université Badji Mokhtar (Annaba), qui ont créé un environnement académique propice à l'épanouissement intellectuel et à la recherche.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et la contribution de chacun d'entre vous. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre appui et votre confiance.

*Merci à tous. H Slimane*

## Hommage

Je souhaite, en cet hommage, exprimer toute ma gratitude et mon profond respect à l'égard du Professeur GADRI Larbi, qui fut mon premier directeur de thèse. Son départ soudain en décembre 2022 a créé un vide immense au sein de la communauté universitaire et minière algérienne, qui pleure en lui un pilier et un visionnaire.

Le Pr. GADRI incarnait une rare synthèse de compétences : une expertise scientifique reconnue, allée à une sagesse qui guidait nos pas bien au-delà des seuls aspects techniques. C'était un pédagogue né, dont le dévouement absolu à la recherche et à la formation des esprits a durablement marqué mon parcours personnel, tout comme il a influencé et inspiré des générations d'étudiants et de collègues.

Au-delà du savant, je garde la mémoire de l'homme – sa rigueur, sa générosité et cette bienveillance attentive qui poussait chacun à se dépasser.

.Son héritage intellectuel et humain demeure plus vivant que jamais. Pour tous ceux qui ont eu le privilège de l'approcher et de travailler à ses côtés, son souvenir reste une source d'inspiration inépuisable et un idéal vers lequel tendre.

C'est le même sentiment d'une fraternité indéfectible qui me lie à la mémoire de mon ami d'enfance, M. Mokdad THABET, que j'ai toujours considéré comme un frère. Sa récente disparition (le 15/09/2025) a emporté une part de notre histoire commune, laissant derrière elle la nostalgie lumineuse des jours passés et une fidélité qui défie le temps.

C'est donc avec une profonde gratitude et une pieuse pensée que je souhaite associer à ce travail la mémoire de ces deux personnes. Je tiens à dédier cette thèse au Professeur GADRI Larbi, dont l'enseignement a posé les fondations de ce parcours, et à mon ami Mokdad THABET, dont l'amitié fut un soutien inébranlable. Leurs souvenirs respectifs ont été, tout au long de ce parcours, une source de force et de motivation, et je porte aujourd'hui le fruit de ce travail en hommage à leur vie.

## Dédicace

À ma mère et mon père, deux êtres exceptionnels qui me manquent profondément et qui nous ont quittés trop tôt. Ils auraient été les plus heureux de voir l'aboutissement de ce travail précieux.

À ma famille, véritable pilier de mon existence. À ma chère épouse et à mes enfants : Anas, Ritedj, Alaa et Mouath : votre amour inébranlable et votre soutien constant m'ont apporté la force indispensable pour poursuivre cette aventure intellectuelle. Chacun d'entre vous a joué un rôle fondamental dans mon épanouissement, tant personnel qu'académique, et pour cela, ma reconnaissance est infinie.

À mon premier directeur de thèse, le regretté Monsieur le professeur Gadri Larbi, une personne exceptionnelle qui a été un soutien constant durant ce défi académique, avant sa perte douloureuse.

À Monsieur le Professeur Hadji Riheb, dont la présence encourageante et l'engagement ont été des éléments déterminants dans mon parcours. Les discussions stimulantes et les encouragements inlassables ont nourri mon esprit et guidé mes recherches.

À mes amis et collègues, nos échanges intellectuels et nos moments de détente ont été des bouffées d'air frais tout au long de ce périple académique. Merci d'avoir partagé ces instants avec moi et d'avoir été une source inépuisable de joie.

*SLIMANE Houcine*

# Abstract

This doctoral thesis presents a comprehensive investigation into blast-induced vibrations and their environmental impacts in mining operations, with specific application to the Rouina Mine in Algeria. The research employs an integrated approach combining theoretical analysis, field experimentation, and environmental assessment to address the complex interplay between rock fragmentation mechanisms and vibration propagation.

The researches begin with a thorough literature review examining rock fragmentation mechanisms, energy distribution during blasting, and predictive models of vibration propagation. Experimental measurements conducted at the Rouina Mine site provide valuable data on vibration characteristics and their correlation with blasting parameters. The research establishes significant relationships between explosive energy distribution, rock properties, and resulting vibration patterns.

Key findings demonstrate the effectiveness of modern monitoring techniques in quantifying blast-induced vibrations and their impacts on surrounding structures. The study develops practical mitigation strategies that balance operational efficiency with environmental protection, particularly addressing visual, hydrological, and vibration-related impacts. The results show that optimized blast designs can significantly reduce environmental impacts while maintaining fragmentation efficiency.

These researches contribute to sustainable mining practices by providing a methodological framework for vibration assessment and control in sensitive mining environments. The findings offer practical solutions for mining engineers and environmental managers seeking to minimize the ecological footprint of blasting operations while ensuring operational productivity. The integrated approach developed in this thesis has direct applications for mining operations in similar geological contexts worldwide.

**Keywords:** Blast-induced vibrations, Rock fragmentation, Vibration monitoring, Rouina Mine, Blast optimization, Chapot's law, Damping coefficient, Environmental impacts, Sustainable mining.

## ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة شاملة للاهتزازات الناتجة عن التفجيرات وآثارها البيئية في عمليات التعدين، مع تطبيق خاص على منجم الروينة في غرب الجزائر. يستخدم البحث منهجية متكاملة تجمع بين التحليل النظري، والتجريب الميداني، والتقييم البيئي لمعالجة التداخل المعقد بين آليات تفتيت الصخور وانتشار الاهتزازات.

تبدأ الأبحاث بمراجعة أدبية شاملة تفحص آليات تفتيت الصخور، توزيع الطاقة أثناء التفجير، والنماذج التنبؤية لانتشار الاهتزازات. قدمت القياسات التجريبية التي أجريت في موقع منجم الروينة بيانات قيمة حول خصائص الاهتزازات وعلاقتها بعوامل التفجير. يؤسس البحث علاقات مهمة بين توزيع طاقة المتفجرات، وخصائص الصخور، وأنماط الاهتزازات الناتجة.

تُظهر النتائج الرئيسية فعالية تقنيات الرصد الحديثة في قياس الاهتزازات الناتجة عن التفجيرات وآثارها على الهياكل المحيطة. يطور البحث استراتيجيات عملية للتخفيف توازن بين الكفاءة التشغيلية وحماية البيئة، مع معالجة الآثار البصرية، الهيدرولوجية والمرتبطة بالاهتزازات بشكل خاص. تظهر النتائج أن تصاميم التفجير المحسنة يمكن أن تقلل بشكل كبير من الآثار البيئية مع الحفاظ على كفاءة التفتيت.

تساهم هذه الأبحاث في ممارسات التعدين المستدام من خلال تقديم إطار منهجي للتقييم والتحكم بالاهتزازات في البيئات التعدينية الحساسة. تقدم النتائج حلاً عملياً لمهندسي التعدين ومديري البيئة الذين يسعون إلى تقليل البصمة البيئية لعمليات التفجير مع ضمان الإنتاجية. النهج المتكامل المطور في هذه الأطروحة له تطبيقات مباشرة في عمليات التعدين في سياقات جيولوجية مماثلة حول العالم.

**الكلمات المفتاحية:** الاهتزازات الناتجة عن التفجيرات، تفتيت الصخور، الرصد الاهتزازي، منجم الروينة، تحسين التفجيرات، قانون شابو، معامل التخمد، الآثار البيئية، التعدين المستدام.

# Résumé

Cette thèse de doctorat présente une étude approfondie des vibrations induites par les tirs de mines et de leurs impacts environnementaux, avec une application spécifique à la mine de Rouina en Algérie. La recherche adopte une approche intégrée combinant l'analyse théorique, l'expérimentation sur le terrain et l'évaluation environnementale pour comprendre l'interaction complexe entre les mécanismes de fragmentation rocheuse et la propagation des vibrations.

Les recherches commencent par une revue bibliographique complète examinant les mécanismes de fragmentation de la roche, la distribution de l'énergie lors du tir et les modèles prédictifs de propagation des vibrations. Des mesures expérimentales conduites sur le site de la mine de Rouina fournissent des données précieuses sur les caractéristiques vibratoires et leur corrélation avec les paramètres de tir.

Les principaux résultats démontrent l'efficacité des techniques modernes de surveillance pour quantifier les vibrations induites et leurs impacts sur les structures environnantes. La recherche développe des stratégies pratiques d'atténuation qui équilibrent l'efficacité opérationnelle et la protection environnementale, abordant particulièrement les impacts visuels, hydrologiques et vibratoires.

Ces recherches contribuent aux pratiques minières durables en fournissant un cadre méthodologique pour l'évaluation et le contrôle des vibrations dans les environnements miniers sensibles. Les résultats offrent des solutions pratiques pour les ingénieurs miniers et les gestionnaires environnementaux cherchant à minimiser l'empreinte écologique des opérations de tir tout en assurant la productivité opérationnelle. L'approche intégrée développée dans cette thèse trouve des applications directes pour les opérations minières dans des contextes géologiques similaires à travers le monde.

**Mots-clés :** Vibrations induites par les tirs, Fragmentation rocheuse, Surveillance vibratoire, Mine de Rouina, Optimisation des tirs, loi de Chapot, Coefficient d'amortissement, Impacts environnementaux, Exploitation minière durable.

# Table des matières

N°	Titre/Sous-titre	Page
	Introduction Générale	
	<b>CHAPITRE I Recherche bibliographique</b>	
1	Introduction:	1
2	Conséquences des résultats du tir	4
2.1	Retombées technico-économiques	4
2.2	Retombées environnementales	7
3	Paramètres influençant les résultats d'abattage	8
3.1	Matrice rocheuse abattue	8
3.2	Type d'explosif et propriétés énergétiques	13
3.3	Couplage explosif/roche	16
3.4	Géométrie du plan de tir et du chargement	17
3.5	Séquence d'amorçage	18
3.6	Précision de la foration	20
3.7	Influence de la Géologie	22
4	Mécanismes de fragmentation et d'arrachement de la roche par l'explosif	23
4.1	Répartition de l'énergie explosive : choc et gaz	23
4.2	Effets de l'explosif sur la roche	25
5	Concept énergie/surface	28
6	Complexités de la dynamique rapide et défis qui en découlent	32
6.1	Modélisation de l'Interaction Pression-Roche sous Sollicitations Explosives	33
6.2	Seuil de rupture et effets de dépendance à la vitesse de sollicitation	36
6.3	Approches Empiriques pour la Prédiction de la Fragmentation	37
7	Modèles prédictifs empiriques de fragmentation	40
7.1	Définition d'une distribution granulométrique	40
7.2	Fonctions de répartition granulométriques usuelles	41
7.3	Prédictions de taille médiane	44
7.4	Autres modèles prédictifs proposés	45
7.5	Taille maximale des fragments	45
8	Conclusion	46
	<b>CHAPITRE II Présentation de la mine de Rouina</b>	
1	Localisation géographique de la mine	47
2	Caractéristiques Géographiques, Climatiques et Socio-Économiques	50
3	Historique des travaux de recherches et d'exploitation	51
4	Cadre géologique	52
4.1	Géologie régionale	52
4.2	Stratigraphie, Lithologie	53
4.3	Tectonique de la région	56

4.4	Géologie locale	58
4.5	Tectonique du gisement	62
4.6	Minéralisation	64
5	L'exploitation du gisement de Rouina	65
5.1	Exploitation à ciel ouvert	65
5.2	Exploitation souterraine	66
6	Conclusion	67

### **CHAPITRE III Démarche expérimentale**

1	Introduction	68
2	les vibrations	68
3	Règlementation et normalisation des vibrations	69
4	Méthodologie	75
4.1	Acquisition des données vibratoires	77
4.2	Analyse et Fiabilité des Données Vibratoires Issues des Tirs en Carrière	77
4.3	Prévision des vibrations générées par un tir	78
4.4	Localisation des mesures de vibrations	80
5	Appareils d'enregistrement	81
6	Résultats et enregistrements	82
7	Analyse des Résultats et Impact sur les Structures Environnantes	101
8	Conclusion	102

### **CHAPITRE IV Impacts environnementaux et mesures d'atténuation**

1	Introduction	103
2	Impacts paysagers et visuels	104
3	Evaluation des impacts de la mine	105
3.1	Modification de la morphologie du site	105
3.2	Éléments du site impactant le paysage	106
3.3	Mesures d'intégration	106
3.4	Tirs de mines et effets vibratoires	108
3.5	Ondes de pressions dans le sol (vibrations)	109
3.6	Ondes de pressions aériennes (détonations)	111
3.7	Projections de roches et de poussières	114
3.8	Impacts sur les eaux	116
3.9	Incidences sur les zones humides	118
3.10	Impact de l'exploitation et mesures	119
3.11	Circuit des eaux	120
4	Conclusion	120
	<b>Conclusion Générale</b>	122
	Références Bibliographiques	124-128

## Liste des figures

<b>N°</b>	<b>Titre/Sous-titre</b>	<b>Page</b>
<b>Fig 1-1</b>	Formes de tas idéales pour chargeuse à pneus et pelle hydraulique, respectivement (Scott et al., 1988)	5
<b>Fig 1-2</b>	Evolution des coûts unitaires individuels des processus du cycle minier en fonction du degré de fragmentation obtenu dans les tirs. Hustrulid (1999), d'après McKenzie (1967)	6
<b>Fig 1-3</b>	Différentes conditions de fracturation in-situ (mines de Rouina et Chaabet El Ballout cliché personnel) 2024	10
<b>Fig 1-4</b>	Abattage de conglomérats à blocs massifs (d'après Bhandari, 1997)	10
<b>Fig 1-5</b>	Deux mailles de foration différentes confrontées à un même réseau de discontinuités. Illustration d'après l'U.S. Bureau of Reclamation., 2001	10
<b>Fig 1-6</b>	Formes d'arrachement produites en fonction de l'orientation des plans de discontinuité dans le massif, vue en plan (Jimeno et al., 1995)	12
<b>Fig 1-7</b>	Formes d'arrachement produites en fonction de l'orientation des plans de discontinuité dans le massif, vue en coupe (Wild, 1984)	12
<b>Fig 1-8</b>	Principaux types d'explosifs regroupés par familles. D'après Persson, Holmberg & Lee (1994)	14
<b>Fig 1-9</b>	Principaux types de maille utilisés pour les tirs en ciel ouvert	18
<b>Fig 1-10</b>	Effet du choix des retards entre lignes sur le dégagement des rangées abattues. Illustration d'après l'U.S. Bureau de Réclamation, 2001	18
<b>Fig 1-11</b>	Temps de réponse $T_{min}$ pour différentes roches et rapports banquette/diamètre de trou. Onederra & Esen (2003), d'après les données de Chiappetta (1998)	19
<b>Fig 1-12</b>	Déviation naturelle des forages causée par les strates du terrain (à gauche: avec tige guide pour limiter les déviations; à droite: sans tige guide). D'après Meyer, 2002	21
<b>Fig 1-13</b>	Influence d'une surforation irrégulière sur la qualité de la plate-forme inférieure après tir	22
<b>Fig 1-14</b>	Détente isentropique de deux explosifs aux régimes de détonation rapide (à gauche) et lent (à droite). D'après Brinkmann (1990)	24
<b>Fig 1-15</b>	Zones d'endommagement et de fissuration radiale autour d'un trou de mine. D'après Bhandari (1997)	26
<b>Fig 1-16</b>	Ecaillage d'une barre métallique soumise à l'impact en surface d'un explosif brisant. Christmann (1970), d'après Rinehart & Pearson (1954)	26
<b>Fig 1-17</b>	Lignes de champ mécanique dues à la pression quasi statique au sein d'un trou de mine lors de la phase de détente des gaz (Bhandari, 1997)	27

<b>Fig 1-18</b>	Relation entre énergie par unité de volume et création de surface par unité de volume pour 6 types de roches testées (Moser & Grasedieck, 2003)	32
<b>Fig 1-19</b>	Description qualitative d'une loi d'évolution pression-temps à la paroi d'un trou de mine. D'après Saharan (2008)	35
<b>Fig 1-20</b>	Facteur d'accroissement dynamique en traction pour des bétons. D'après Malvard & Crawford (1988)	38
<b>Fig 1-21</b>	Facteur d'accroissement dynamique pour différentes conditions de roches et vitesses de déformation imposées. D'après Lu (2010)	39
<b>Fig 1-22</b>	Illustration des concepts de densité de probabilité de fragments (rouge) et la répartition granulométrique (bleu), pour une masse de roche MT passée dans une série de n tamis.	41
<b>Fig 1-23</b>	Distribution granulométrique théorique (fonction de Rosin-Rammler).	42
<b>Fig 2-1</b>	Situation géographique de la mine de Rouina.	48
<b>Fig 2-2</b>	Schéma simplifié de la structure du bassin du Chéelif (Perrodon A., 1957)	53
<b>Fig 2-3</b>	Coupe géologique du flanc Ouest de Rouina	56
<b>Fig 2-4</b>	Carte géologique du gisement de Rouina	59
<b>Fig 2-5</b>	Colonne stratigraphique du massif de Rouina (Kireche O., 1977)	60
<b>Fig 2-6</b>	Coupe Est-Ouest montrant le contact socle-couverture	62
<b>Fig 2-7</b>	Coupe géologique montrant le rejet apparent d'une faille normale (ORGM 1992)	64
<b>Fig 3-1</b>	La vitesse particulière pour un signal mono fréquentiel - Arrêté du 22 septembre 1994	71
<b>Fig 3-2</b>	La Vitesse Particulière Suivant La Normes De L'USBM	72
<b>Fig 3-3</b>	Comparaisons européennes et américaines-1	73
<b>Fig 3-4</b>	Limites réglementaires des vitesses	73
<b>Fig 3-5</b>	Position des sources de tir et des dispositifs d'acquisition sur le terrain	80
<b>Fig 3-6-1</b>	Vitesse verticale mesurée (1.18 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1	85
<b>Fig 3-6-2</b>	Vitesse transversale mesurée (3.61 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1	85
<b>Fig 3-6-3</b>	Vitesse longitudinale mesurée (2.72 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1	86
<b>Fig 3-6-4</b>	Vitesse verticale mesurée (0.40 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1	86
<b>Fig 3-6-5</b>	Vitesse transversale mesurée (0.42 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1	87

<b>Fig 3-6-6</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.46 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1	87
<b>Fig 3-6-7</b>	Vitesse verticale mesurée (0.12 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1	88
<b>Fig 3-6-8</b>	Vitesse transversale mesurée (0.30 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1	88
<b>Fig 3-6-9</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.32 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1	89
<b>Fig 3-6-10</b>	Vitesse verticale mesurée (0.07 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1	89
<b>Fig 3-6-11</b>	Vitesse transversale mesurée (0.09 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1	90
<b>Fig 3-6-12</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.09 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1	90
<b>Fig 3-6-13</b>	Vitesse verticale mesurée (0.04 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1	91
<b>Fig 3-6-14</b>	Vitesse transversale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1	91
<b>Fig 3-6-15</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1	92
<b>Fig 3-7-1</b>	Vitesse verticale mesurée (0.32 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2	94
<b>Fig 3-7-2</b>	Vitesse transversale mesurée (0.92 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2	94
<b>Fig 3-7-3</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.66 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2	95
<b>Fig 3-7-4</b>	Vitesse verticale mesurée (0.16 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2	95
<b>Fig 3-7-5</b>	Vitesse transversale mesurée (0.30 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2	96
<b>Fig 3-7-6</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.20 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2	96
<b>Fig 3-7-7</b>	Vitesse verticale mesurée (0.03 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2	97
<b>Fig 3-7-8</b>	Vitesse transversale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2	97
<b>Fig 3-7-9</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2	98
<b>Fig 3-7-10</b>	Vitesse verticale mesurée (0.01 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2	98
<b>Fig 3-7-11</b>	Vitesse transversale mesurée (0.01 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2	99

<b>Fig 3-7-12</b>	Vitesse longitudinale mesurée (0.02 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2	99
<b>Fig 3-8</b>	Vitesses particulières enregistrées suivant les directions Long, Tran, Vert Volet de tir 01	100
<b>Fig 3-9</b>	Vitesses particulières enregistrées suivant les directions Long, Tran, Vert - Volet de tir 02	100
<b>Fig 4-1</b>	Sensibilité aux détonations de tirs	113
<b>Fig 4-2</b>	Projections liées à des irrégularités au niveau des fronts de tailles	115
<b>Fig 4-3</b>	Projections liées à des déviations des forations	115
<b>Fig 4-4</b>	Projections liées à des faiblesses dans le massif	115
<b>Fig 4-5</b>	Principaux impacts sur les zones humides	118
<b>Fig 4-6</b>	Vue panoramique du barrage d'Ouled Mellouk	119

## Liste des tableaux

N°	Titre/Sous-titre	Page
<b>Tab.1.1</b>	Equivalents carbone émis par tonne de minerai abattue dans les différentes étapes du cycle minier (Brent, 2010)	8
<b>Tab.1.2</b>	Propriétés de plusieurs explosifs français commercialisés. D'après Grange (2007)	15
<b>Tab.1.3</b>	Caractéristiques des explosifs algériens commercialisés. D'après ONEX	16
<b>Tab.1.4</b>	Lois d'évolution de la pression des gaz d'explosion à la paroi d'un trou de mine	35
<b>Tab.1.5</b>	Calcul des facteurs de la masse de roche (Rock Mass Factor) A (Lilly, 1986)	44
<b>Tab.2.1</b>	Coordonnées topographiques du périmètre Rouina (système géodésique universel transversal mercator Nord Sahara « UTM »)	49
<b>Tab.3.1</b>	Valeurs de pondération du signal de la bande fréquentielle	70
<b>Tab.3.2</b>	Normes de l'USBM	71
<b>Tab.3.3</b>	Coordonnées géographiques des stations d'enregistrement	81
<b>Tab.3.4</b>	Valeurs maximales des vitesses suivant les trois (03) directions au niveau des stations d'enregistrement données en mm/s-volet 01	84
<b>Tab.3.5</b>	Valeurs maximales des vitesses suivant les trois (03) directions au niveau des stations d'enregistrement données en mm/s-volet 02	93
<b>Tab.4.1</b>	Caractéristiques des tirs réalisés au niveau de la mine de Rouina	109
<b>Tab.4.2</b>	Apparition de dégâts consécutifs à des tirs de mines	110

# **Introduction Générale**

## INTRODUCTION GENERALE

L'exploitation minière, en particulier l'extraction des ressources en agrégats, constitue un pilier essentiel du développement économique et infrastructurel des nations. En Algérie, la wilaya d'Ain Défla se distingue par son riche potentiel minier, notamment grâce au gisement de fer de Rouina, qui représente une ressource stratégique pour l'industrie de la construction. Cependant, les techniques d'abattage à l'explosif, bien qu'indispensables pour l'extraction des minerais, soulèvent des interrogations majeures quant à leur efficacité opérationnelle, leur impact environnemental et les risques sécuritaires qu'elles engendrent. Ces préoccupations appellent une réflexion approfondie sur les méthodes d'optimisation des tirs à l'explosif, afin de concilier productivité, sécurité et respect de l'environnement.

La littérature scientifique actuelle explore divers aspects des techniques d'extraction minière, mais elle présente des lacunes significatives en ce qui concerne l'intégration des dimensions technico-économiques et environnementales dans l'analyse des opérations de minage [01]. En particulier, les études existantes négligent souvent les interactions complexes entre les propriétés géologiques des roches, les paramètres des tirs à l'explosif et leurs répercussions sur l'environnement [01 bis]. Cette absence d'approche pluridisciplinaire limite la capacité à proposer des solutions holistiques et durables pour l'industrie minière.

L'objectif de cette recherche est de maximiser l'efficacité des opérations d'extraction tout en minimisant leurs impacts négatifs, qu'ils soient économiques, sécuritaires ou environnementaux. La problématique centrale de cette thèse s'articule autour de la nécessité de définir des critères d'évaluation robustes pour la qualité de la fragmentation des roches, la sécurité des infrastructures avoisinantes et la gestion des nuisances environnementales, telles que les vibrations et les émissions sonores.

Les objectifs de cette étude sont multiples : évaluer les impacts technico-économiques des tirs à l'explosif, analyser la qualité de la fragmentation des roches et étudier les conséquences environnementales des opérations de minage. Les hypothèses de recherche reposent sur l'existence de corrélations significatives entre les paramètres des tirs (tels que la charge explosive, la géométrie du tir et les propriétés des roches) et les résultats opérationnels, ainsi que sur l'influence des caractéristiques géologiques locales sur l'efficacité des opérations d'abattage.

La méthodologie adoptée dans cette thèse repose sur une approche combinée, intégrant une revue exhaustive de la littérature scientifique, des analyses géotechniques et pétrographiques approfondies, ainsi que des mesures de vibrations in situ. Cette démarche permettra d'obtenir une vision globale des enjeux liés aux tirs à l'explosif dans le contexte spécifique de l'exploitation minière à Rouina, tout en proposant des solutions pratiques pour optimiser ces opérations.

La structure de cette thèse s'organise en quatre chapitres, chacun abordant une dimension spécifique de la problématique.

Le premier chapitre propose une synthèse critique de l'état de l'art concernant les tirs à l'explosif dans l'exploitation minière. Il examine les différents paramètres influençant la qualité de la fragmentation des roches, tels que les propriétés mécaniques et minéralogiques des formations géologiques, les caractéristiques des explosifs utilisés et les techniques des tirs. Une attention particulière est accordée aux impacts technico-économiques et environnementaux des tirs à l'explosif, ainsi qu'aux stratégies d'atténuation des nuisances environnementales.

Le deuxième chapitre se concentre sur la mine de fer de Rouina, en détaillant sa localisation géographique, ses caractéristiques géologiques et son importance dans le paysage minier algérien. Il explore également les infrastructures de transport, les conditions climatiques et les aspects socio-économiques de la région, tout en retraçant l'historique de l'exploitation minière sur ce site.

L'avant dernier chapitre décrit la méthodologie employée pour étudier les impacts des tirs à l'explosif. Il présente les protocoles de mesure des vibrations, les analyses géotechniques et pétrographiques réalisées, ainsi que les outils utilisés pour évaluer la qualité de la fragmentation des roches. L'accent est mis sur la nécessité de prédire les niveaux vibratoires afin de garantir la sécurité des infrastructures environnantes et d'optimiser les opérations de minage.

Le quatrième chapitre examine les impacts environnementaux des opérations des tirs, notamment les nuisances sonores, les émissions de gaz à effet de serre et les vibrations induites par les tirs à l'explosif. Il propose également des mesures d'atténuation pour réduire ces impacts, en mettant l'accent sur l'intégration paysagère, la gestion durable des ressources et l'adoption de pratiques minières responsables.

Enfin, une conclusion générale qui résume les principaux résultats de la recherche, en répondant à la problématique initiale et en mettant en lumière les contributions scientifiques et pratiques de cette thèse. Elle évalue également les forces et les limites de l'étude, tout en proposant des recommandations pour des recherches futures et des pistes d'amélioration. L'importance d'une

approche durable et intégrée dans l'exploitation minière est soulignée, afin de concilier développement économique et préservation de l'environnement.

Cette thèse s'inscrit ainsi dans une démarche à la fois scientifique et opérationnelle, visant à apporter des réponses concrètes aux défis posés par l'exploitation minière moderne, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour une gestion plus durable des ressources naturelles.

**CHAPITRE I**  
**Recherche Bibliographique**

## 1. Introduction:

Les tirs à l'explosif visent à fragmenter les masses rocheuses, rendant ainsi l'accès aux ressources minérales plus facile et plus rapide. En effet, les explosions permettent de réduire la taille des roches en morceaux plus petits, ce qui facilite leur extraction mécanique. Une fois cette opération réalisée, les matériaux fragmentés peuvent être transportés vers les installations de traitement, où ils seront soumis à des processus supplémentaires tels que le broyage, le criblage et la concentration, en fonction des spécificités du gisement et des ressources recherchées. Cette méthode, en plus d'optimiser les coûts et les délais d'exploitation, garantit également une plus grande efficacité dans l'ensemble de la chaîne de production minière [01 ter]. Ce processus dépend de multitude de paramètres qui jouent un rôle clé non seulement dans la rentabilité des opérations minières, mais aussi dans la sécurité des travailleurs et l'impact environnemental du site d'exploitation. Parmi ces facteurs, on retrouve la quantité et la qualité des explosifs utilisés, la méthode de détonation, ainsi que la configuration géologique du gisement. Une gestion précise de ces éléments permet d'optimiser l'efficacité de l'extraction tout en minimisant les coûts opérationnels [02] et [03]. En effet, la qualité de la fragmentation des roches joue un rôle déterminant tout au long du cycle de production minière, depuis le chargement et le transport des matériaux abattus jusqu'au concassage et au broyage [04]. Une fragmentation optimale permet ainsi de réduire la consommation énergétique et d'améliorer les performances globales de l'exploitation. À l'inverse, une fragmentation inadaptée peut entraîner une usure prématurée des équipements, une augmentation des coûts opérationnels et des conséquences environnementales négatives.

L'enjeu principal des tirs à l'explosif repose sur l'optimisation de plusieurs paramètres interdépendants. D'une part, il s'agit d'améliorer la fragmentation afin de maximiser la productivité et de limiter les coûts d'exploitation [04]. D'autre part, il convient de maîtriser les effets secondaires indésirables, tels que les vibrations, les projections rocheuses, les émissions de gaz à effet de serre et les nuisances sonores, qui peuvent impacter la stabilité des infrastructures avoisinantes et la qualité de l'environnement [02, 03]. Une mauvaise gestion des tirs peut ainsi engendrer des répercussions économiques importantes tout en compromettant la sécurité des travailleurs et la durabilité de l'exploitation. Dans ce contexte, l'optimisation des tirs à l'explosif représente un défi majeur nécessitant une approche pluridisciplinaire, combinant études géotechniques, choix des explosifs, modélisation des tirs et analyses environnementales. L'intégration de ces éléments permet non seulement d'améliorer l'efficacité des opérations minières, mais aussi de minimiser leur impact sur l'environnement et les populations locales.

Ce chapitre vise à établir un état de l'art des connaissances actuelles relatives aux impacts technico-économiques et environnementaux des tirs à l'explosif dans l'industrie minière. L'analyse portera sur les principaux paramètres influençant la qualité de fragmentation des roches, les performances opérationnelles et les externalités environnementales générées par ces opérations. Plus précisément, l'étude se focalisera sur plusieurs aspects clés, notamment l'influence des propriétés mécaniques et minéralogiques des formations rocheuses, les caractéristiques des explosifs employés ainsi que la configuration des plans de tir [04]. Enfin, une évaluation approfondie des effets environnementaux sera menée, englobant les émissions polluantes, les nuisances vibratoires et les risques liés aux projections rocheuses, tout en explorant des stratégies permettant d'en limiter les impacts.

Afin d'atteindre ces objectifs, la méthodologie adoptée repose sur une revue exhaustive de la littérature scientifique et technique entourant des tirs en milieu minier. L'approche retenue comprend plusieurs étapes, notamment une analyse des bases théoriques relatives aux mécanismes de fragmentation des roches et aux modèles prédictifs permettant d'évaluer la qualité des tirs. Une étude détaillée des paramètres influençant les résultats de l'abattage sera également menée, en intégrant les propriétés géomécaniques des formations rocheuses ainsi que les caractéristiques physiques et chimiques des explosifs utilisés. De plus, les impacts environnementaux des tirs seront examinés sous l'angle de la productivité, et des nuisances générées, afin de proposer des solutions d'optimisation adaptées. Enfin, une synthèse des méthodes existantes sera réalisée, en mettant en avant les approches basées sur la spécification analytique, l'instrumentation de terrain et l'amélioration des pratiques de tir [04].

L'organisation de ce chapitre suit une logique progressive visant à approfondir la compréhension des mécanismes sous-jacents aux tirs à l'explosif et de leurs impacts. Une première partie sera consacrée à l'analyse des mécanismes de fragmentation des roches et aux critères d'évaluation de la qualité des tirs, en mettant en avant les principaux facteurs influençant la distribution blocométrique des matériaux abattus. La seconde partie abordera les implications techniques de tirs, en examinant leur influence sur le rendement des opérations de chargement, de transport et de traitement du minerai [04]. Par la suite, une troisième section se focalisera sur les conséquences environnementales des tirs, en explorant les nuisances générées et les mesures d'atténuation envisageables. Enfin, une synthèse des connaissances actuelles sera proposée, accompagnée de pistes de recherche et de recommandations visant à améliorer la gestion des tirs à l'explosif dans une perspective d'exploitation minière durable.

Ce premier chapitre pose les bases scientifiques et techniques nécessaires à la compréhension des impacts des tirs à l'explosif en milieu minier. L'optimisation de ces

opérations représente un enjeu stratégique majeur pour l'industrie extractive, impliquant une gestion rigoureuse des paramètres de fragmentation et une prise en compte accrue des considérations économiques et environnementales. Une meilleure maîtrise de ces facteurs permettra non seulement d'améliorer la rentabilité des exploitations minières, mais aussi de réduire leur empreinte écologique. Cette approche s'inscrit ainsi dans un cadre plus large visant à concilier performance industrielle et responsabilité environnementale, dans un contexte où les exigences réglementaires deviennent de plus en plus strictes et où la durabilité des activités extractives est une priorité croissante.

## **2. Conséquences des résultats du tir**

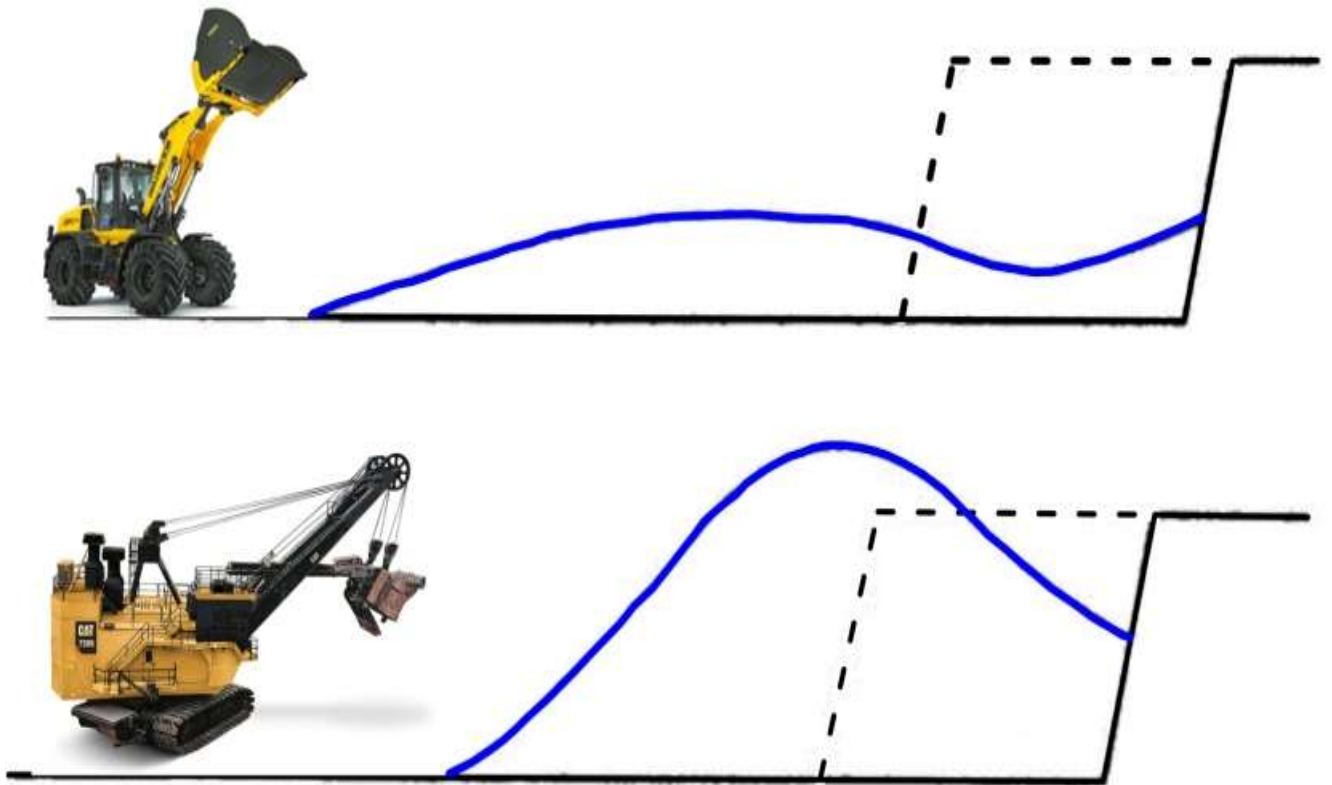
### **2.1. Retombées technico-économiques**

La qualité du dégagement de la roche après un tir joue un rôle déterminant dans l'efficacité des opérations minières, en influençant directement la productivité des phases de chargement et de transport. La disposition et la forme du tas abattu conditionnent l'accessibilité et la facilité d'extraction du matériau, impactant ainsi le rendement des engins de chargement [01 ter]. Une fragmentation adéquate optimise le taux de remplissage des godets des chargeuses, réduisant le nombre de cycles nécessaires pour évacuer un volume donné et améliorant ainsi la productivité globale des opérations.

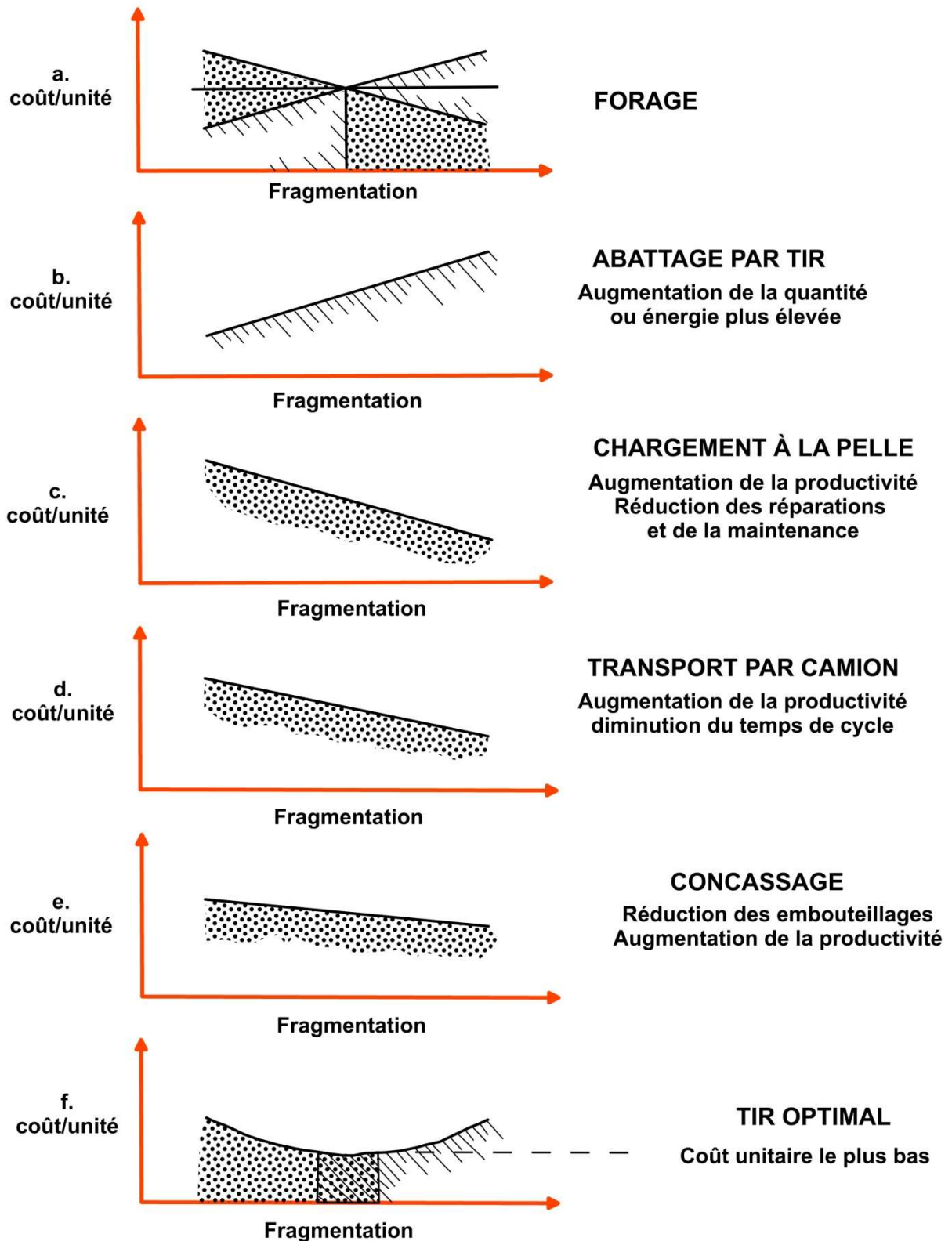
Le cycle de chargement et de transport est étroitement lié à la qualité de la fragmentation. Une granulométrie homogène et bien maîtrisée permet d'éviter les obstructions et réduit les pertes de temps associées au tri des matériaux sur site. En conséquence, le débit du circuit de concassage est significativement amélioré lorsque la fragmentation obtenue est plus fine et mieux répartie. En effet, une répartition granulométrique favorable facilite le passage des matériaux dans les concasseurs, limitant ainsi les blocages et optimisant les performances de broyage.

L'efficacité du processus d'abattage dépend également de la quantité et du type d'explosifs utilisés. Une charge bien dosée permet d'optimiser la micro-fragmentation, c'est-à-dire la création de microfissures au sein des fragments rocheux, ce qui facilite le broyage ultérieur et réduit la consommation énergétique des équipements de traitement. Plusieurs études expérimentales ont démontré que l'augmentation de la consommation spécifique de l'explosif contribue à améliorer le rendement du broyage, réduisant ainsi les coûts d'exploitation associés à la préparation du minerai.

D'un point de vue économique, l'optimisation des paramètres de tir permet de trouver un équilibre entre les coûts liés à l'utilisation des explosifs et les gains de productivité en aval. Une analyse des tendances des coûts miniers en fonction du degré de fragmentation met en évidence l'existence d'un optimum économique. Lorsque la fragmentation est insuffisante, les opérations de concassage et de broyage deviennent énergivores et coûteuses, tandis qu'un excès de fragmentation peut engendrer une surconsommation d'explosifs sans bénéfice significatif en termes de productivité. Ainsi, la gestion efficace des tirs à l'explosif représente un levier stratégique pour améliorer la rentabilité des exploitations minières tout en minimisant l'impact environnemental des opérations.



**Figure 1-1:** Formes idéales pour chargeuse à pneus et pelle hydraulique, [05].



**Figure 1-2:** Evolution des coûts unitaires individuels de chaque processus minier en fonction du degré de fragmentation obtenu dans les tirs. [06 - 07].

## **2.2. Retombées environnementales**

### **a. Consommation énergétique et gaz à effet de serre**

L'impact environnemental des opérations d'abattage à l'explosif constitue un enjeu majeur dans l'industrie minière, notamment en ce qui concerne la consommation énergétique, les émissions de gaz à effet de serre, les vibrations induites dans le sous-sol et la surpression aérienne générée par les explosions. Ces phénomènes doivent être évalués et maîtrisés afin de limiter les nuisances et de garantir une exploitation durable des ressources.

L'analyse des émissions de gaz à effet de serre associées au cycle minier montre que le procédé d'abattage à l'explosif contribue de manière marginale aux émissions totales. En effet, les rejets de CO<sub>2</sub> et autres gaz équivalents directement attribuables à cette phase sont nettement inférieurs à ceux générés par les étapes subséquentes, notamment le chargement, le transport et le traitement mécanique des matériaux. Une étude spécifique a permis d'établir une hiérarchisation des émissions en fonction des procédés, mettant en évidence que le concassage et le broyage représentent les principales sources de pollution en raison de leur forte demande énergétique. La consommation d'explosifs influe néanmoins sur la fragmentation du matériau, ce qui peut indirectement influencer la performance des étapes suivantes et, par conséquent, les émissions globales du site minier.

Lors de la détonation, une partie significative de l'énergie libérée se dissipe sous forme d'ondes sismiques qui se propagent à travers la masse rocheuse environnante. Cette énergie résiduelle, généralement estimée entre 3 et 12 % de l'énergie totale du tir, est responsable des vibrations induites dans le sol, susceptibles d'affecter les infrastructures avoisinantes et d'altérer la stabilité des terrains. Le contrôle des paramètres de tir, notamment la charge unitaire d'explosif et la séquence de tir, permet d'atténuer ces vibrations et d'en limiter les impacts. Des techniques avancées, telles que l'utilisation des détonateurs à microretards précis, sont mises en œuvre pour minimiser ces effets et assurer un meilleur contrôle des ondes sismiques générées.

Par ailleurs, la détente rapide des gaz d'explosion dans l'atmosphère entraîne la formation d'une onde de surpression acoustique. Cette onde peut générer des nuisances sonores perceptibles à grande distance, en fonction de l'intensité de l'explosion et des conditions atmosphériques. Dans certains cas extrêmes, les effets de la surpression peuvent causer des dommages matériels, notamment la rupture de vitres et la déformation de structures légères situées à proximité. L'explosion accidentelle survenue à l'ancienne usine AZF-France illustre l'ampleur potentielle de ces phénomènes, où des dégâts ont été observés sur plusieurs kilomètres. Afin de réduire ces nuisances, les exploitants miniers adoptent des stratégies d'atténuation telles que l'utilisation

d'explosifs à faible vitesse de détonation et le confinement des tirs par bourrage optimal des forages.

La gestion des impacts environnementaux liés aux tirs à l'explosif repose ainsi sur une approche intégrée combinant des ajustements techniques, des modélisations prédictives et des suivis instrumentés afin d'optimiser les performances du processus tout en limitant les nuisances pour l'environnement et les populations avoisinantes.

**Table 1.1.** Equivalents carbone émis par tonne de minerai abattue dans les différentes étapes du cycle minier [08]

Procédés	Emissions (CO <sub>2</sub> - e, kg/t)	Ratio abattage/procédé
Abattage	0.2	1
Chargement & Transport	5	1/25
Concassage & Broyage	27	1/135

### 3. Paramètres influençant les résultats d'abattage

#### 3.1. Matrice rocheuse abattue

##### a. Propriétés structurales

Les propriétés structurales de la roche abattue jouent un rôle déterminant dans l'efficacité des tirs à l'explosif. Elles influencent directement le comportement de la masse rocheuse sous l'effet des charges explosives et conditionnent la fragmentation obtenue. Toutefois, ces caractéristiques géologiques restent difficilement contrôlables dans un contexte opérationnel, ce qui impose une adaptation constante des paramètres de tir afin d'optimiser le rendement et minimiser les inefficacités.

La variabilité des structures géologiques se traduit par des configurations contrastées, (Fig.1-3) [09]. Les discontinuités naturelles présentes dans la masse rocheuse, telles que les failles, diaclases et plans de stratification, influencent la propagation des fractures induites par l'explosion. Lorsque les ondes de choc se propagent à travers la roche, elles sont systématiquement atténuées ou déviées par ces discontinuités, entraînant une bifurcation ou une dissipation partielle de l'énergie libérée. La microstructure et les anomalies naturelles de la roche compliquent ainsi le processus de fragmentation dynamique, en favorisant l'apparition de fractures imprévisibles et en réduisant l'efficacité du tir.

Un cas particulièrement défavorable est représenté par la présence d'horizons conglomératiques faiblement cimentés, dans lesquels les éléments grossiers affichent une résistance mécanique élevée. Dans cette configuration, le processus de réduction granulométrique devient

extrêmement complexe et coûteux, car seule la fraction de blocs directement intersectée par les forages subit une fragmentation effective, (Fig. 1-6). Lorsque les blocs sont massifs et peu affectés par des discontinuités internes, les tirs ne permettent pas d'obtenir une fragmentation homogène et nécessitent souvent des reprises mécaniques coûteuses.

Face à une fréquence élevée de discontinuités, l'adaptation du diamètre des forages constitue une solution technique permettant d'améliorer la fragmentation. Une réduction du diamètre des trous de mine permet de resserrer la maille de foration tout en maintenant une consommation spécifique d'explosifs optimale. Cette stratégie permet de mieux exploiter la fracturation naturelle et d'éviter la présence de zones non fragmentées au sein du gradin. Une maille de forage inadaptée peut en effet générer des volumes de roche peu ou non affectés par l'explosion, ce qui complique le chargement et réduit la productivité des opérations d'extraction (Fig. 1-5). La caractérisation précise de la structure de la masse rocheuse abattue reste une tâche difficile en contexte industriel. Cependant, des approches d'observation et d'enregistrement permettent de recueillir des informations exploitables pour ajuster les tirs. Parmi ces techniques, l'analyse des intersections des plans de discontinuités avec le front du gradin ou la plateforme supérieure fournit des indications sur l'orientation et la distribution des fractures naturelles. De plus, l'imagerie des parois de trous forés permet de reconstituer une modélisation tridimensionnelle de la blocométrie *in situ*, facilitant ainsi l'adaptation des paramètres de foration et de chargement des explosifs [10-11].

En combinant ces observations avec des simulations numériques et des modèles empiriques, il devient possible d'optimiser la conception des tirs afin de maximiser l'efficacité de la fragmentation et de réduire les impacts environnementaux et économiques liés aux tirs inefficaces.



Figure 1.3. Différentes conditions de fracturation in-situ [09].

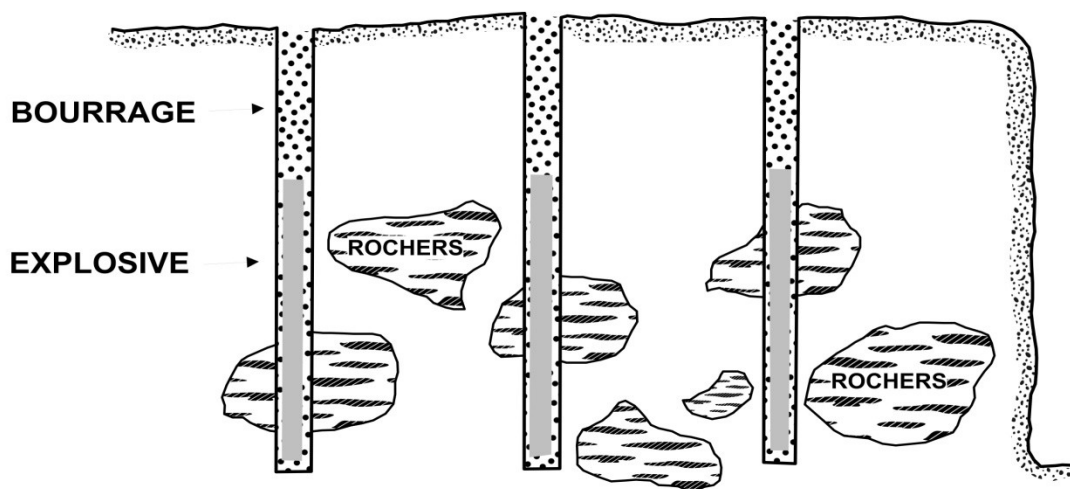


Figure 1.4. Abattage de conglomérats à blocs massifs [12].

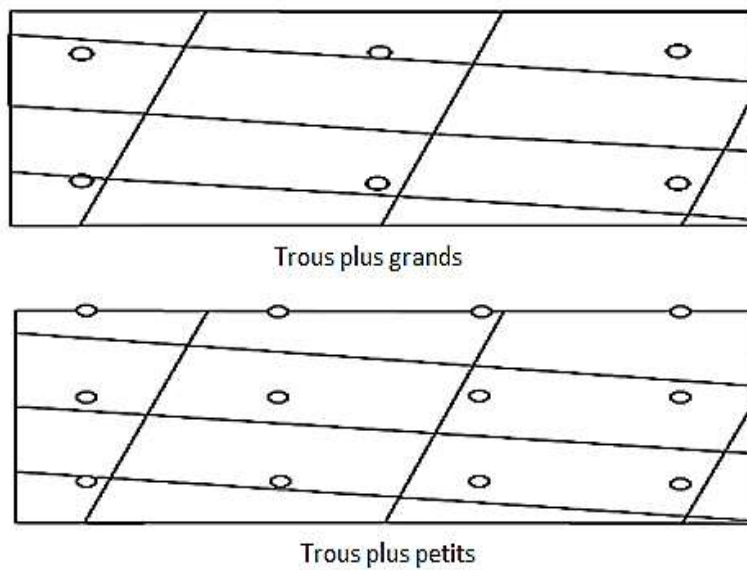


Figure 1.5. Deux mailles de foration différentes confrontées à un même réseau de discontinuités [13]

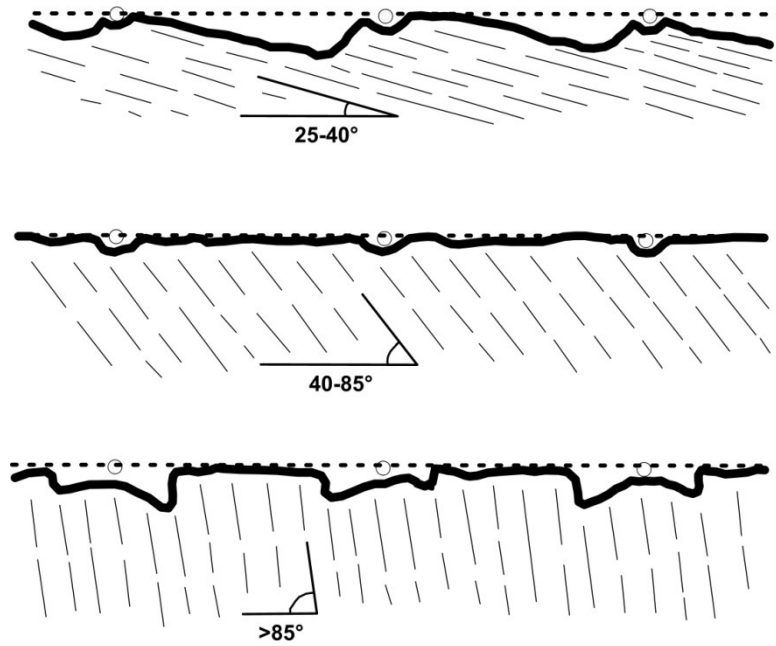
## **b. Discontinuités stratigraphiques et plans de fracturation**

L'agencement des discontinuités stratigraphiques et des plans de fracturation au sein de la masse rocheuse influence considérablement la réponse du matériau aux sollicitations induites par l'explosion. La disposition de ces plans de faiblesse par rapport à l'orientation du gradin et à l'implantation des charges explosives conditionne non seulement l'efficacité du tir, mais également la morphologie des surfaces résiduelles après abattage.

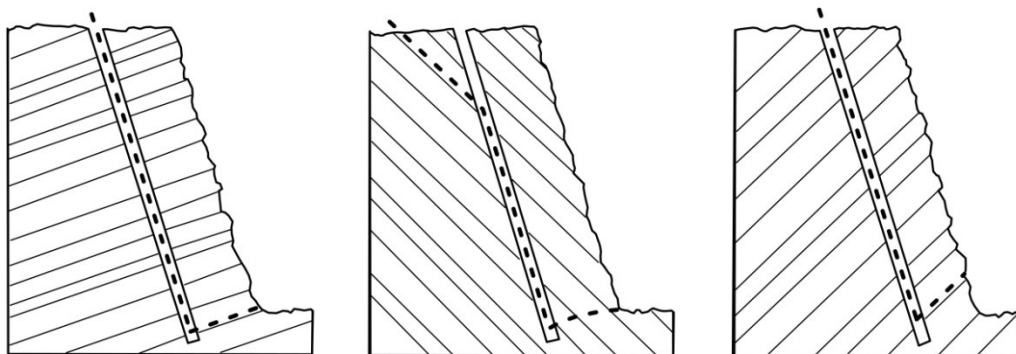
Lorsque discontinuités sont parallèles à la face du gradin, la fragmentation est souvent plus homogène, les surfaces de rupture épousant naturellement ces plans de faiblesse. À l'inverse, si ces discontinuités sont perpendiculaires ou inclinées par rapport à la face du gradin, la propagation des ondes de choc et des fractures se heurte à des résistances variables, engendrant des phénomènes d'arrachement irréguliers. Ce comportement est particulièrement visible dans les plans horizontaux (Fig. 1-6), où des blocs massifs peuvent subsister si les plans de stratification présentent une cohésion suffisante pour limiter la rupture.

Dans les plans verticaux (Fig. 1-7), la configuration des fractures influence la stabilité du gradin post-abattage. Une orientation défavorable des discontinuités par rapport à la direction de propagation des ondes peut entraîner des éclatements excessifs, des instabilités locales, voire des phénomènes de basculement de blocs non suffisamment fragmentés. Dans ces conditions, l'optimisation des paramètres de foration et de chargement devient primordiale pour limiter les zones de sous-fragmentation et éviter l'apparition d'irrégularités compromettant la stabilité des fronts d'abattage.

L'analyse préalable de la structure géologique et la prise en compte des caractéristiques des discontinuités dans la conception des tirs permettent ainsi d'anticiper ces effets et d'améliorer l'efficacité de la fragmentation tout en garantissant la sécurité des opérations d'extraction.



**Figure 1.6.** Formes d'arrachement produites en fonction de l'orientation des plans de discontinuité dans le massif, vue en plan [14]



**Figure 1.7.** Formes d'arrachement produites en fonction de l'orientation des plans de discontinuité dans le massif, vue en coupe [15]

### c. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques de la roche jouent un rôle déterminant dans la réponse du matériau aux sollicitations dynamiques induites par l'explosion. La résistance en traction, la dureté et la ténacité à la rupture influencent directement le degré de fragmentation obtenu après un tir. Des études expérimentales menées par Bohloli et Hoven (2007), ont permis d'évaluer ce phénomène à travers des essais réalisés à la fois en laboratoire et en conditions réelles sur quatre types de roches distincts. Leurs résultats montrent une corrélation directe entre la résistance en traction ( $R_t$ ) et la proportion de fines générées, suggérant que les matériaux plus résistants en traction tendent à produire un volume plus important de particules fines après abattage [16].

D'une manière plus générale, la répartition granulométrique des produits issus de la fragmentation semble être directement liée aux propriétés intrinsèques de la roche. Lorsqu'un matériau est soumis à une séquence de comminution optimisée, la forme de sa courbe granulométrique reste relativement stable tout au long du processus, indiquant que les mécanismes de rupture suivent des schémas prévisibles et reproductibles [17-18]. Ce comportement a conduit Steiner à introduire le concept de Natural Breakage Characteristics (NBC), qui décrit la tendance naturelle d'un matériau à se fragmenter selon des plans de faiblesse spécifiques.

L'identification et la caractérisation de ces propriétés mécaniques sont donc essentielles pour l'optimisation des tirs à l'explosif. Elles permettent d'ajuster les paramètres de forage et de chargement afin de maximiser l'efficacité de la fragmentation tout en limitant les effets indésirables tels que la surproduction de fines ou la génération de blocs surdimensionnés. En intégrant ces données dans les modèles prédictifs de comportement des roches, il devient possible d'améliorer la planification des opérations minières et d'optimiser les performances des procédés en aval, notamment le transport et le traitement mécanique du minerai.

### **3.2. Type d'explosif et propriétés énergétiques**

Les composés explosifs varient considérablement en fonction de leur formulation chimique et de leur structure, ce qui influence directement leur comportement lors de l'explosion. Selon Grange (2007) [19], plusieurs types d'explosifs ont été classifiés en fonction de leur rapidité de décomposition, c'est-à-dire leur vitesse de détonation, qui est un paramètre clé pour évaluer leur performance dans le cadre d'une opération minière. Un inventaire détaillé des caractéristiques techniques de ces explosifs est fourni dans la Table 1.2. De plus, un diagramme illustrant les principaux types d'explosifs utilisés mondialement est présenté à la Figure 1-8.

La décomposition rapide d'un explosif permet de libérer une quantité significative d'énergie, et cette énergie est déterminée par plusieurs facteurs, notamment la composition chimique de l'explosif et la vitesse à laquelle il se décompose. Plus la vitesse de détonation est élevée, plus l'énergie libérée lors de l'explosion est importante, ce qui a un impact direct sur l'efficacité de la fragmentation de la roche.

Lorsque l'explosif se détonne, il génère une onde de choc extrêmement intense qui se propage à travers la roche à une vitesse supersonique. Cette onde de choc libère une énergie cinétique qui permet de briser la roche en fragments de tailles variables, facilitant ainsi l'extraction du minerai. En parallèle de l'onde de choc, l'explosion provoque une élévation brutale de la pression dans l'environnement immédiat, une pression qui agit sur la roche en la comprimant.

Cette compression supplémentaire contribue non seulement à la fragmentation des matériaux, mais également à leur déplacement, facilitant ainsi le processus de désagrégation du massif rocheux et optimisant l'efficacité de l'opération d'abattage.

Le choix du type d'explosif, en fonction de ses propriétés énergétiques, est donc un élément crucial pour optimiser la fragmentation et minimiser les coûts d'opération dans les carrières ou les mines. La compréhension des différentes formulations d'explosifs et de leurs comportements permet de mieux contrôler la qualité du produit final tout en réduisant les risques associés à une mauvaise utilisation ou à des explosions mal maîtrisées.

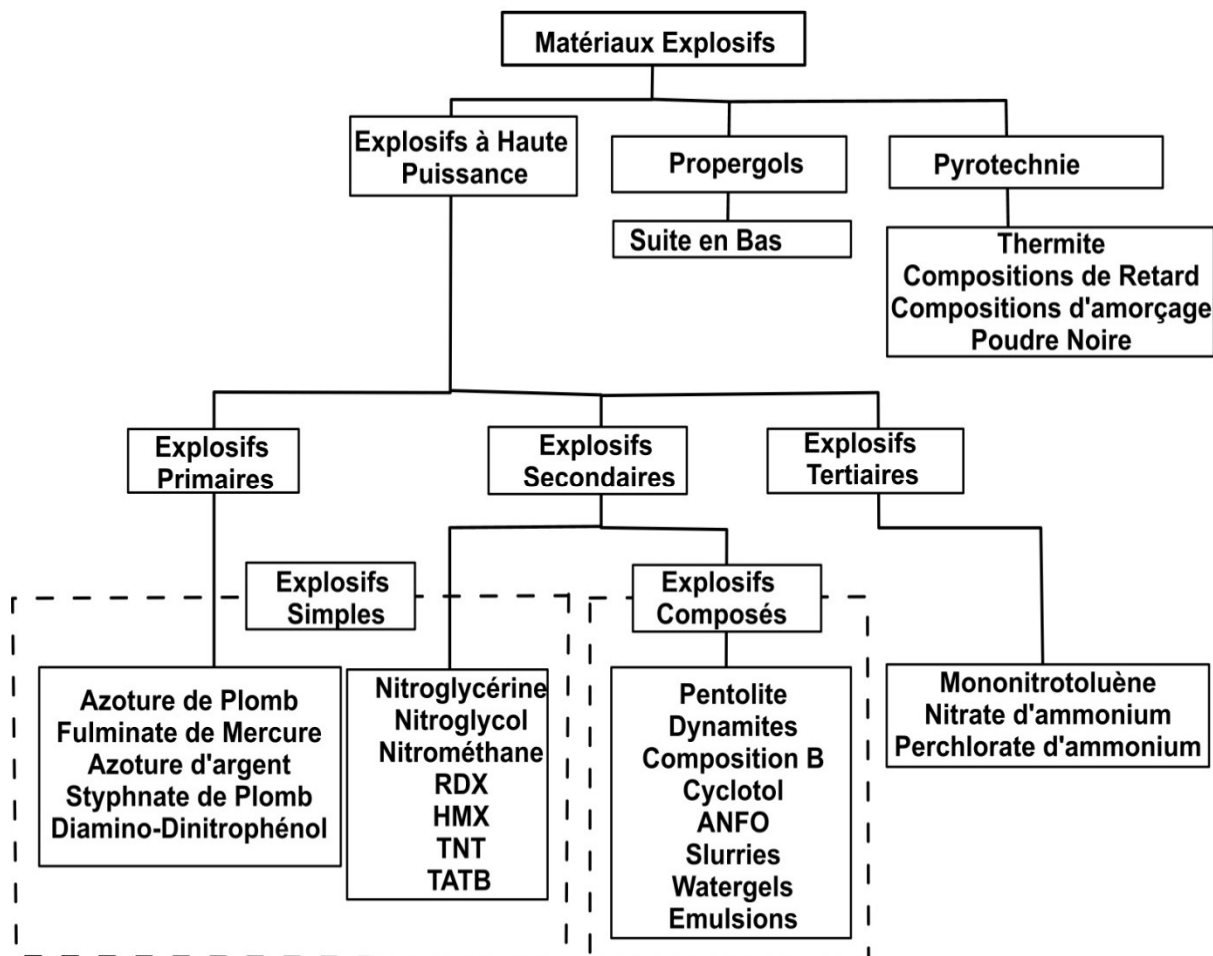


Figure 1.8. Principaux types d'explosifs regroupés par familles [20]

**Tableau 1.2.** Propriétés d'explosifs utilisés pour l'exploitation minière. [19]

Explosif	Densité (kg/L)	Vit. détona <sup>tion</sup> (m/s)	Energie de choc / de gaz (MJ/kg)	Fabricant
<b><i>Dynamites</i></b>				
Dvnaroc 6A	1.42	6200	2.10 / 1.90	Nitrochimie
Dvnaroc 9A	1.45	6500	2.40 / 2.10	Nitrochimie
Eurodvn 2000	1.42	6200	2.09 / 1.92	Nobel
F 19	1.45	6500	2.38 / 2.09	Nobel
Titadvn 30 AG	1.50	6000	2.37 / 2.28	Titanite
<b><i>Emulsions encartouchées</i></b>				
Nitram 5	1.20	5500	1.70 / 1.80	Nitrochimie
Nitram 9	1.20	5500	1.70 / 2.10	Nitrochimie
Explus	1.28	5500	2.40 / 2.40	Nitrochimie
Emulstar 3000	1.26	5500	1.75 / 1.88	Nobel
Emulstar 5000	1.28	5500	1.82 / 2.07	Nobel
Emulstar 8000+	1.28	5600	2.26 / 2.67	Nobel
Titamax 4000	1.20	4900	1.46 / 1.55	Titanite
Titamax 5000	1.20	4750	1.94/1.93	Titanite
Titamax 6000	1.28	5000	1.82 / 2.07	Titanite
Titamax 8000+	1.28	5500	2.40 / 2.40	Titanite
<b><i>Nitrate-fuels</i></b>				
Nitro D8	0.80	3200		Nitrochimie
Nitral	0.81	3400		Nitrochimie
NR 20	0.83	3700	1.05 / 1.69	Nobel
N 135	0.90	3900	1.37 / 2.06	Nobel
Anfolite 1	0.83	2900	1.55 / 2.24	Titanite
Anfolite 3	0.95	3260	1.67 / 2.47	Titanite
<b><i>Emulsions fabriquées sur site</i></b>				
Blendex 30	1.15	3400		Nitrochimie
Blendex 30A	1.17	3500		Nitrochimie
Blendex 70	1.22	4900	1.35 / 1.65	Nitrochimie
Blendex 70A	1.22	4500	1.62 / 1.95	Nitrochimie
Gemulsite 60	1.15	4000	1.31 / 1.73	Nobel
Gemulsite 80	1.25	5100	1.45 / 1.59	Nobel
Gemulsite 100	1.25	5100	1.71 / 1.78	Nobel
Emultex 100	1.25	5300		Titanite
Emultex 200	1.15	5100		Titanite
Emultex 300	0.95	-		Titanite

**Tableau 1.3.** Caractéristiques des explosifs commercialisés en Algérie. D'après ONEX.

1.1- Caractéristiques des explosifs (ONEX)				
Désignations	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Vitesse de Détonation (m/s)	Résistance à l'eau	Domaine d'utilisation
ANFOMILE	0,85	2500-2700	Faible	Travaux à ciel ouvert +Milieu sec+ roches de dureté moyenne et tendre
N18	0,95	3500	Faible	Très utilisé dans les recherches sismiques+ Roches tendres+ Milieu sec ou très peu humide
GEONITE	1,50	5800	Très Bonne	Travaux à ciel ouvert et souterrains + roches très dures et humides
GELANIT I	1,45	5800		
GELANIT II	1,50	5500		
MARMANIT I	0,96	4400	Moyenne	de dureté moyennes et tendres et peu humides
MARMANIT II	1,05	4500		
MARMANIT III	1,00	4200		
TEMEX I	1,22	4500-5500	Très Bonne	Travaux à ciel ouvert et souterrains roches très dures et moyennes
TEMEX II	1,22	4000-5000	Très Bonne	

### 3.3. Couplage explosif/roche

La propagation des ondes de choc mécaniques dans le massif rocheux se fait au niveau des parois des trous de mine grâce à la production et à l'expansion subite des gaz d'explosion à une pression extrêmement élevée.

La pression d'explosion d'une charge est souvent estimée au moyen de la relation suivante (Eq.1.1):

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot P_d \quad (\text{Eq.1.1})$$

$P_d$  est la pression de détonation de l'explosif (fournie par les fabricants d'explosif sur les fiches de produit) et provient de la théorie de la détonation selon *Chapmann-Jouguet*: (Eq.1.2)

$$P_d = \frac{\rho_e \cdot D^2}{4} \quad (\text{Eq.1.2})$$

où  $\rho_e$  et  $D$  sont respectivement la densité et la vitesse de détonation de l'explosif.

En pratique, le pic de pression de gaz réellement appliqué à la paroi est différent de  $P_e$  à cause des imperfections de couplage entre la charge et le trou de mine [21].

Pour les explosifs encartouchés, il est essentiel que le diamètre de la charge explosive soit plus petit que celui du trou afin de permettre à la cartouche de descendre jusqu'au fond du trou.

Si  $r_1$  est le rayon de la cartouche d'explosif, et  $r_2$  le rayon du trou, et en supposant que les gaz d'explosion se détendent à l'intérieur du trou selon un processus isentropique ( $PV^\gamma = \text{cte}$ ), alors la pression des gaz après détonation  $P_1$  et la pression des gaz après détente et occupation du volume entier du trou  $P_2$  sont liées par la relation suivante (Eq.1.3):

$$P_2 = P_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{2\gamma} \quad (\text{Eq.1.3})$$

### 3.4. Géométrie du plan de tir et du chargement

Aux fins d'abattre la roche, les trous de mine sont alignés en plusieurs rangées selon une géométrie théoriquement établie, principalement influencée par le diamètre foration utilisé. L'épaisseur de roche entre lignes, appelée banquette, doit être proportionnelle au diamètre du trou [22], (Eq.1.4):

$$B = K_B \cdot d_t \quad (\text{Eq.1.4})$$

où  $K_B$  est une constante influencée par le mode d'interaction entre roche et explosif, et  $d_t$  le diamètre des charges.

La détermination de cette constante relève encore à ce jour de l'expérience pratique et aucune méthodologie générale ne peut être appliquée. Elle peut varier entre 20 et 40, voire plus [23].

En fonction de la banquette choisie, plusieurs paramètres sont déduits:

- la hauteur de bourrage des trous  $H_B$  ;
- la profondeur de surfuration  $P_{sf}$  ;
- l'espacement entre trous d'une même ligne  $S$ .

La valeur de l'espacement est déterminée par le rapport : espacement/banquette,  $S/B$ , qui en pratique se situe entre 1 et 2. En fonction de la séquence d'amorçage, la banquette et l'espacement effectif entre trous peut varier de manière significative [24]. Dans de nombreuses situations, un rapport espacement/banquette élevé s'avère plus efficace en termes de fragmentation que l'utilisation de mailles plus resserrées.

La recommandation théorique pour la hauteur de bourrage,  $H_b$ , est d'environ  $B$  et peut être ajustée en fonction des circonstances, comme le type de matériau de bourrage utilisé. Quant à la profondeur de surfuration, elle est normalement suggérée comme  $P_{sf} = B/3$ , mais peut être considérablement ajustée selon les conditions du massif rocheux, telles que le pendage des couches ou dureté de la roche abattue, comme illustré dans la Figure 1-7. Ces recommandations de géométrie de tir sont largement basées sur les travaux de Langefors & Kihlström (1963) [25], qui sont toujours considérés comme une référence dans ce domaine.

Les lignes de tir sont classiquement disposées en configuration parallèle ou en quinconce (Fig. 1-9).

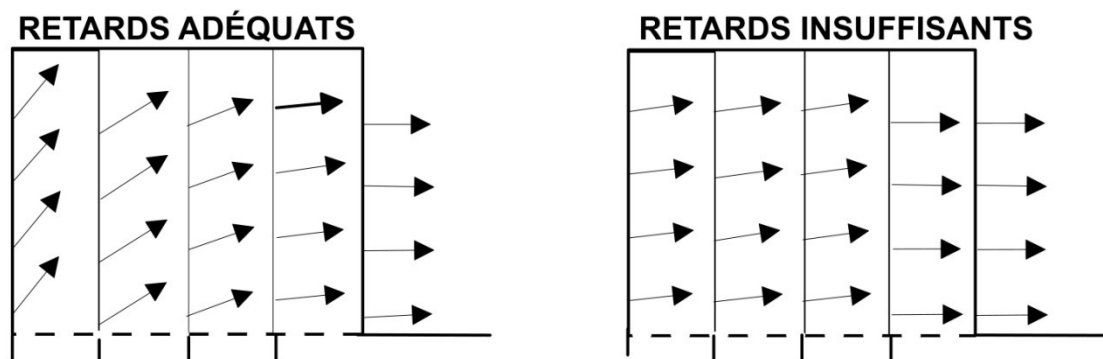


**Figure 1.9.** Principaux types de maille utilisés pour les tirs en ciel ouvert

### 3.5. Séquence d'amorçage

L'utilisation de microretards entre les différents trous et lignes de tir permet de réaliser un abattage séquentiel contrôlé des portions d'un plan de tir. Ce procédé garantit que les fragments de roche générés par les premiers trous commencent leur mouvement avant que les autres trous voisins n'exploient, ce qui est essentiel pour obtenir un tir optimal et une bonne configuration du tas de roche abattu. En outre, l'application de retards à l'amorçage n'est pas seulement une considération technique, mais aussi environnementale. En effet, les vibrations engendrées par des charges explosant simultanément se propagent de manière cumulative, et cette accumulation peut avoir un impact négatif sur l'environnement à proximité du site d'explosions.

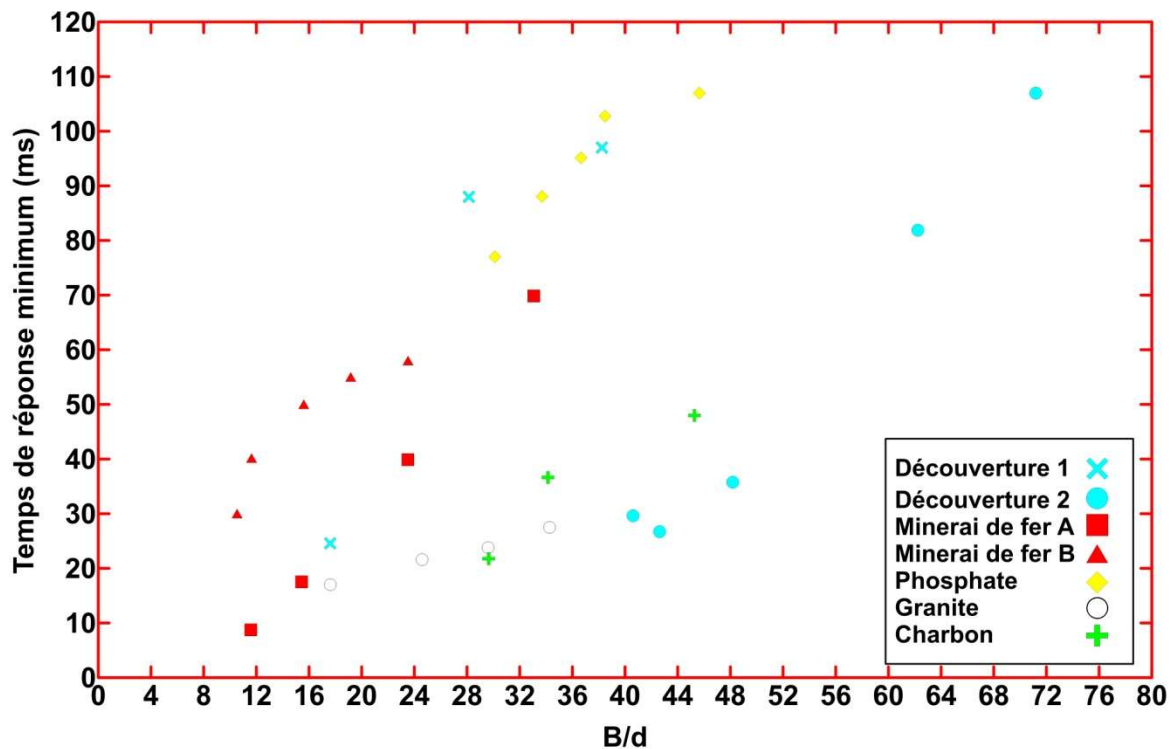
La Figure 1-10 présente de manière qualitative l'effet du choix des retards sur la direction de déplacement des lignes de détonation. Une planification inadéquate du processus d'amorçage peut, en effet, perturber la qualité du tir et compromettre la forme du tas abattu. Par conséquent, il est crucial de bien ajuster l'espacement des retards afin de garantir un déplacement cohérent des lignes de tir, minimiser les vibrations excessives et optimiser le résultat final du tir. Cette approche permet non seulement d'améliorer l'efficacité du processus d'abattage, mais aussi de réduire les impacts environnementaux négatifs associés à l'opération.



**Figure 1.10.** Effet du choix des retards entre lignes sur le dégagement des rangées abattues [13]

Une approche a été proposée pour évaluer le temps minimal de réponse du front, noté  $T_{min}$ , afin de mieux comprendre le comportement de la roche abattue après la détonation. Cette méthode, initialement développée par Chiappetta (1998) [26] et affinée par Onederra et Esen (2003) [27], repose sur la mesure du laps de temps entre la détonation de la charge explosive et l'observation du mouvement de la roche au niveau du front. Selon les travaux de Chiappetta (1998), qui ont utilisé des enregistrements vidéo réalisés avec une caméra ultra-rapide, le temps de réponse  $T_{min}$  est influencé à la fois par les caractéristiques de la banquette et le type de roche présente. Les valeurs mesurées de  $T_{min}$  varient généralement entre 10 et 110 millisecondes, comme illustré dans la Figure 1-11.

Chiappetta recommande que le retard entre les lignes successives d'un plan de tir soit compris entre 1,5 et 3 fois  $T_{min}$ , tandis que le retard entre les trous d'une même ligne doit être d'environ  $T_{min}$ , voire légèrement inférieur. L'objectif de ces choix de retard est d'assurer une mobilité adéquate des lignes arrière, tout en évitant que le déplacement de la ligne avant n'entraîne un échappement excessif des gaz d'explosion sous pression vers l'arrière. Cette approche permet ainsi d'optimiser le processus d'abattage en minimisant les pertes d'énergie tout en garantissant une fragmentation efficace de la roche.



**Figure 1.11.** Temps de réponse  $T_{min}$  pour différentes roches et rapports banquette/diamètre de trou. [27-32]

Les simulations de Monte-Carlo ont permis de démontrer que la vitesse particulière maximale ne présente pas de variations significatives entre les scénarios d'amorçage pyrotechniques et électroniques, à condition que la configuration du plan de tir reste constante [28]. Blair suggère que l'optimisation d'une séquence d'amorçage pyrotechnique, même si elle est initialement peu satisfaisante, pourrait entraîner des améliorations beaucoup plus notables en termes de réduction des effets sismiques, par rapport à un passage à une technologie électronique avec un scénario d'amorçage similaire.

De plus, une étude comparative a été menée pour analyser les performances de déblayage des pelles, en utilisant des données provenant d'essais expérimentaux réalisés sur le terrain. Ces essais incluent des configurations utilisant à la fois des retards pyrotechniques et des retards électroniques. L'analyse des résultats ne met pas en évidence une amélioration substantielle du rendement horaire suite à l'adoption de la technologie électronique [28]. Le rendement est ici utilisé comme un indicateur direct de la qualité de la fragmentation obtenue après tir.

En parallèle, la validité des modèles numériques, notamment ceux proposés par Rossmannith & Kouzniak (2004) [29], qui modélisent les interactions des ondes de choc dans le massif, est également remise en question. En effet, bien qu'ils soient utiles pour comprendre certaines dynamiques, leur application reste limitée dans le cadre des conditions réelles.

Il est crucial de souligner que, pour évaluer correctement l'efficacité des différentes techniques d'amorçage et optimiser la séquence d'amorçage dans des conditions particulières (géométrie du tir, type de roche, nature de l'explosif), une compréhension précise du mécanisme de fragmentation est indispensable. Cette nécessité est d'autant plus évidente que les modèles empiriques prédictifs actuels, bien qu'utilisés fréquemment, ne tiennent pas toujours compte de manière généralisée des retards entre les trous de forage et des séquences d'amorçage dans leurs formulations.

### **3.6. Précision de la foration**

Lorsqu'une inclinaison incontrôlée des forages par rapport au pendage du front des gradins se produit, cela peut entraîner une banquette excessive ou insuffisante. Tandis qu'un excès de banquette peut provoquer des blocs indésirables, un déficit de banquette représente un risque plus critique, car il peut entraîner des projections dangereuses.

Malgré l'expertise technique des foreurs, les couches géologiques et les plans de discontinuité naturels présents dans les gradins peuvent dévier les forages, qui tendent à se diriger perpendiculairement aux plans de discontinuité. Ce phénomène, illustré à la Figure 1-11, est difficile à maîtriser en conditions de production, car les forages suivent naturellement cette

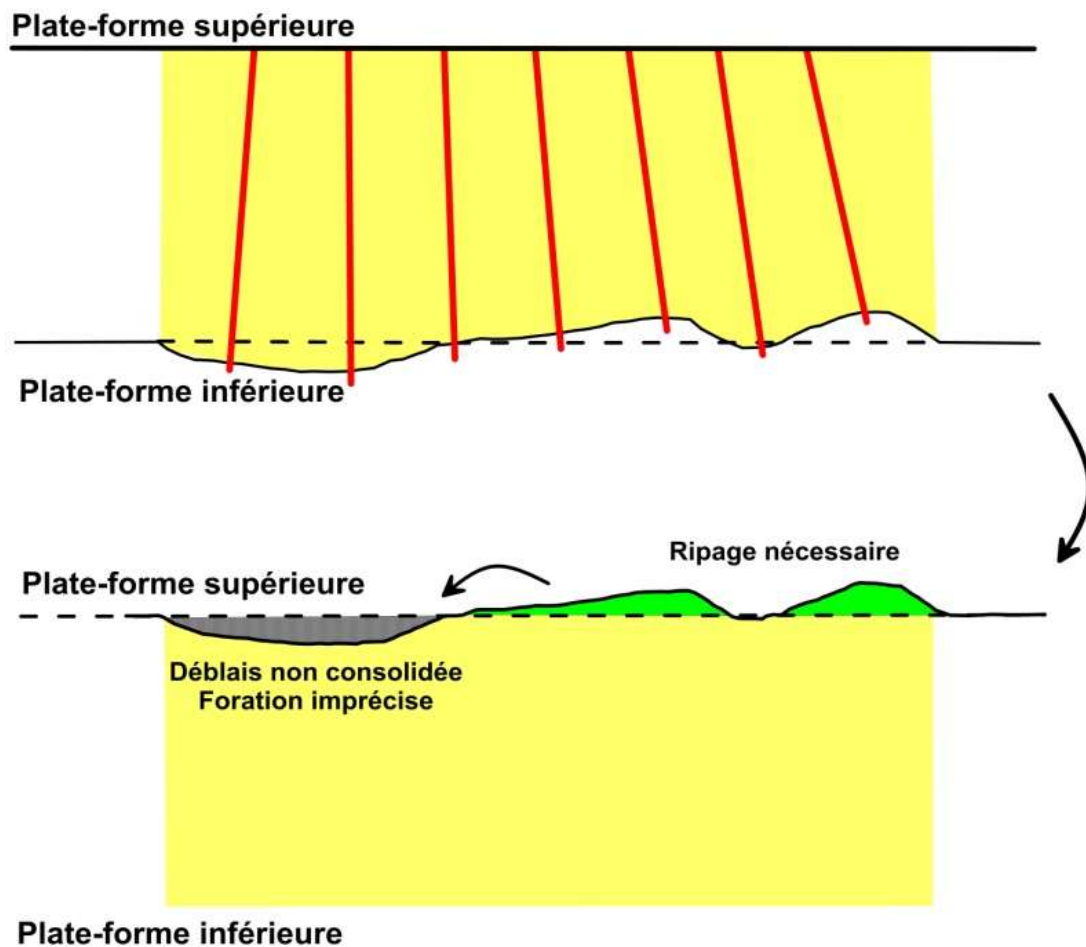
direction. L'imprécision dans l'orientation des forages est un facteur significatif influençant la qualité du tir, et elle est prise en compte par des modèles prédictifs comme celui de Kuz-Ram, proposé par Cunningham (1983) [30].

Une orientation imprécise des forages engendre une dégradation de la qualité de l'arrachement, particulièrement dans la partie inférieure du gradin. Cette imprécision, combinée à un suivi insuffisant de la profondeur des trous, peut rendre presque inévitable l'apparition de pieds lors du déblayage post-tir.

Pour assurer un arrachement de qualité, il est souvent nécessaire de réaliser une surforation partielle. La longueur de cette surforation dépend non seulement de la résistance du massif à abattre, mais aussi de l'orientation des couches géologiques, (Fig. 1-12).



**Figure 1.12.** Déviation naturelle des forages causée par les strates du terrain (à gauche: avec tige guide pour limiter les déviations; à droite: sans tige guide). D'après Meyer, 2002 [31]



**Figure 1.13.** Influence d'une surforation irrégulière sur la qualité de la plate-forme inférieure après tir.

### 3.7. Influence de la Géologie

Dans les travaux scientifiques spécialisés, l'influence prédominante de la géologie et de la structure du massif rocheux sur les performances des tirs est largement admise. Ces paramètres dictent de manière systématique le choix des équipements de forage et de minage, déterminant ainsi les stratégies d'abattage adoptées pour un site donné. L'adaptation du composé explosif repose sur des critères techniques précis, tenant compte des propriétés géomécaniques du massif. Chaque type d'explosif industriel présente un mode d'action spécifique, et leur sélection est généralement conditionnée par la nature lithologique et les caractéristiques stratigraphiques locales, limitant ainsi l'éventail des choix disponibles pour l'opérateur.

L'emploi de microretards dans l'exécution des tirs constitue une pratique répandue, visant principalement à atténuer les vibrations induites et à favoriser un déblaiement progressif des fronts. Toutefois, la mise en œuvre d'une régulation rigoureuse de ces microretards à l'aide de détonateurs électroniques demeure entravée par des incertitudes persistantes sur les

phénomènes dynamiques de fragmentation. Malgré les avancées technologiques, la communauté scientifique n'a pas encore tranché sur l'efficacité réelle d'un ajustement millimétré des retards dans l'optimisation du processus de fragmentation. De surcroît, l'évaluation comparative des différentes séquences d'amorçage ne permet pas d'établir une supériorité universelle d'un schéma sur un autre, ce qui confère à l'expérience pratique du responsable des tirs un rôle central dans la prise de décision opérationnelle.

En complément des paramètres initiaux liés aux propriétés rocheuses et aux configurations de tir préétablies, d'autres éléments interviennent directement dans l'efficacité de l'abattage. La précision du forage, les irrégularités géométriques des fronts de tir ainsi que les particularités géo-structurales des gradins sont autant de facteurs susceptibles d'influencer la qualité du résultat obtenu. L'intégration systématique de l'instrumentation dans le suivi des opérations de tir tend à se généraliser, et cette exigence technique s'impose même comme une obligation réglementaire dans plusieurs législations nationales.

L'établissement d'un dimensionnement théorique des tirs et la définition des explosifs les mieux adaptés à un massif donné reposent sur la compréhension des mécanismes de fragmentation. Néanmoins, cette compréhension demeure incomplète, limitant ainsi la capacité à prédire avec une précision absolue les effets des tirs dans des contextes géologiques variés.

#### **4. Mécanismes de fragmentation et d'arrachement de la roche par l'explosif**

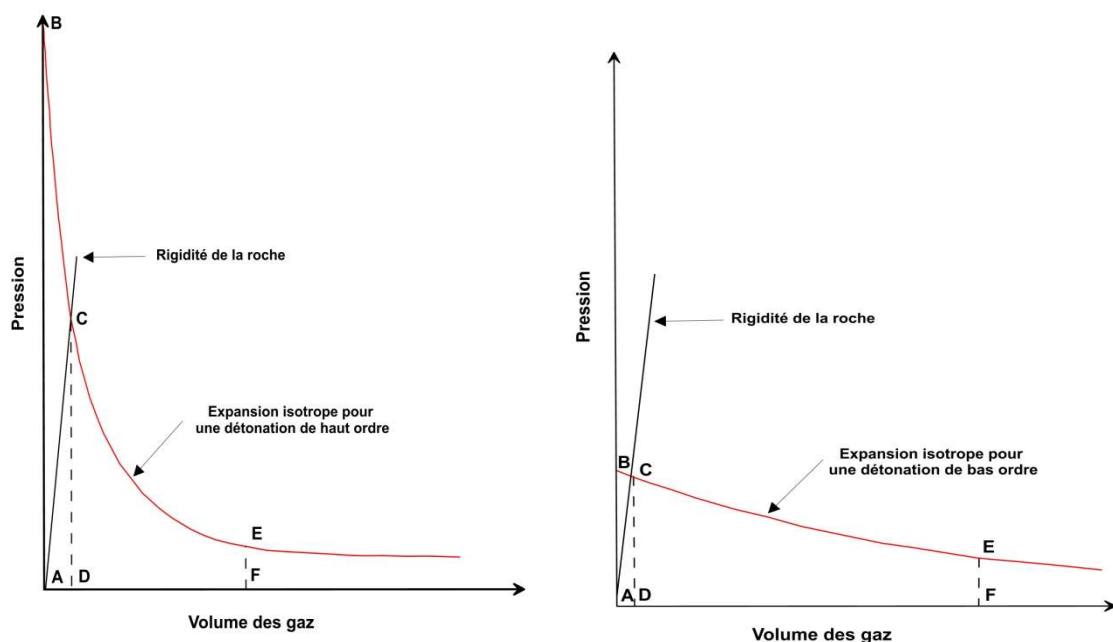
##### **4.1. Répartition de l'énergie explosive - choc et gaz**

L'activation d'une charge explosive dans un massif rocheux déclenche une réaction de décomposition rapide et intense, générant un volume important de gaz en un temps extrêmement court. Ce phénomène conduit à une redistribution instantanée de l'énergie, se manifestant par une onde de choc suivie par l'expansion des gaz de détonation. La compréhension de ces mécanismes repose sur des principes largement documentés dans la littérature scientifique, selon lesquels les gaz produits exercent une pression sur les parois du trou de mine jusqu'à atteindre un équilibre quasi-statique avec la résistance mécanique de la roche environnante.

Lors de la phase initiale, l'onde de choc se propage à travers le massif en dépassant la capacité de dissipation acoustique du matériau, générant une série de fractures primaires. À mesure que la pression se stabilise, les gaz de l'explosion prennent le relais en exerçant des forces supplémentaires sur les parois du trou et sur le réseau de discontinuités préexistantes ou nouvellement créées. Ce double mécanisme influe directement sur le processus d'arrachement et la distribution de l'énergie explosive, conditionnant ainsi l'efficacité de l'abattage.

Un paramètre clé influençant ces interactions est la vitesse de détonation de l'explosif, qui détermine la répartition entre les effets dynamiques de l'onde de choc et les effets d'expansion des gaz. La Figure 1-14 présente les courbes de détente isentropique de deux explosifs distincts, illustrant les différences de comportement selon leur vitesse de décomposition. La section finale de ces courbes indique la part de l'énergie effectivement transmise à la roche sous forme d'énergie cinétique ainsi que celle dissipée dans l'environnement sous forme de gaz résiduels. Le débat scientifique sur l'impact relatif de ces deux phases dans la fragmentation et l'arrachement de la roche demeure ouvert. Certains auteurs considèrent l'onde de choc comme le principal moteur de la fragmentation, reléguant le rôle des gaz à une action secondaire d'élargissement des fissures et de mise en mouvement des fragments. D'autres approches suggèrent que la poussée des gaz joue un rôle déterminant dans la propagation et l'extension des fractures préexistantes, contribuant ainsi de manière significative au processus global d'abattage.

Bien que ces mécanismes aient été largement étudiés, aucun consensus définitif n'a encore été établi quant à la contribution respective de chaque phase dans le processus de désagrégation du massif rocheux.



**Figure 1.14.** Détente isentropique de deux explosifs aux régimes de détonation rapide (à gauche) et lent (à droite) [32]

#### 4.2. Effets de l'explosif sur la roche

L'étude expérimentale des effets des tirs de mine, qu'ils soient réalisés à échelle réduite en laboratoire ou en conditions réelles sur le terrain, met en évidence un ensemble de

modifications structurelles au sein du massif rocheux. Ces observations révèlent la formation d'un réseau complexe de dommages qui s'étend autour des charges explosives, illustré dans la Figure 1-15.

La zone la plus directement affectée est celle située à l'interface immédiate entre l'explosif et la roche. Dans cet espace restreint, dont l'épaisseur varie généralement entre deux et plusieurs diamètres de trou [33], [34], le matériau subit une fragmentation intense sous l'effet combiné des forces de compression et de cisaillement. Ce mécanisme de broyage génère une proportion significative de fines, bien que des études récentes menées à l'échelle du laboratoire aient démontré que d'autres processus de fragmentation doivent être pris en compte pour expliquer l'ensemble des fines produites lors d'un tir [35].

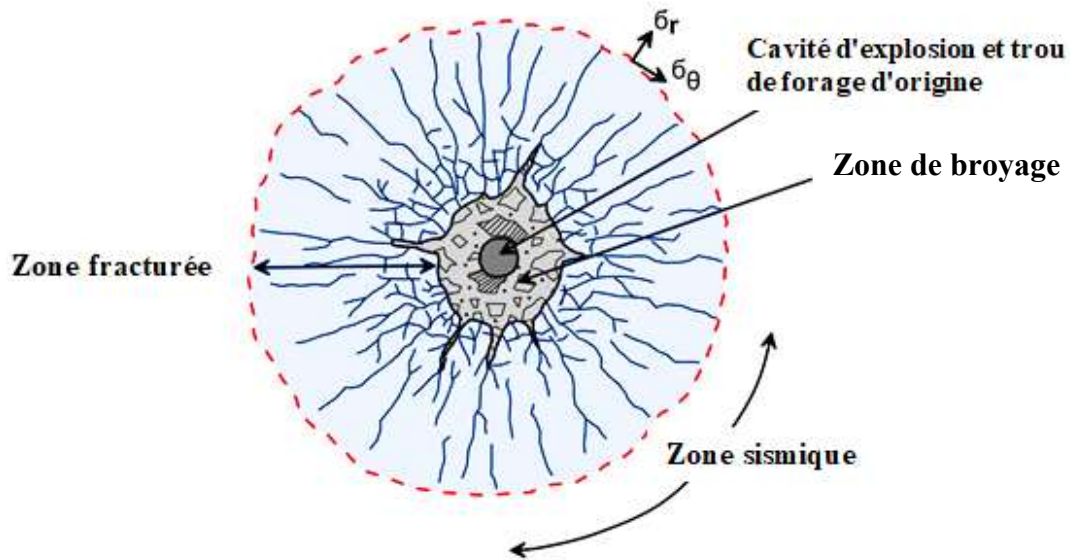
Au-delà de cette zone initiale de broyage, le massif rocheux est affecté par un réseau de fissuration radiale induit par des forces de traction exercées tangentiellement autour du trou de mine. Ces fissures, qui peuvent être amplifiées par la présence de discontinuités préexistantes dans la roche, se développent sous l'effet des ondes de choc mais également sous l'action de la pression interne des gaz de détonation. L'interaction entre ces deux phénomènes contribue à la propagation des fractures dans le massif, influençant la qualité de l'abattage.

Lorsque l'intensité des contraintes dynamiques devient insuffisante pour poursuivre la rupture, l'énergie mécanique restante se dissipe sous forme d'ondes sismiques dans la roche environnante ou est convertie en énergie cinétique permettant la mise en mouvement des fragments. À cette échelle, il est possible d'observer des effets dits "arrières" affectant les zones situées en retrait de la charge explosive. Ces effets sont souvent attribués à une redistribution inefficace de l'énergie du tir, qui se répercute dans des directions non optimales. Cependant, l'idée selon laquelle l'ampleur des effets arrière serait systématiquement liée à la hauteur de la banquette ne fait pas consensus. Certaines études expérimentales menées par Rustan & Nie (1987) [35] et Bilgin et al. (1993) [34] n'ont pas mis en évidence de relation directe entre ces deux paramètres dans le cas du calcaire, tandis que Bilgin (1999) [36] a observé un lien dans l'hématite.

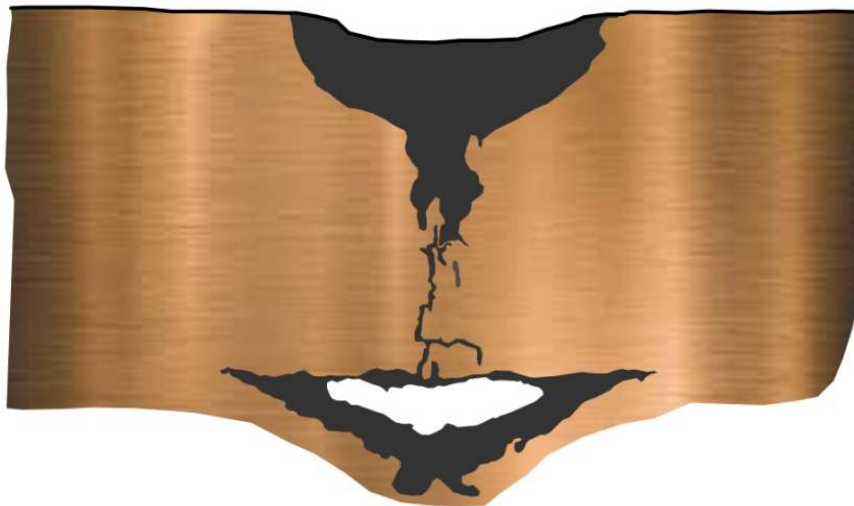
En plus des altérations visibles à l'échelle macroscopique, l'action des charges explosives engendre des processus de micro-fracturation qui modifient les propriétés mécaniques du matériau fragmenté [37]. Cette micro-fracturation favorise notamment une amélioration des performances des opérations de concassage et de broyage en aval du processus d'abattage.

La manière dont l'explosif est amorcé joue également un rôle essentiel dans l'efficacité du tir. En général, l'initiation des charges en présence d'une surface libre est privilégiée, car elle facilite la propagation de la fragmentation. Lorsque les ondes de choc compressives issues de

la détonation atteignent cette surface, elles sont réfléchies sous forme d'ondes de traction. Ce phénomène bien connu provoque un effet d'écaillage localisé, qui se manifeste par le détachement de fragments rocheux à proximité immédiate de la surface libre. La Figure 1-15 illustre cet effet à travers une photographie d'un écaillage provoqué par une charge à forte brisance sur une barre en acier.



**Figure 1.15.** Zones d'endommagement et de fissuration radiale autour d'un trou de mine [12]



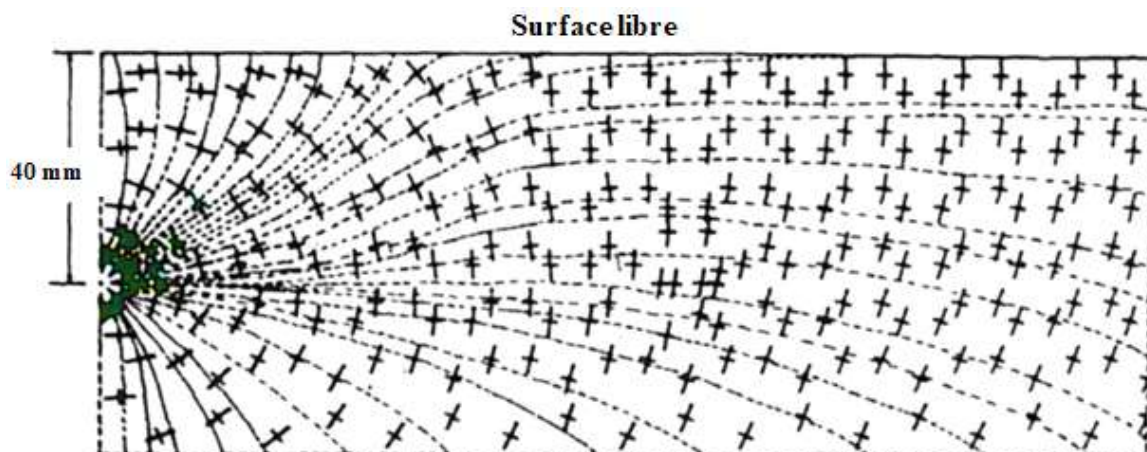
**Figure 1.16.** Ecaillage d'une barre métallique soumise à l'impact en surface d'un explosif brisant. [38-39]

L'interaction complexe entre les ondes de traction et le massif rocheux joue un rôle prépondérant dans le processus de fragmentation induit par l'explosion. Il est généralement admis que ces ondes contribuent significativement à l'extension des fractures au sein du matériau rocheux, en particulier à proximité de la surface libre. Toutefois, aucune quantification

précise de leur impact relatif par rapport aux autres mécanismes de fragmentation n'a été établie à ce jour. Lorsqu'elles traversent le massif, ces ondes sont supposées initier de nouvelles fractures en surface tout en facilitant l'extension des fissures radiales préexistantes [40].

En parallèle, la dynamique d'expansion des fractures radiales est également influencée par l'action des gaz de détonation. Ceux-ci exercent une pression interne qui s'apparente à une contrainte quasi-statique appliquée sur les parois du massif rocheux environnant. Cette pression contribue non seulement à l'ouverture et à la propagation des fissures existantes, mais elle influence aussi la trajectoire des fractures en les orientant selon les lignes d'iso-valeurs du champ de contraintes. Ce phénomène est schématisé dans la Figure 1-16, où l'on observe la manière dont les fissures se développent sous l'effet combiné des ondes de traction et de la pression interne des gaz [12].

L'interaction entre ces différents mécanismes conditionne la morphologie finale du front d'abattage. Une compréhension approfondie des processus mis en jeu permet d'optimiser les paramètres de tir afin d'améliorer l'efficacité de la fragmentation tout en limitant les effets indésirables tels que la sur-fragmentation ou la formation d'effets arrière.



**Figure 1.17.** Lignes de champ mécanique dues à la pression quasi statique au sein d'un trou de mine lors de la phase de détente des gaz [12]

## 5. Concept énergie/surface

Le processus de fragmentation et d'arrachement induit par les tirs repose sur une dynamique de rupture particulièrement complexe, conduisant à la formation de nouvelles surfaces de discontinuité au sein du massif rocheux. Cette rupture est influencée par de multiples facteurs, notamment les propriétés mécaniques de la roche, les conditions de

chargement et la conception du tir. L'analyse théorique de la propagation des fissures individuelles, de leurs interactions mutuelles ainsi que de leur coalescence avec les discontinuités préexistantes représente un défi considérable. À ce jour, les connaissances théoriques et les outils de modélisation numérique disponibles ne permettent pas encore de décrire avec une précision absolue l'ensemble des mécanismes mis en jeu.

L'évolution des surfaces de rupture et la dissipation d'énergie mécanique au cours du processus de fragmentation s'inscrivent dans une relation qui peut être observée à plusieurs échelles. À une échelle locale, cette relation est gouvernée par un bilan énergétique qui régit la progression des fissures en fonction de la capacité du matériau environnant à restituer l'énergie mécanique. Ce principe fondamental repose sur les travaux de Griffith (1920), qui ont établi une formulation de la croissance des fissures à partir de l'équilibre énergétique du système. Selon cette approche, le taux de restitution d'énergie, noté  $G$ , est défini comme étant la dérivée de l'énergie mécanique totale du système par rapport à l'avancement de la fissure, conformément à l'équation suivante :

$$G = \frac{\partial}{\partial a} (E_{el} + E_{ext}), \quad (\text{Eq.1.5})$$

Dans cette équation,  $E_{el}$  représente l'énergie élastique stockée dans le matériau, tandis que  $E_{ext}$  : correspond à l'énergie fournie par des sources externes, notamment les charges explosives et les effets de contrainte environnants. Ce principe constitue le fondement des modèles modernes de propagation des fissures, bien que son application aux mécanismes de fragmentation induits par des charges explosives nécessite des adaptations pour tenir compte de la dynamique rapide et des hétérogénéités intrinsèques du milieu rocheux.

En pratique, la propagation des fissures et l'évolution des surfaces de rupture sont également influencées par les effets inertiels et par la redistribution des contraintes après la détonation. Ces effets, couplés à la nature anisotrope et fracturée du massif rocheux, rendent difficile une prédiction précise du schéma de fragmentation. Toutefois, l'intégration de modèles énergétiques dans les simulations numériques permet d'affiner la compréhension de ces phénomènes et d'optimiser les paramètres de tir pour améliorer l'efficacité du processus de fragmentation tout en réduisant les effets indésirables.

La propagation d'une fissure dans un matériau ne peut se produire que si l'augmentation de sa longueur est compensée par une énergie mécanique suffisante au sein du système. Ce phénomène est conditionné par un critère énergétique précis : la progression de la fissure devient possible lorsque le taux de restitution d'énergie  $G$  excède une valeur seuil, notée  $G_c$ , qui constitue une propriété intrinsèque du matériau. Ce paramètre critique, souvent assimilé à

l'énergie de rupture ou ténacité à la fracture, dépend des caractéristiques microstructurales du matériau ainsi que des conditions de chargement auxquelles il est soumis.

L'évolution du taux de restitution d'énergie au cours de la propagation de la fissure est directement liée aux facteurs d'intensité de contrainte, qui décrivent la concentration des contraintes au voisinage du front de fissure. Ces facteurs, définis respectivement pour les modes de rupture en ouverture (mode I), en cisaillement dans le plan (mode II) et en cisaillement hors plan (mode III), permettent de caractériser la réponse mécanique du matériau sous différents types de sollicitations. Leur expression dépend à la fois des conditions de chargement appliquées et de la géométrie de la fissure et de la structure environnante.

Les travaux de Irwin (1957) ont permis de formaliser la relation entre le taux de restitution d'énergie  $G$  et les facteurs d'intensité de contrainte  $K$ , en tenant compte des propriétés élastiques du matériau, notamment le module d'élasticité  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Cette relation fondamentale exprime le taux de restitution d'énergie sous la forme :

$$G = \frac{K^2}{E^*}$$

où  $E^*$  est un paramètre élastique équivalent qui dépend du module d'élasticité et du coefficient de Poisson du matériau, avec des ajustements spécifiques en fonction du mode de rupture dominant.

Le calcul des facteurs d'intensité de contrainte demeure une tâche complexe, nécessitant la prise en compte de multiples paramètres géométriques et mécaniques. Les méthodes analytiques traditionnelles ne permettent d'obtenir des solutions exactes que pour des configurations idéalisées, tandis que les approches numériques, telles que la méthode des éléments finis (FEM) ou la méthode des frontières, offrent des outils avancés pour évaluer ces facteurs dans des structures présentant des géométries et des chargements plus complexes. L'intégration de ces modèles dans l'analyse des tirs permet ainsi d'améliorer la compréhension des mécanismes de rupture et d'optimiser les paramètres de fragmentation dans un objectif d'efficacité et de maîtrise des effets indésirables.

La loi classique de comminution de *Bond (1952)* établit une relation entre la taille moyenne des fragments avant concassage ( $X_1$ ) et après concassage ( $X_2$ ) et l'énergie consommée ( $E$ ) (Le concept énergie/surface créée est présent), comme illustré par l'Équation (Eq.1.6) :

$$E = K \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right) \quad (\text{Eq.1.6})$$

Dans cette équation,  $K$  représente l'indice de broyabilité,

La théorie de comminution [18] et [17], découle de recherches plus récentes et établit directement le lien entre l'énergie mécanique fournie et la création de nouvelles surfaces dans un échantillon rocheux soumis à une séquence de comminution optimale, comme indiqué dans l'Équation (Eq.1.7) :

$$E_{frag} = k_r \cdot S_f \quad (\text{Eq.1.7})$$

La Figure 1-17 présente les lignes de corrélation entre l'énergie fournie et la surface créée pour six types de roches différents [41].

L'équation de *Steiner* est associée au concept de NBC (Natural Breakage Characteristics), tel que présenté notamment par *Moser & Grasedieck* (2002). Selon la théorie NBC, un type de roche donné posséderait un paramètre intrinsèque de fragmentabilité. Qualitativement, ce concept attribue aux réseaux de discontinuités naturellement présentes à différentes échelles un caractère quasi-fractal, soulignant ainsi la similitude des structures géologiques observables dans la nature avec celles retrouvées à plus petite échelle dans les roches.

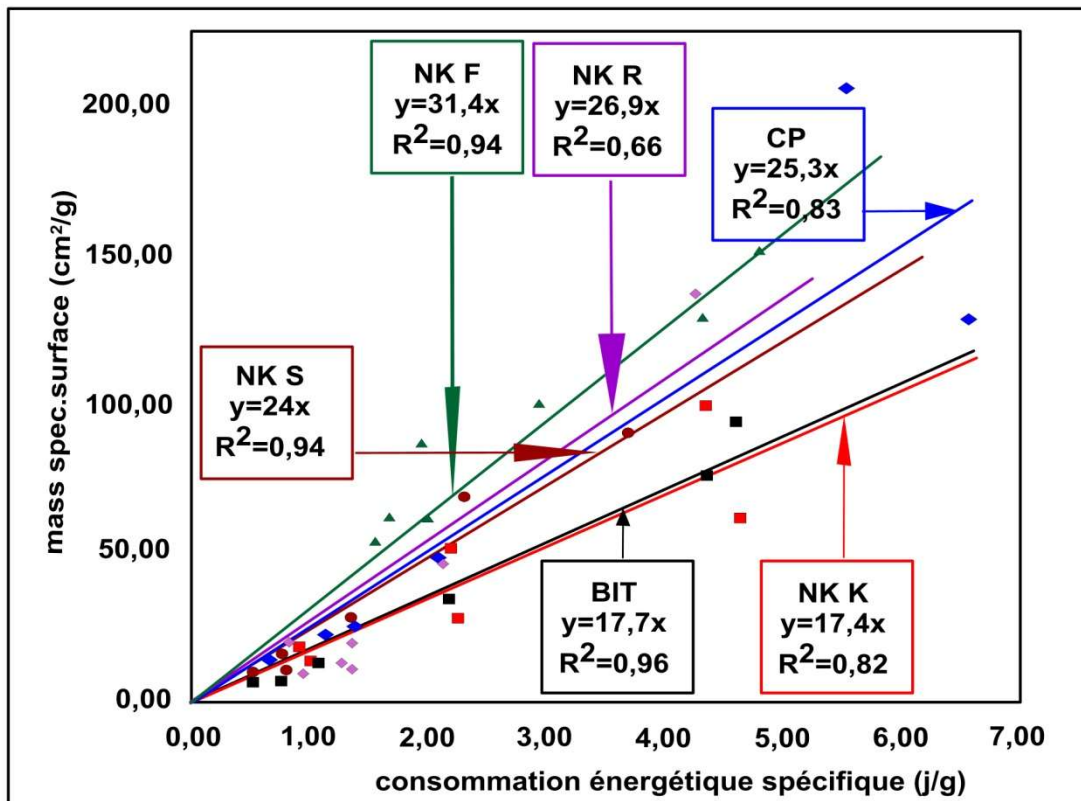
Le phénomène de fragmentation induit par l'utilisation d'explosifs repose sur une interaction énergétique entre une source, représentée par l'explosif, et deux récepteurs finaux, à savoir la roche fragmentée et le milieu environnant. Cette interaction énergétique aboutit à la création de nouvelles surfaces de rupture, dont l'étendue est directement corrélée au travail mécanique impliqué dans leur formation. Le coefficient de proportionnalité associé à ce processus dépend étroitement des propriétés intrinsèques du matériau rocheux concerné.

En ce qui concerne la source énergétique, les connaissances actuelles demeurent partielles et fragmentaires. Lorsqu'un explosif est mis à feu, son action se traduit par deux phénomènes distincts : d'une part, la génération d'un train d'ondes de choc se propageant rapidement à travers le massif rocheux, et d'autre part, l'action plus lente des gaz à haute pression issus de la réaction de détonation. L'évaluation précise de la quantité d'énergie chimique réellement libérée par un explosif reste un défi, et des travaux spécifiques sont menés afin de modéliser ces phénomènes en utilisant des codes numériques adaptés, capables de simuler les processus de détonation et leurs effets sur le massif.

Les effets de la fragmentation induite par explosif sont bien documentés dans la littérature scientifique. Lorsqu'une charge détonante est activée, elle engendre tout d'abord une zone de broyage située à proximité immédiate du point de mise à feu. Au-delà de cette zone, un réseau de fissures radiales se développe sous l'effet combiné des ondes de choc générées et de la détente des gaz sous pression. À mesure que ces ondes compressives rencontrent une surface libre, elles subissent un phénomène de réflexion, se transformant alors en ondes de traction

susceptibles de provoquer une fracturation supplémentaire du massif rocheux [40]. Les discontinuités présentes, qu'elles soient d'origine microscopique ou macroscopique, jouent un rôle clé en servant de points privilégiés pour l'amorçage et la propagation des fissures.

L'interaction des trains d'ondes de choc et des réseaux de fissures générés par plusieurs charges explosives adjacentes contribue à complexifier davantage le processus global de fragmentation. Bien que les mécanismes élémentaires impliqués dans la fragmentation dynamique soient aujourd'hui relativement bien compris, la répartition de leur contribution respective demeure incertaine. À ce jour, aucune théorie universelle ne permet d'expliquer de manière exhaustive la fragmentation d'un massif rocheux complexe sous l'effet d'explosifs. Cette incertitude se traduit notamment par des lacunes dans l'évaluation du bilan énergétique des tirs, particulièrement en ce qui concerne l'identification précise des pertes énergétiques réelles [12]. Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, une meilleure compréhension du processus de fragmentation repose sur l'exploitation d'outils numériques de modélisation avancés. Ces approches permettent d'analyser séparément l'impact des ondes de choc et l'action des gaz sous pression à travers un réseau de fissures existant, offrant ainsi des perspectives pour affiner les stratégies de tir et améliorer l'efficacité des opérations de tir. La Figure 1-18 illustre la propagation des fractures sous l'influence des contraintes exercées par les gaz de détonation et des ondes de choc.



**Figure 1.18.** Relation entre énergie par unité de volume et création de surface par unité de volume pour six ( 6 ) types de roches testées [30]

## 6. Complexités de la dynamique rapide et défis qui en découlent

L'étude des interactions dynamiques impliquées dans le comportement des roches sous des sollicitations rapides repose sur diverses techniques de modélisation visant à reproduire les mécanismes de fragmentation et les dommages induits. Toutefois, malgré les avancées méthodologiques, des incertitudes persistent quant à la capacité des modèles numériques à représenter avec précision la physique des matériaux soumis à des régimes de chargement rapide. Ces incertitudes concernent aussi bien les aspects qualitatifs, liés à la description des mécanismes de fissuration et d'endommagement, que les aspects quantitatifs, relatifs à la mesure précise des paramètres de réponse du matériau [21].

L'un des principaux défis réside dans l'incapacité actuelle de démontrer de manière concluante que les résultats des simulations numériques correspondent fidèlement aux phénomènes réels observés en milieu expérimental. En effet, la validation des modèles repose généralement sur des comparaisons indirectes entre les prévisions théoriques et des observations expérimentales réalisées à des échelles limitées. Or, les différences de conditions aux limites, les hétérogénéités structurelles du matériau et les effets d'échelle introduisent des variations significatives entre les modèles et la réalité.

Un autre facteur limitant dans la modélisation des phénomènes de rupture sous sollicitations dynamiques réside dans l'utilisation de critères de rupture définis à partir des propriétés mécaniques statiques du matériau. Bien que ces critères soient largement employés pour caractériser la résistance et la ténacité des roches en conditions statiques, leur transposition aux conditions dynamiques reste sujette à caution. En effet, les vitesses de déformation élevées et les effets inertiels influencent significativement la réponse du matériau, entraînant des comportements qui ne peuvent être correctement prédits par des modèles purement statiques. Des études ont montré que la résistance dynamique des matériaux rocheux peut être nettement supérieure à celle mesurée en statique en raison des effets de taux de chargement et de confinement [38].

L'approche adoptée pour améliorer la représentativité des modèles repose notamment sur l'intégration de lois de comportement prenant en compte l'influence des vitesses de déformation et des échelles spatiales et temporelles associées aux mécanismes de fragmentation. L'utilisation de modèles basés sur des formulations élasto-plastiques dynamiques, couplés à des critères d'endommagement évolutifs, permet d'affiner la prédiction des mécanismes de rupture sous charge explosive ou impact. Toutefois, la calibration de ces modèles nécessite des bases de données expérimentales détaillées et adaptées aux conditions dynamiques spécifiques des phénomènes étudiés.

Les interactions entre les ondes de choc, la propagation des fissures et les effets des hétérogénéités matérielles imposent le recours à des approches multi-échelles combinant des simulations numériques et des observations expérimentales. Ces approches permettent d'améliorer la compréhension des processus dynamiques et d'optimiser les critères de conception pour des applications en génie civil et minier. La Figure 3-12 illustre les schémas typiques de propagation des ondes de choc et leurs effets sur la microstructure d'un massif rocheux soumis à des sollicitations explosives.

### **6.1. Modélisation de l'Interaction Pression-Roche sous Sollicitations Explosives**

L'étude des effets d'un choc explosif sur un matériau à travers une approche de modélisation mécanique, qu'elle soit continue ou discontinue, repose sur une caractérisation rigoureuse de la charge mécanique appliquée au système. La première étape consiste à définir la nature de l'interaction entre l'explosif et le milieu environnant, ce qui implique de modéliser l'évolution temporelle de la pression exercée sur la paroi des trous de mine. Une représentation simplifiée mais couramment adoptée consiste à considérer cette pression comme une charge dynamique appliquée à la surface interne des cavités forées, sa distribution et son évolution

étant déterminées par les propriétés de l'explosif utilisé ainsi que par les conditions de confinement du massif rocheux.

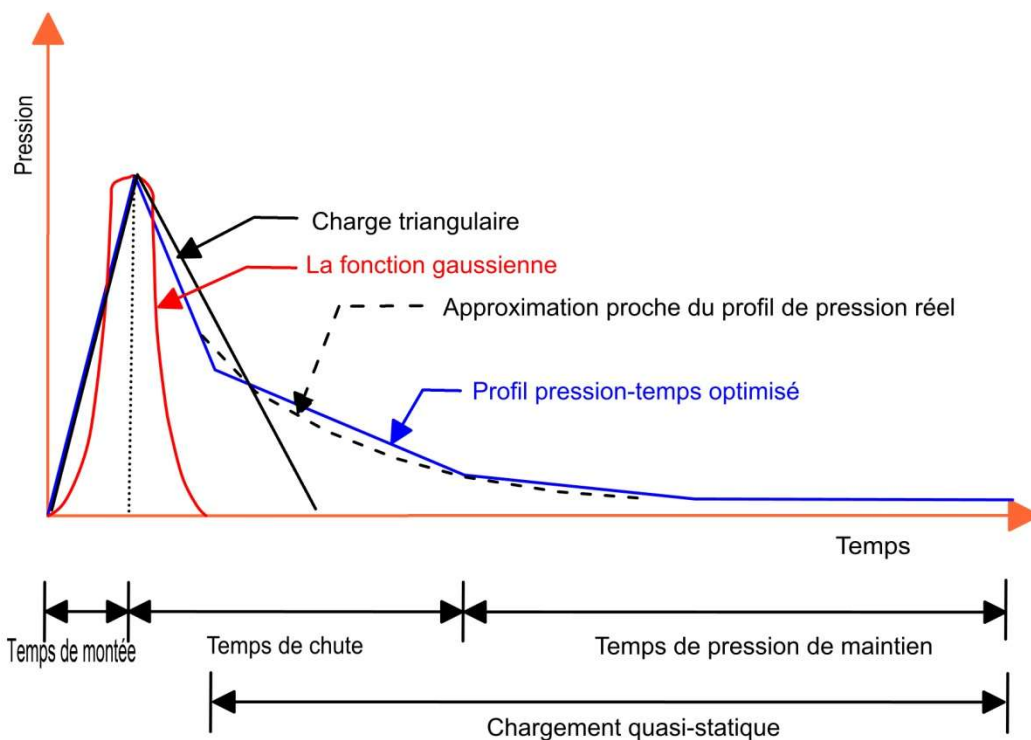
Différentes formulations empiriques ont été développées pour décrire cette évolution temporelle de la pression. Parmi les modèles les plus courants figurent ceux basés sur une pressurisation instantanée, assimilable à une impulsion de Dirac, qui caractérise une montée brusque de la pression suivie d'une décroissance rapide. Une autre approche consiste à adopter une loi de décroissance exponentielle, où la pression initiale diminue progressivement en fonction d'un paramètre de temps caractéristique propre au système étudié. Une alternative plus sophistiquée combine une phase de montée rapide suivie d'une décroissance exponentielle modulée, permettant de représenter de manière plus réaliste les deux principales phases du processus explosif : la propagation initiale des ondes de choc et la contribution des gaz en expansion exerçant une pression quasi-statique sur les parois du trou de mine [26].

Les lois d'évolution de la pression les plus fréquemment rencontrées dans la littérature sont illustrées dans la Figure 1-18. Ces représentations permettent de visualiser les différences entre les modèles en fonction des hypothèses formulées sur la cinétique de libération de l'énergie chimique et la dynamique de confinement du matériau environnant. Une variante proposée par Saharan (2008) [42] introduit une modélisation linéarisée de la montée en pression suivie d'une décroissance contrôlée, offrant une alternative aux schémas purement exponentiels et permettant d'adapter plus précisément la simulation aux conditions expérimentales observées (Fig. 1-19).

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité à alimenter les simulations numériques destinées à analyser la fragmentation des roches sous l'effet d'explosions contrôlées. La prise en compte de la nature de la charge mécanique appliquée est ainsi une étape clé pour affiner les prédictions des modèles de propagation des fissures et optimiser les paramètres de tir dans les applications industrielles, notamment en génie minier et en travaux publics.

**Tableau 1.4.** Lois d'évolution de la pression des gaz d'explosion à la paroi d'un trou de mine [46]

Méthode	Equation	Reference
John-Wikinson Lee (JWL)	$p = A \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_{1\rho_0}}\right) e^{\left(\frac{-R_{1\rho_0}}{\rho}\right)} + B \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_{2\rho_0}}\right) e^{\left(\frac{-R_{2\rho_0}}{\rho}\right)} + \frac{\omega\rho^2}{\rho_0} E_{m0}$	Liu (1997)
Pressure decay functions	$p = p_0 \zeta [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}]$	Cho et al. (2003)
	$p = p_0 [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}]$	Lima et al. (2002)
	$p = p_0 e^{-\alpha t}$	Kutter (1967)
Direct input of pressure-time profile	Gaussian function	Donze et al. (1997)
	Triangular load shape	Valliapan et al. (1983)
	Optimized pressure profile	



**Figure 1.19.** Description qualitative d'une loi d'évolution pression-temps à la paroi d'un trou de mine [42]

Le choix de la loi de pression revêt une importance majeure, car il dépend non seulement de l'intensité de la sollicitation mécanique, mais également de sa vitesse. Lorsque la dépendance à la vitesse de déformation entre en jeu, l'adoption d'une montée en pression décrite par un échelon Dirac devient inappropriée.

Comprendre la complexité du processus thermo-hydro-mécanique couplé, qui se manifeste dans l'interaction entre la roche et l'explosif, représente un axe de recherche à part entière. La manière dont l'énergie explosive est libérée, qu'il s'agisse de l'énergie de choc ou de l'énergie des gaz, ainsi que la distinction entre détonation idéale et non idéale, requièrent une attention minutieuse.

## **6.2. Seuil de rupture et effets de dépendance à la vitesse de sollicitation**

L'étude du comportement des roches soumises à des sollicitations dynamiques de haute intensité et de très courte durée présente encore de nombreuses incertitudes, principalement en raison des limitations expérimentales rencontrées lors de la reproduction de ces phénomènes en laboratoire. Les essais mécaniques classiques réalisés en compression uniaxiale se déroulent généralement à des vitesses de déformation avoisinant  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , une plage bien inférieure à celle des sollicitations induites par les explosions. En effet, les presses hydrauliques utilisées dans les essais conventionnels permettent d'atteindre des vitesses maximales de l'ordre de  $10^2 \text{ s}^{-1}$ , alors que les ondes de choc générées par la détonation d'un explosif engendrent des vitesses de déformation pouvant atteindre, voire dépasser,  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . Afin d'explorer la réponse des matériaux à ces niveaux de sollicitation extrêmes, des méthodes expérimentales spécifiques ont été développées, parmi lesquelles la technique des barres d'Hopkinson (1914), qui permet d'atteindre des vitesses de déformation proches de  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . Toutefois, malgré les avancées dans ce domaine, cette approche demeure un sujet d'investigation active, notamment pour améliorer la caractérisation du comportement des matériaux à des vitesses encore plus élevées.

L'exploitation de ces techniques a permis d'identifier une tendance générale selon laquelle les matériaux rocheux présentent une résistance accrue sous des régimes de chargement dynamique rapide comparativement aux conditions statiques. Cette observation est appuyée par des compilations de résultats expérimentaux obtenus à partir d'essais de traction sur le béton [43], illustrés dans la Figure 1-20, ainsi que par l'analyse des facteurs d'accroissement dynamique en traction et en compression pour divers types de roches [44] (Fig. 1-20).

Les données expérimentales indiquent que ces facteurs d'accroissement dynamique varient selon la nature de la roche et le mode de sollicitation (traction ou compression). De plus, le rapport entre ces deux facteurs met en évidence des différences notables dans la manière dont

chaque type de roche réagit aux charges dynamiques. Cette disparité pourrait expliquer en partie les réponses contrastées des roches en fonction des caractéristiques de l'explosif utilisé et des conditions de confinement lors de l'initiation du choc. Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettrait d'améliorer la précision des modèles numériques utilisés pour simuler la fragmentation des roches et optimiser les procédés d'abattage en milieu minier et de génie civil.

### **6.3. Approches Empiriques pour la Prédiction de la Fragmentation**

L'estimation des effets de la fragmentation lors de tirs à grande échelle repose sur des modèles mécaniques visant à reproduire les phénomènes complexes associés à l'endommagement des matériaux soumis à des sollicitations dynamiques rapides. Cependant, cette approche se heurte à d'importantes difficultés, principalement dues à la diversité des mécanismes physiques impliqués et à la sensibilité des résultats aux conditions locales d'application. En effet, la propagation des ondes de choc, les interactions entre l'explosif et la roche, ainsi que les processus d'initiation et de propagation des fissures sont influencés par de multiples paramètres, dont la variabilité spatiale et temporelle rend difficile leur prise en compte de manière exhaustive dans les simulations numériques.

L'un des principaux défis réside dans l'établissement d'un lien direct entre les concepts fondamentaux décrivant la réponse mécanique du matériau – tels que le facteur d'accroissement dynamique, le couplage entre l'explosif et la roche, ou encore les variables internes régissant l'écrasement et l'endommagement – et les paramètres concrets manipulés dans les opérations minières. Parmi ces derniers figurent des caractéristiques telles que le diamètre des trous de mine, la charge massique d'explosif, la configuration géométrique de la banquette, l'espacement entre les forages, ainsi que la granulométrie des fragments obtenus après abattage. L'hétérogénéité intrinsèque des formations rocheuses, couplée aux variations locales des conditions de confinement et aux incertitudes liées aux propriétés des explosifs, accentue la complexité de cette corrélation.

Face à ces limitations, la recherche s'est progressivement orientée vers le développement d'outils empiriques destinés à relier les paramètres de conception des tirs aux résultats observables en termes de fragmentation. Ces approches reposent sur l'analyse statistique de données expérimentales recueillies lors d'essais en conditions réelles ou semi-contrôlées, permettant ainsi de dégager des tendances générales et d'établir des modèles prédictifs ajustés aux contextes spécifiques d'exploitation.

L'intégration de ces méthodes empiriques aux simulations mécaniques contribue à améliorer la précision des estimations, en introduisant des calibrations basées sur des observations de terrain et en permettant une meilleure optimisation des paramètres d'abattage dans une perspective d'efficacité et de réduction des coûts opérationnels.

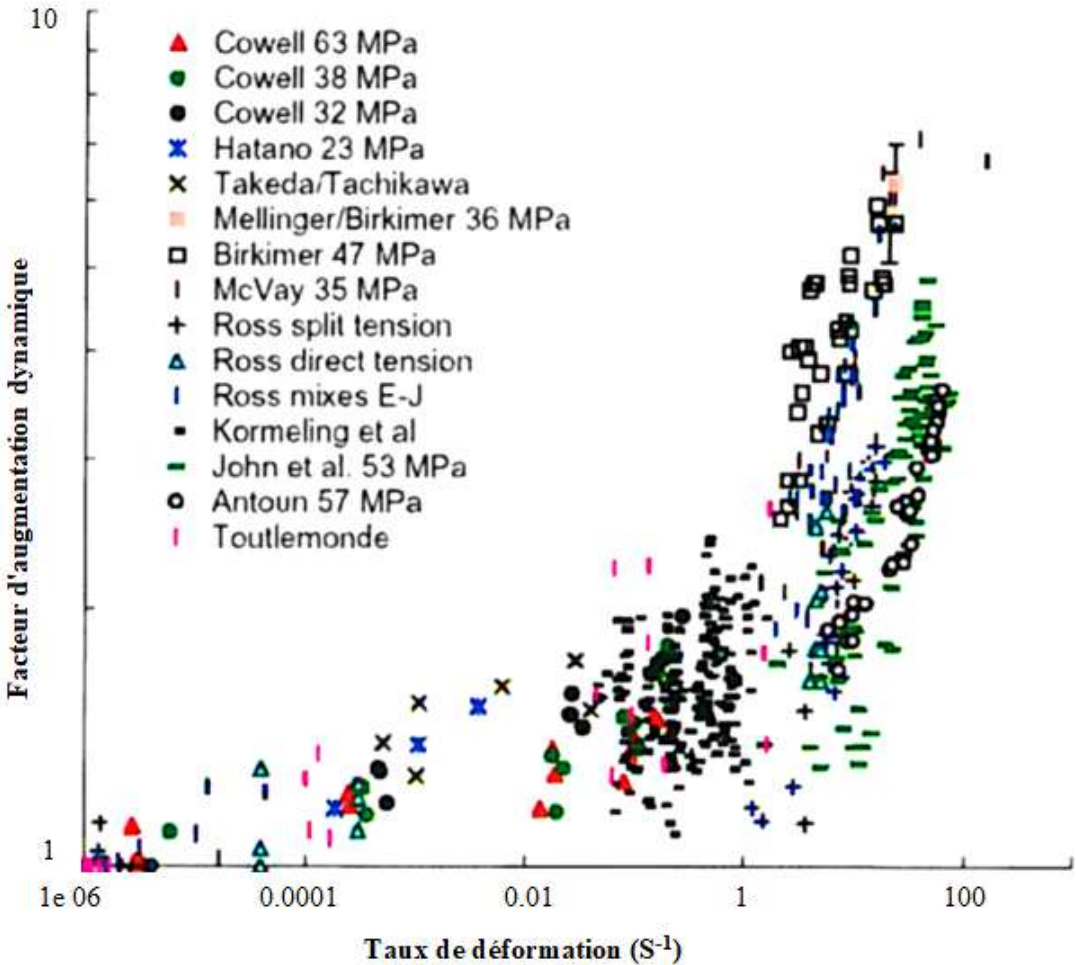


Figure 1.20. Facteur d'accroissement dynamique en traction [43]

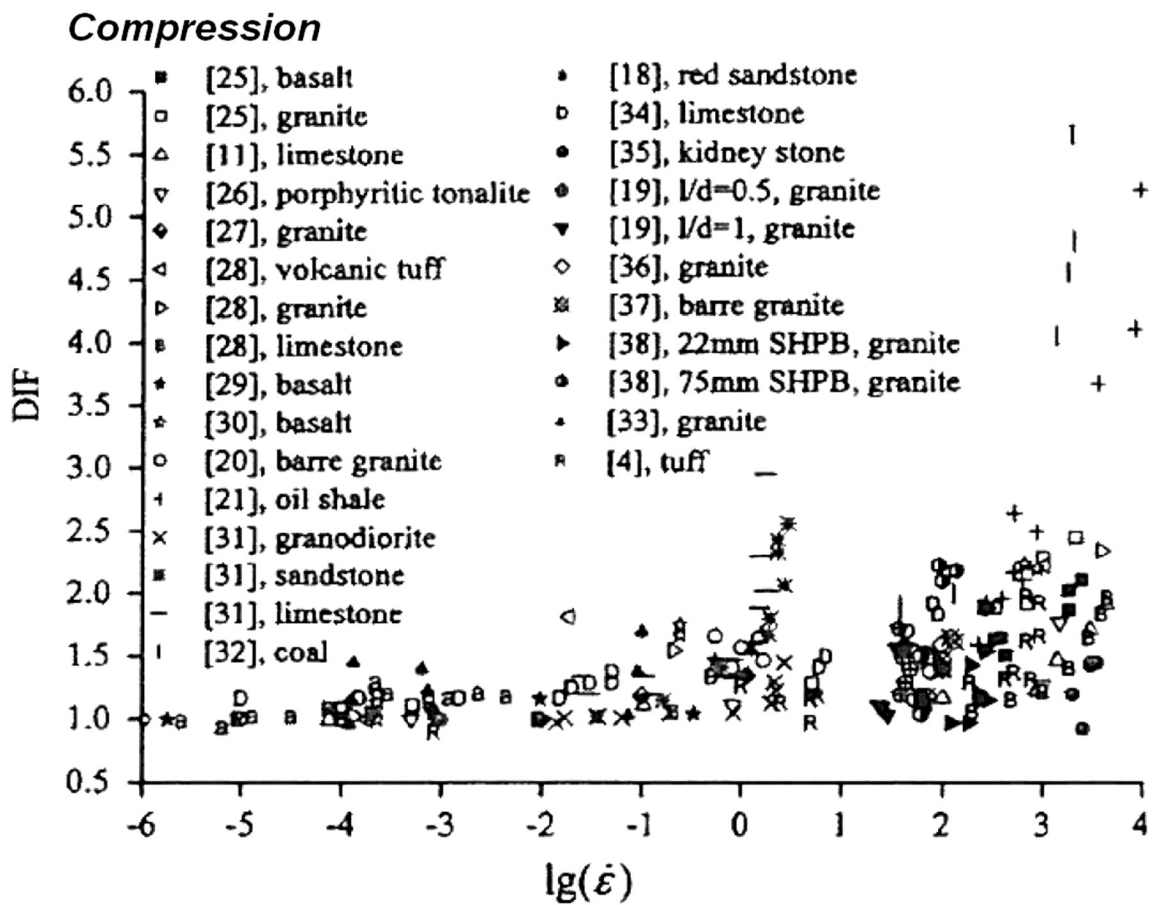
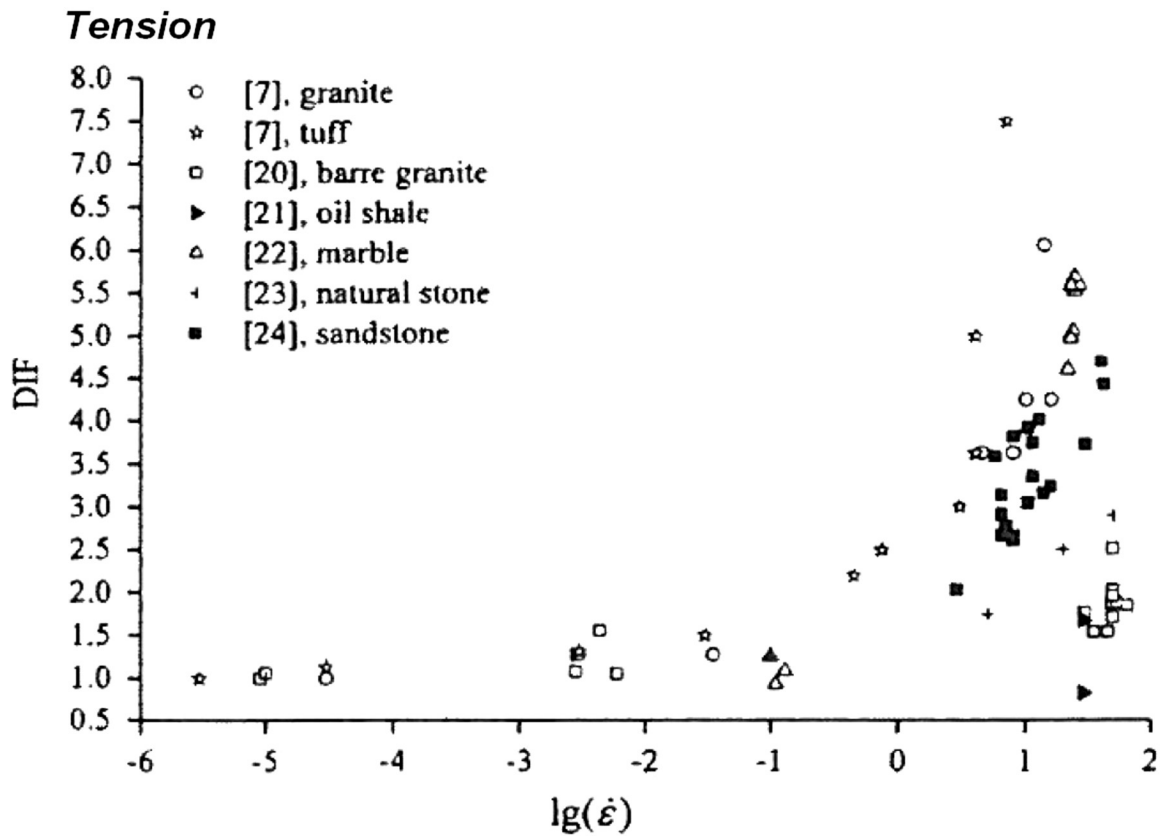


Figure 1.21. Facteur d'accroissement dynamique pour différentes conditions de roches et vitesses de déformation imposées [44].

## **7. Modèles prédictifs empiriques de fragmentation**

### **7.1. Définition d'une distribution blocométrique**

La caractérisation granulométrique d'un matériau repose sur l'analyse des dimensions et des proportions des fragments qui le composent. Cette approche quantitative ne prend cependant pas en compte les variations de forme des particules, qui peuvent différer considérablement d'un matériau à un autre. Dans la plupart des cas, il est implicitement supposé que les fragments adoptent une géométrie sphérique, bien que certaines exceptions existent.

L'analyse granulométrique peut être réalisée selon deux perspectives complémentaires : l'une basée sur une fonction de distribution cumulative et l'autre sur une densité de probabilité. La première permet de représenter la proportion cumulative de matériau dont la taille des fragments est inférieure à une valeur donnée, tandis que la seconde exprime la fréquence relative des différentes tailles de particules présentes dans l'échantillon. Dans le cadre du tamisage classique, la densité de probabilité des fragments en fonction de leur taille correspond à la masse des particules retenues dans un tamis de maille donnée, tandis que la fonction de distribution renseigne sur le pourcentage en masse du matériau passant à travers un tamis dont l'ouverture correspond à une valeur spécifique sur l'axe des abscisses (Fig. 1-21).

Les données granulométriques obtenues par ces méthodes, bien que mesurées sous forme discrète, sont généralement modélisées à l'aide de fonctions continues afin de mieux représenter la distribution des particules. Cette modélisation s'appuie sur des paramètres descriptifs permettant d'analyser la répartition des tailles et d'établir des comparaisons entre différents échantillons. Un exemple de distribution granulométrique théorique, élaboré à partir du modèle de Rosin-Rammler, (Fig. 1-22). Cette représentation peut être exprimée sous forme de fonction de distribution cumulative ou sous forme de densité de probabilité.

Dans une approche simplifiée, la courbe granulométrique obtenue à partir d'un échantillon est caractérisée par trois paramètres principaux : la médiane de taille, qui correspond à la dimension pour laquelle 50 % du matériau passe au travers du tamis ; le paramètre d'uniformité, qui reflète l'étalement de la distribution granulométrique ; et la taille maximale des fragments observés. Toutefois, il convient d'exercer une vigilance particulière lors de la comparaison de courbes granulométriques issues de différentes sources. Plusieurs facteurs peuvent en effet influencer les résultats, notamment :

la nature de la représentation adoptée (fraction massique cumulative ou fraction volumique cumulative) ;

la méthodologie de mesure utilisée, qui peut conduire à des variations dans l'interprétation des résultats (tamisage mécanique versus analyse de surface par imagerie).

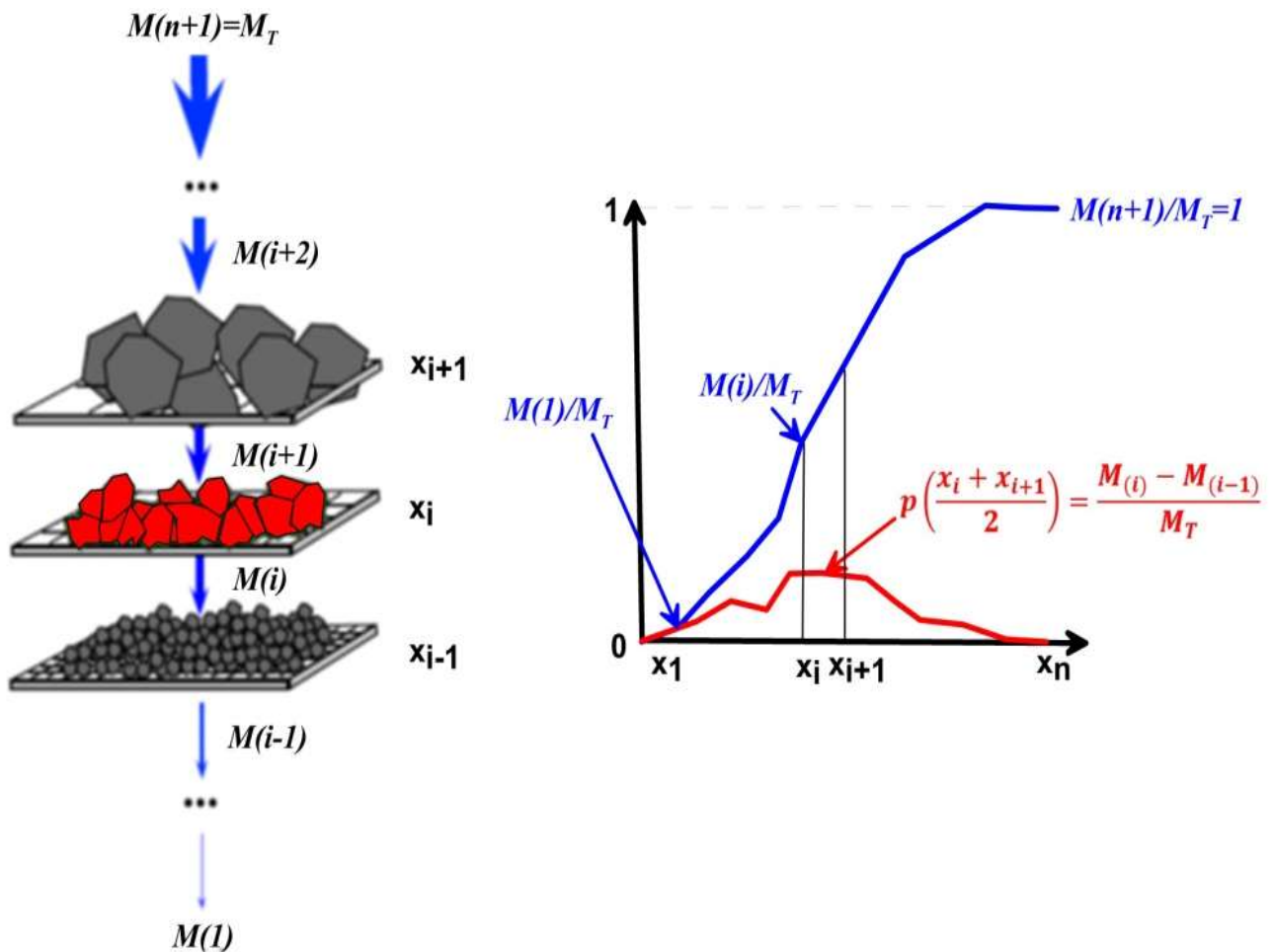
Ainsi, une compréhension approfondie des principes de la caractérisation granulométrique est essentielle pour assurer une interprétation rigoureuse des résultats et optimiser l'exploitation des matériaux granulaires dans divers contextes d'application.

## 7.2. Fonctions de répartition granulométriques usuelles

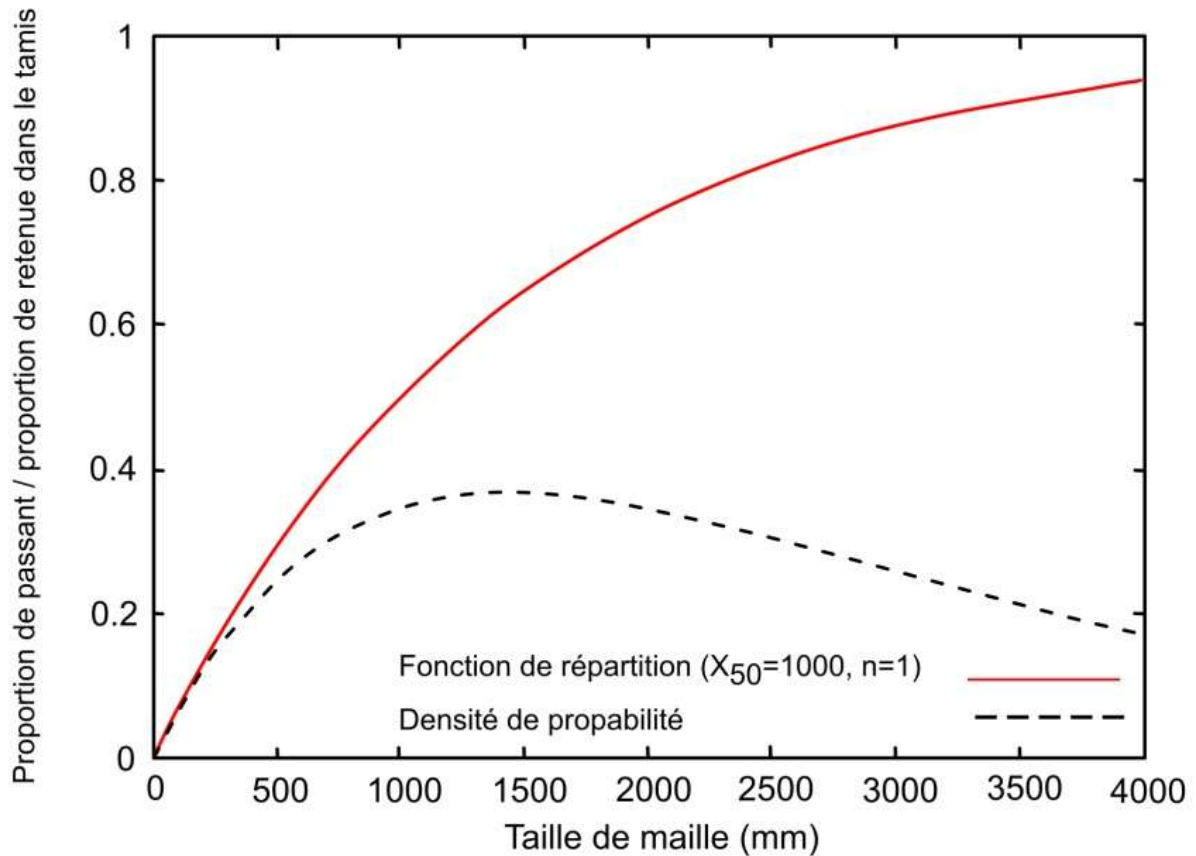
### 7.2.1. Fonction Rosin-Rammler [45]

La fonction Rosin-Rammler est largement préférée pour modéliser les distributions granulométriques dans le contexte des explosifs. Elle dérive d'une adaptation de la fonction de distribution d'une statistique de *Weibull* (1951) (Eq.1.8).

$$P(x) = 1 - e^{-ln 2 \cdot (x/x_{50})^n} \quad (\text{Eq.1.8})$$



**Figure 1.22.** Illustration des concepts de densité de probabilité de fragments (rouge) et la répartition granulométrique (bleu), pour une masse de roche  $M_T$  passée dans une série de  $n$  tamis



**Figure 1.23.** Distribution granulométrique théorique (fonction de *Rosin-Rammler*)

L'analyse des distributions granulométriques repose sur des modèles empiriques dont l'objectif principal est d'offrir une représentation mathématique des tailles de fragments issues des processus de fragmentation. Parmi ces modèles, la fonction de Rosin-Rammler constitue l'un des outils les plus couramment employés pour décrire la répartition des tailles dans les matériaux granulaires. Cependant, cette approche fait l'objet de critiques qui soulignent certaines limitations dans sa capacité à représenter fidèlement les données expérimentales. D'une part, l'un des reproches adressés à cette fonction concerne l'absence de prise en compte d'une taille maximale pour les blocs, une caractéristique qui pourrait être perçue comme physiquement incohérente [46]. En effet, dans les processus de fragmentation, il existe une limite supérieure à la taille des fragments générés, dépendant des conditions de rupture et des caractéristiques mécaniques du matériau. Toutefois, cette critique doit être nuancée, car les modèles empiriques, y compris celui de Rosin-Rammler, ne résultent pas d'une formalisation théorique des phénomènes physiques en jeu, mais plutôt d'un ajustement des courbes aux résultats expérimentaux obtenus en laboratoire ou sur le terrain. Dans ce contexte, il apparaît délicat de juger la pertinence d'un modèle uniquement sur la base de ses comportements limites,

dans la mesure où sa principale vocation est d'assurer un bon ajustement aux observations pratiques.

D'autre part, une seconde limitation concerne le comportement de la fonction Rosin-Rammler dans le domaine des fines, lorsqu'elle est représentée en échelle logarithmique. En effet, dans cette plage granulométrique, la courbe obtenue présente une évolution linéaire, ce qui est en contradiction avec les tendances observées expérimentalement [46]. Ce comportement peut limiter l'exactitude des prédictions pour les fractions fines, qui jouent pourtant un rôle clé dans de nombreuses applications industrielles et environnementales.

Pour surmonter ces restrictions, une adaptation du modèle classique peut être envisagée sous la forme d'une version bi-modale de la fonction Rosin-Rammler. Cette approche repose sur la combinaison pondérée de deux distributions distinctes, chacune étant caractérisée par des paramètres spécifiques reflétant la présence de deux modes granulométriques dominants. Grâce à cette formulation enrichie, il devient possible de mieux capturer les distributions granulométriques complexes, notamment celles résultant de processus de fragmentation multi-échelles. La version bi-modale introduit cependant une augmentation du nombre de paramètres à ajuster, nécessitant ainsi une analyse plus approfondie des relations entre ces derniers et les mécanismes physiques sous-jacents. Cette complexité accrue peut compliquer l'interprétation des résultats et limiter la généralisation du modèle à divers contextes expérimentaux.

Bien que les approches bi-modales ou multi-modales permettent d'améliorer l'adéquation aux données expérimentales, la simplicité d'usage et la robustesse du modèle classique expliquent pourquoi la fonction de Rosin-Rammler sous sa forme originelle demeure largement privilégiée dans la littérature scientifique. Son utilisation repose sur un compromis entre précision et facilité d'application, rendant son interprétation accessible pour diverses études granulométriques.

### **7.2.2. Fonction *Swebrec***

La fonction *Swebrec*, nommée d'après le *Swedish Blasting Research Centre*, est une fonction de distribution granulométrique récemment développée [47]. Elle offre une meilleure pertinence que la fonction *Rosin-Rammler* pour décrire la portion fine des courbes granulométriques. Cette fonction a été comparée à de nombreuses courbes granulométriques obtenues à partir de tamisage, de tirs à l'échelle réelle, de tests en laboratoire, ainsi que d'opérations de concassage/broyage [48]. Elle est caractérisée par trois paramètres, incluant la taille maximale des blocs, qui y est intégrée.

L'expression de la fonction *Swebrec* est la suivante (Eq.1.9):

$$P(x) = 1/(1 + [\ln(\frac{X_{max}}{x})/\ln(\frac{X_{max}}{X_{50}})]^b) \quad (\text{Eq.1.9})$$

Une version étendue de la fonction *Swebrec*, définie par cinq paramètres, a également été suggérée (Éq.1.10). La remarque précédente concernant les fonctions à plusieurs modes est tout à fait applicable ici.

$$P(x) = 1/(1 + a. [\ln(\frac{X_{max}}{x})/\ln(\frac{X_{max}}{X_{50}})]^b + (1 - a). [(\frac{X_{max}}{x} - 1)/(\frac{X_{max}}{X_{50}} - 1)]^c) \quad (\text{Eq.1.10})$$

### 7.3. Prédiction de taille médiane

#### 5.3.1 Equation de *Kuznetsov*

Proposée par *Kuznetsov* (1973) [49], l'Equation (Eq.1.11) prédit la taille médiane  $X_{50}$  des fragments abattus en fonction de paramètres caractéristiques de la roche et de l'explosif utilisé:

$$X_{50} = A. Q_e^{1/6} \cdot (\frac{115}{RWS})^{19/30} / (q)^{0,8} \quad (\text{Eq.1.11})$$

où:

$A$  : Rock Mass Factor (voir Equation 1.13)

$Q_e$  : Masse d'explosif par trou (kg)

$RWS$  : Puissance relative de l'explosif (Relative Weight Strength),  $RWS = 100$  pour l'Anfo

$q$  : Consommation spécifique (kg/m<sup>3</sup>)

Le facteur de la masse rocheuse est estimé suivant l'Equation (Eq.1.12), [50]:

$$A = 0,06. (RMD + JF + RDI + HF) \quad (\text{Eq.1.12})$$

La Table 1.5 explique le calcul des paramètres RMD, JF, RDI et HF

**Table 1.5.** Calcul des facteurs de la masse de roche (Rock Mass Factor) [50]

RMD Rock Mass Description <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : roche pulvérulente ou friable</li> <li>▪ 20 : à gros blocs</li> <li>▪ 50 : roche massive</li> </ul>	JPA Joint Plane Angle <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : horizontale</li> <li>▪ 20 : pendage en direction de la surface libre</li> <li>▪ 30 : pendage perpendiculaire à la surface libre</li> <li>▪ 40 : pendage vers l'intérieur de la surface libre</li> </ul>
JPS Joint Plane Spacing <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 10 : Espacement serré, <math>S_j &lt; 0,1</math> m</li> <li>▪ 20 : Espacement moyen, <math>0,1</math> m <math>&lt; S_j &lt;</math> Taille bloc admissible <math>x_0 = 1</math> m</li> <li>▪ 50 : Espacement large <math>S_j &gt; x_0 = 1</math> m</li> </ul>	HF : Hardness Factor <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ = <math>E/3</math> ; si <math>E &lt; 50</math>MPa</li> <li>▪ = <math>\sigma_c</math> (MPa)/5 ; si <math>E &gt; 50</math>MPa</li> </ul>
JF Joint Factor = JPS + JPA	

#### 7.4. Autres modèles prédictifs proposés

Dans leur étude, les chercheurs utilisent le concept d'ajustement d'une loi puissance pour décrire comment le paramètre  $X_{50}$  dépend de la consommation spécifique [51]. Ils appliquent cette méthode pour décrire la réaction d'un massif aux activités d'abattage, en se basant sur des résultats expérimentaux.

D'autres chercheurs ont également proposé des prédictions pour la taille médiane des fragments, en se basant sur la vitesse de détonation de l'explosif et le coefficient de couplage entre l'explosif et la roche [52]. À titre d'exemple, on peut mentionner la formule *Saroblast* [53].

Tel que pour l'équation de *Kuznetsov* (1973), le but de ces équations prédictives réside dans leur capacité à quantifier l'impact des variations de paramètres spécifiques sur les résultats des tirs. Nul de ces équations n'est basée sur une loi physique universellement prouvée ; pour cela, il faudrait que le mécanisme de fragmentation soit décrit par une théorie générale.

#### 7.5. Taille maximale des fragments

*Ouchterlony* (2005) propose la relation suivante pour estimer la taille maximale des fragments générés lors des tirs d'abattage, en se basant sur les paramètres géométriques et la blocométrie in situ (Éq 1.13), [54].

$$X_{max} = \min(X_{max/IS}, B, S) \quad (\text{Eq.1.13})$$

Où :  $X_{max/IS}$ ,  $B$  et  $S$  sont respectivement la taille maximale de bloc in situ, la banquette et l'espacement entre trous. Il a été dernièrement évoqué que l'évolution de  $X_{max}$  avec la consommation spécifique est qualitativement similaire à celle de  $X_{50}$ , [55].

## **8. Conclusion**

Ce chapitre bibliographique a mis en évidence l'interdépendance des paramètres de tir et leurs impacts multidimensionnels. L'analyse démontre que la fragmentation rocheuse, résultant de l'interaction explosive/roche et conditionnée par la géométrie du plan de tir, constitue le facteur déterminant des retombées technico-économiques. Une optimisation de la distribution granulométrique influence directement l'efficacité des opérations d'abattage et de transport, tout en réduisant les coûts énergétiques de la comminution - où le concept énergie/surface trouve toute sa pertinence.

Parallèlement, la maîtrise des effets induits revêt une importance cruciale pour le volet environnemental. Les mécanismes de propagation des vibrations et des ondes de surpression, étroitement liés à la séquence d'amorçage et aux propriétés énergétiques des explosifs, nécessitent une modélisation fine pour développer des mesures d'atténuation efficaces.

Face aux complexités de la dynamique rapide et à la dépendance aux vitesses de sollicitation, l'élaboration de modèles prédictifs empiriques combinée à des techniques de surveillance avancées s'avère prometteuse. Cette approche intégrée, conciliant les impératifs de productivité et les exigences environnementales, ouvre la voie vers une optimisation durable des opérations minières.

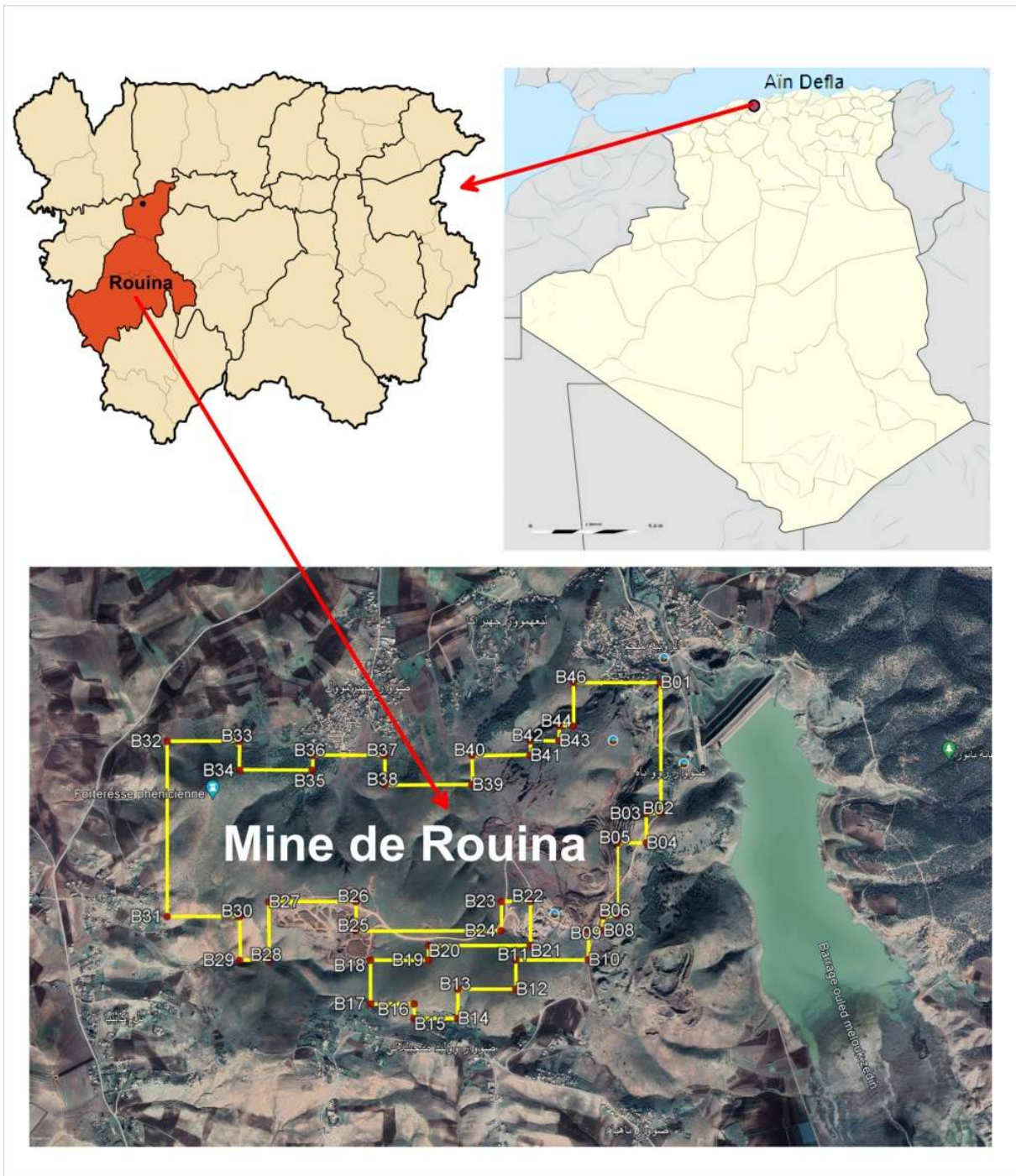
Cette démarche s'inscrit dans une vision plus large de l'exploitation minière responsable, où les enjeux technologiques, économiques et environnementaux sont pris en compte de manière équilibrée pour assurer la pérennité des ressources et la préservation des écosystèmes.

**CHAPITRE II**  
**Présentation De La Mine De**  
**Rouina**

## **1. Localisation géographique de la mine**

Le gisement de minerais de fer du lieu-dit Rouina se situe à proximité de la localité du même nom, à une distance d'environ 4,5 km vers le sud, sur la rive occidentale de l'Oued de Rouina. Il se trouve à 17 km à l'ouest de la ville d'Aïn Defla, dans une région bénéficiant d'une accessibilité confortable grâce aux infrastructures de transport existantes. En effet, la route nationale RN4, qui constitue un axe stratégique reliant Alger à Oran, ainsi que la ligne de chemin de fer, se situent à seulement 3 km du site, facilitant ainsi les opérations logistiques et le transport des matériaux extraits.

L'emprise du gisement est définie par un ensemble de 46 points de repérage, couvrant une superficie totale de 436 hectares, conformément aux dispositions du permis minier PXM 137 délivré le 15 mai 2023 [SOMIFER 2024]. Les coordonnées géographiques associées à ces points de délimitation sont détaillées dans le tableau 2.1, fournissant une référence technique essentielle pour la localisation précise et l'exploitation du site par rapport au système national (UTM 31 N NS 59).



**Figure 2.1.** Situation géographique de la mine de Rouina.

**Tableau 2.1.** Coordonnées topographiques du périmètre Rouina (système géodésique universel transversal mercator Nord Sahara « UTM »)

<b>Pts</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Pts</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Pts</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>01</b>	394300	4007700	<b>16</b>	392600	4005500	<b>31</b>	390900	4006100
<b>02</b>	394300	4006800	<b>17</b>	392300	4005500	<b>32</b>	390900	4007300
<b>03</b>	394200	4006800	<b>18</b>	392300	4005800	<b>33</b>	391400	4007300
<b>04</b>	394200	4006600	<b>19</b>	392700	4005800	<b>34</b>	391400	4007100
<b>05</b>	394000	4006600	<b>20</b>	392700	4005900	<b>35</b>	391900	4007100
<b>06</b>	394000	4006100	<b>21</b>	393400	4005900	<b>36</b>	391900	4007200
<b>07</b>	393900	4006100	<b>22</b>	393400	4006200	<b>37</b>	392400	4007200
<b>08</b>	393900	4006000	<b>23</b>	393200	4006200	<b>38</b>	392400	4007000
<b>09</b>	393800	4006000	<b>24</b>	393200	4006000	<b>39</b>	393000	4007000
<b>10</b>	393800	4005800	<b>25</b>	392200	4006000	<b>40</b>	393000	4007200
<b>11</b>	393300	4005800	<b>26</b>	392200	4006200	<b>41</b>	393400	4007200
<b>12</b>	393300	4005600	<b>27</b>	391600	4006200	<b>42</b>	393400	4007300
<b>13</b>	392900	4005600	<b>28</b>	391600	4005800	<b>43</b>	393600	4007300
<b>14</b>	392900	4005400	<b>29</b>	391400	4005800	<b>44</b>	393600	4007400
<b>15</b>	392600	4005400	<b>30</b>	391400	4006100	<b>45</b>	393700	4007400
						<b>46</b>	393700	4007700

## **2. Caractéristiques Géographiques, Climatiques et Socio-Économiques**

Le secteur dans lequel s'inscrit le champ minier se distingue par une topographie caractérisée par des structures montagneuses fortement accidentées. Ces formations appartiennent à l'unité géologique autochtone du Chélif et présentent un relief dont l'altitude varie généralement entre +210 et +350 mètres, atteignant un maximum de +415 mètres. L'altitude relative de la zone fluctue entre 30 et 140 mètres, témoignant de la complexité du modelé du terrain.

L'organisation du réseau hydrographique est étroitement liée à la structuration géologique en blocs de la région. Celle-ci favorise le développement de larges vallées où s'écoulent de manière pérenne plusieurs cours d'eau, notamment l'Oued Chélif et l'Oued Rouina. Le régime hydrologique de ces oueds est variable et dépend essentiellement des apports saisonniers en eau, influencés par les précipitations et les conditions climatiques locales.

Le climat de la région est de type subméditerranéen, caractérisé par des hivers relativement doux et pluvieux, contrastant avec des étés marqués par des températures élevées et une sécheresse prononcée. En période hivernale, la température moyenne avoisine les 7 °C, tandis qu'en saison estivale, elle peut atteindre des valeurs comprises entre 29 °C et 36 °C. La pluviométrie annuelle demeure modérée, avec une moyenne qui ne dépasse pas 400 mm. Les ressources hydriques disponibles sont principalement concentrées dans un barrage implanté au sud du site de Merimet, qui joue un rôle majeur dans la gestion et la répartition de l'eau pour les différents usages régionaux.

L'accessibilité au gisement est assurée par un réseau d'infrastructures développé, facilitant ainsi l'acheminement des matériaux extraits vers les principaux centres de transformation et de consommation. La route nationale n° 04, reliant Alger à Oran, ainsi que la ligne ferroviaire adjacente, se trouvent à seulement 3 km du site. Plusieurs agglomérations se situent à proximité, parmi lesquelles Rouina, distante de 3 km, Ain Defla, chef-lieu de la wilaya, à 17 km, ainsi que Khemis Miliana et Chélif, respectivement localisées à 43 et 46 km.

L'activité économique de la région repose essentiellement sur l'agriculture, secteur prédominant, complété par un élevage extensif. En parallèle, l'exploitation des formations calcaires locales représente une ressource significative pour l'industrie des matériaux de construction, avec la production d'agrégats et de pierres destinées aux revêtements et à la construction. Il est également à noter que cette région est soumise à une activité sismique importante, ce qui impose des précautions particulières en matière de conception et de dimensionnement des infrastructures [56].

La production issue de l'exploitation du gisement est principalement destinée à l'industrie cimentière nationale. La quasi-totalité du minerai de fer extrait est expédiée vers les cimenteries des régions ouest et centre du pays, où il est employé comme additif dans le processus de fabrication du ciment. Les principaux clients de la mine de Rouina incluent les cimenteries de Zahana (Mascara), Meftah (Blida), Saida, Sour El Ghazlane (Bouira), L.Ciba Oggaz (Mascara), ECDE (Chlef), Saoura (Béchar), Beni Saf (Ain Témouchent) et SARL Amouda (El Aghouat). Ce réseau de distribution stratégique permet une valorisation efficace du minerai extrait et contribue à l'approvisionnement régulier des industries consommatrices situées dans les différentes régions du pays.

### **3. Historique des travaux de recherches et d'exploitation**

Les massifs du Chélif, suscitent un intérêt géologique et minier marqué en raison de leur complexité structurale. De nombreux chercheurs ont étudié divers aspects de cette région, notamment la couverture sédimentaire et l'origine du volcanisme associé (âge, nature, etc.). Voici un aperçu des contributions majeures dans cette zone :

En 1873, Pomel' (1873) a rédigé un mémoire sur la géologie de la région de Miliana, accompagné d'une carte au 1/200 000. Gentil (1904) a approfondi ce travail en réalisant une cartographie plus précise au 1/50 000 de la même région, attribuant une origine primaire aux schistes du Zaccar Chergui ainsi qu'aux schistes et quartzites du Doui.

En 1932, L. Glangeaud (1932) a brièvement étudié les massifs du Zaccar et de Littré, avant de revenir sur ces travaux avec davantage de détails. L'année suivante, P. Geoffroy (1933) a reclassé des terrains initialement identifiés comme étant du Primaire au Néocomien, au Barrémien et à l'Aptien, en se fondant sur des données paléontologiques qui se sont révélées erronées. Les recherches de Glangeaud et Mattauer (1975) [67] ont cherché à corriger les interprétations de Geoffroy, confirmant que les formations volcaniques appartiennent effectivement au primaire, bien que l'âge des schistes de Littré reste à préciser.

Berthiaux et Vataire (1981) ont apporté des éclaircissements sur les aspects tectoniques du massif du Chélif, tandis que Khodja (1968) a réalisé une étude paléontologique et stratigraphique. Les travaux de Lepvrier et al. ont mis en lumière un métamorphisme de type green-schiste dans les massifs de Boumâad (1973) [68], tandis que Kireche (1977) a exploré des études microtectoniques [69].

La découverte du gisement de fer de Rouina date de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, avec l'octroi de la première concession minière en 1872. Au sein de ce champ minier, trois zones principales ont été identifiées : Merimet, Ravin Sud et la Région Filonienne, ainsi que quelques petits gîtes.

La zone de Merimet a été exploitée entre 1906 et 1931, produisant environ un million de tonnes de minerai. L'exploitation s'est effectuée à ciel ouvert jusqu'à un niveau de +180m, au-dessous du niveau hydrostatique de +190m. Les travaux ont été entravés par de fortes infiltrations d'eau, nécessitant un pompage de 700 à 750 m<sup>3</sup>/heure pour un usage agricole. En 1931, un orage a détruit le barrage et la station de pompage, inondant la mine, qui est devenue un lac, actuellement utilisé pour l'approvisionnement en eau du village.

La zone du Ravin Sud a connu une exploitation de 1912 à 1958, tant à ciel ouvert qu'en souterrain, jusqu'à un niveau de +215m, avec des travaux souterrains à +208m et +196m. Entre 1954 et 1958, une cheminée a été creusée pour évacuer le minerai vers la surface. Selon un bilan de 1963, les réserves restantes étaient estimées à 1,8 million de tonnes. En 1992, ces réserves ont été réévaluées à plus de 2,9 millions de tonnes, et depuis lors, elles sont exploitées par la société SOMIFER-Spa.

En 2014, l'ORGM a effectué des travaux d'exploration complémentaires dans la zone Nord du gisement et la zone filonienne, identifiant plus de 2,5 millions de tonnes de réserves additionnelles. Les réserves géologiques totales en minerai de fer de la mine de Rouina, mises à jour en 2024, sont désormais estimées à plus de 5,8 millions de tonnes, toutes catégories confondues.

## **4. Cadre géologique**

### **4.1. Géologie régionale**

Le bassin du Chélif s'étend sur une superficie considérable d'environ 3000 km<sup>2</sup>, présentant une aire de sédimentation orientée NE-SW, d'une longueur de 300 km et d'une largeur de 100 km. Les zones centrales de ce bassin se distinguent par des subsidences, où les dépôts sédimentaires atteignent des épaisseurs pouvant dépasser 5000 mètres, principalement constitués de marnes bleues.

Ce bassin fait partie des bassins sublittoraux situés dans le centre-ouest de l'Algérie, s'alignant parallèlement à la côte méditerranéenne. Il se trouve dans des zones topographiques moins élevées que les chaînes plissées secondaires qui l'entourent. D'origine néogène, son développement est étroitement lié aux phases finales et intenses de l'orogénèse alpine.

Les phénomènes de transgression marine, survenant du Miocène supérieur au Pliocène, ainsi que l'érosion des reliefs environnants, la subsidence et l'activité tectonique encore présente ont favorisé le dépôt de plus de 5000 mètres de sédiments, principalement marins. À l'exception de

la période du Pliocène supérieur à aujourd'hui, qui est marquée par des dépôts continentaux.

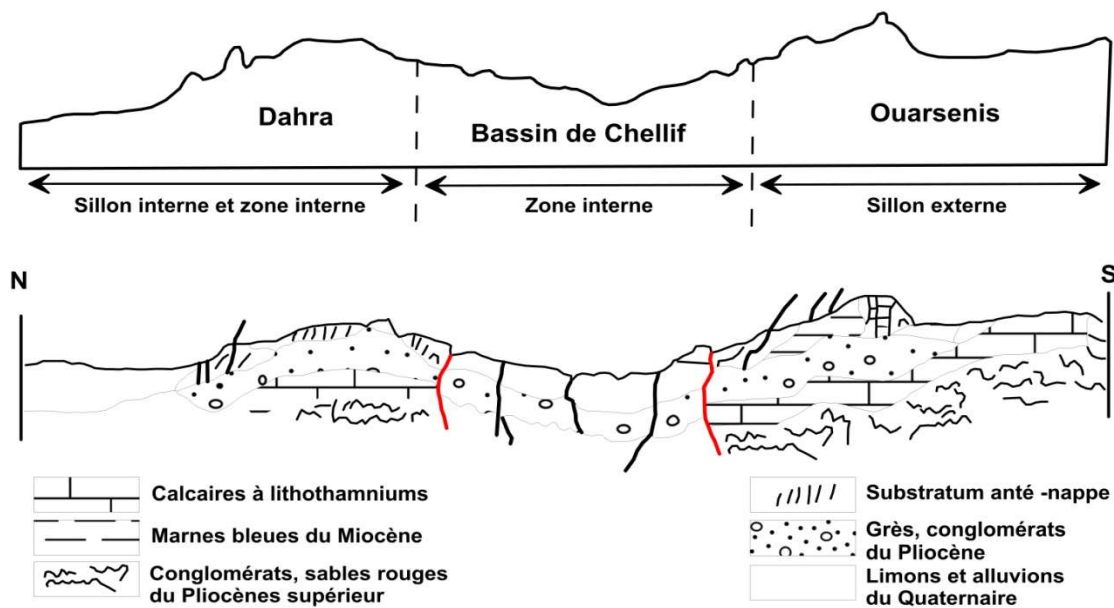
Les formations lithologiques observées dans les plaines (Fig. 2-2) incluent :

Les terrains néogènes et quaternaires situés dans la partie centrale du bassin.

Le substratum, qui se compose principalement de roches secondaires, comprenant :

Les monts de l'Ouarsenis au sud et ceux de Dahra au nord, ainsi que les massifs métamorphiques à schistosité du Doui et de Rouina à l'est.

Les terrains allochtones formés durant les différentes phases tectoniques alpines, notamment au cours de l'Eocène moyen et du Miocène inférieur [59].



**Figure 2.2.** Schéma simplifié de la structure du bassin du Chéelif [60]

## 4.2. Stratigraphie, Lithologie

Le champ minier de Rouina se manifeste comme un massif rocheux d'environ 9 km. Il est formé de roches paléozoïques et jurassiques de la zone avec un faciès carbonaté de la zone structurale de l'atlas Tellien.

### 4.2.1. Le Paléozoïque

Cette formation s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres. Bien qu'aucun fossile n'ait été découvert, son âge est corroboré par sa position sous le Lias, daté dans le Djebel Doui. Les massifs du Chéelif, bien connus depuis longtemps, ont été l'objet d'interprétations variées et n'ont été que partiellement étudiés. Cette complexité découle de deux éléments : le Jurassique est mal daté et les faciès du Paléozoïque présentent des caractéristiques particulières, pouvant facilement être confondus avec ceux du Secondaire.

À ce jour, les séries suivantes peuvent être identifiées dans le substratum antéjurassique des massifs du Chéelif, de bas en haut :

### ***Le socle cristallophyllien***

Découvert par Glangeaud en 1932, ce socle affleure difficilement au sud de Doui. On y trouve néanmoins de belles pegmatites le long d'une piste traversant un complexe métamorphique très altéré [61]. C'est le seul affleurement de socle cristallophyllien en place connu dans les régions telliennes, à l'exception de la zone littorale.

### ***La série schisto-calcaire de Littré***

Nommée d'après le massif de Littré, où elle forme d'importants affleurements, cette série se retrouve également dans les massifs de Doui et de Rouina. Il s'agit de schistes au faciès remarquablement uniforme, d'une patine gris verdâtre et toujours feuilletés. Quelques bancs de quartzites s'y intercalent localement, très finement détritiques et parfois légèrement calcaires. Ces schistes sont systématiquement azoïques (sans fossiles). L'âge primaire des schistes de Littré est indiscutable, comme en témoigne leur position sous le Jurassique du massif, où l'on observe une discordance angulaire marquée entre eux et le Jurassique.

### ***La série schisto-gréseuse et conglomératique du Doui***

Le Trias présent dans les massifs du Chéelif apparaît à la base du Lias, reposant sur le Paléozoïque. On y observe parfois des niveaux de dolomies et de cargneules, probablement attribués au Trias ou à l'infra-Lias. Bien que ces niveaux soient très minces (allant de 0 à quelques mètres), ils revêtent une certaine importance. Ils représentent des niveaux transgressifs et discordants sur les différentes séries paléozoïques du Chéelif, indiquant que les dépôts triasiques, habituellement variés et épais ailleurs, se révèlent ici absents ou très réduits.

À la base des calcaires jurassiques reposant sur le Primaire dans la partie sud-est du Djebel Doui, on observe des niveaux dolomitiques d'aspect triasique ou infraliasique. Ces niveaux comprennent :

- Une brèche de base blanchâtre, contenant de nombreux éléments de pegmatite et de schiste violet de la série schisto-quartziteuse du Doui, formant ici le substratum du Trias.
- Des cargneules brunes, bréchiques, avec des éléments de nature similaire.
- Un calcaire brunâtre, dolomitique et ferrugineux.

#### **4.2.2. Le Jurassique**

Les recherches menées ont permis de caractériser avec précision la série lithologique-type du Jurassique du flanc ouest du massif de Rouina, les différentes strates se présentent de la manière suivante :

Des calcaires marneux et des marnes schisteuses, avec des éléments pyriteux en haut, typiques du Néocomien. À la base, la série devient plus riche en calcaire et abrite une association

micropaléontologique du Tithonique-Berriasien, incluant *Calpionella alpina*, *Calpionella elliptica* et *Calpionella sp* [58].

Des calcaires en petits bancs, à patine claire (crème à jaunâtre), avec des intercalations marneuses (certaines sections des affleurements sont moins visibles). À la base, ces calcaires prennent un faciès "ammonitico-rosso", caractérisé par l'apparition de marno-calcaires rognonneux rose à lie de vin, où quelques débris rares d'Ammonites d'Aptychus et une dent de poisson ont été découverts.

Des calcaires similaires à ceux du Tithonique du Kef Larouah, du massif de l'Ouarsenis et d'autres régions d'Algérie.

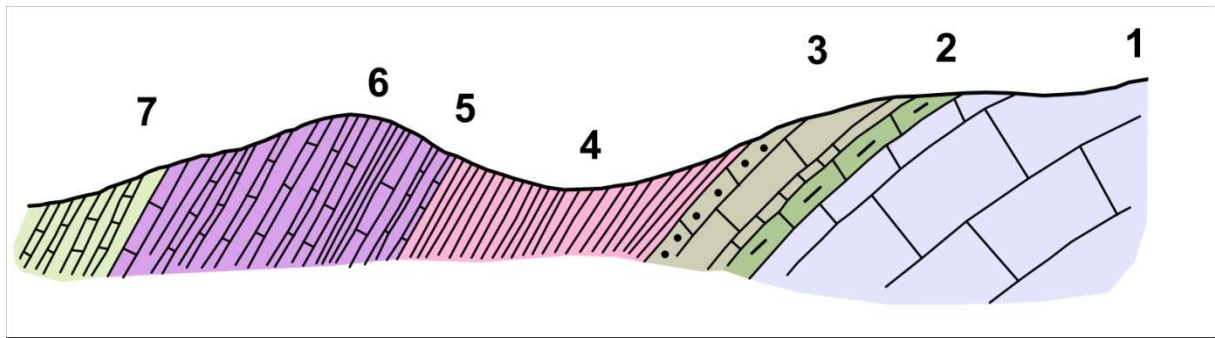
Des schistes lie de vin (d'une épaisseur d'au moins 30 m), violacés ou verdâtres, très durs, se fracturant en plaquettes ou en grandes esquilles. À la base, des lits siliceux s'intercalent, conférant à la série un aspect rubané. Ce niveau correspond à une petite combe, apparemment celle désignée comme "argovienne".

Des calcaires très détritiques (de 2 à 3 m d'épaisseur), contenant de nombreux galets anguleux de roches éruptives, vraisemblablement primaires.

Des calcaires compacts gris-bleu (environ 15 m), présentant des niveaux rognonneux avec de nombreux filaments en plaque mince. Ce microfaciès est répandu dans tout le bassin méditerranéen, son apogée correspondant au Dogger [62] et [63]. Dans la série bien datée du Kef Larouah et du massif de l'Ouarsenis, il se trouve immédiatement sous la combe argovienne. Ces calcaires contiennent parfois des silex très blancs, en lits ou en rognons, confirmant leur attribution au Dogger.

Des calcaires compacts cristallins, gris-bleu, se trouvant en gros bancs. En descendant dans la série et sur le versant oriental du sommet où sont situées les ruines du télégraphe, ces calcaires présentent de nombreux silex en lits, à patine brune.

La majorité des calcaires du massif de Rouina, qui se sont formés entre l'Argovien et le Paléozoïque, appartiennent donc au Dogger et au Lias. Cette série calcaire atteint plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.



**Figure 2.3.** Coupe géologique du flanc Ouest de Rouina

**Légende :** [1=Calcaire compact cristallin, gris-bleu, en gros bancs, 2=Calcaire compact à niveaux rognonneux (15m) ; 3=Calcaire très détritique, à nombreux galets anguleux de roches éruptives (primaire) (2 à 3m) ; 4= Schiste lie de vin, violacés ou verdâtres, très durs (30m) ; 5= Calcaires ; 6= Calcaires en petits bancs, à intercalations plus marneuses à faciès ammonitico-rosso ; 7= Calcaires marneux et marnes schisteuses à sommet pyriteux].

#### 4.2.3. Le Néocomien

La sédimentation calcaire à la fin du Jurassique s'est poursuivie de manière continue et sans changement significatif durant le Néocomien (Valanginien-Hauterivien), rendant difficile la distinction lithologique entre le Tithonique et les premiers niveaux du Crétacé. Ce n'est qu'à la fin du Néocomien que de nouveaux faciès émergent, avec l'apparition d'intercalations marneuses ou schisteuses, lesquelles ne se développeront réellement qu'au Barrémien.

Les affleurements du Néocomien sont bien définis dans le massif de Rouina, souvent en relation étroite avec les affleurements jurassiques. Au-dessus des strates malmiennes (Argovien à faciès "ammonitico-rosso" et calcaires tithoniques), on trouve des calcaires analogues à ceux du Néocomien présents dans l'Ouarsenis et le Koudiat Larouah. À la base de ces calcaires, on observe quelques rares calpionnelles (*C. alpina*, *C. elliptica*, *C. sp.*), probablement attribuables au Tithonique-Berriasien.

Plus haut dans la série, à proximité des niveaux transgressifs du Miocène, celle-ci devient plus marneuse et présente des éléments pyriteux.

#### 4.3. Tectonique de la région

Les failles de détachement entraînent un amincissement de la croûte terrestre, un processus qui provoque un thermo-métamorphisme décroissant, presque absent dans les séries du Sénonien et de l'Éocène [64].

Dans ce cadre géologique, le bassin du Chlef subit des dislocations en raison de l'orogénèse alpine, qui se manifeste à travers plusieurs événements :

Dans un premier temps, une tectonique tangentielle provoque un écaillage des séries à la fin du Crétacé. Cette compression s'accompagne de plissements à schistosité ainsi que de métamorphisme dans les massifs autochtones.

Au cours de l'Éocène, les premières manifestations de la mise en place des nappes de charriage se font sentir. Par la suite, pendant le Lutétien, des chevauchements majeurs se produisent, avec des mouvements de déplacement significatifs orientés du nord vers le sud.

Le Miocène inférieur marque une phase cruciale de tectonique tangentielle, responsable des écaillages et de la formation de structures de nappes. Enfin, durant le Miocène moyen, le bassin de Chélif se distingue par des mouvements tectoniques. Les massifs affleurants dans cette région présentent des manifestations variées, influencées par la nature des matériaux et les conditions antérieures à la déformation. Cette tectonique peut être résumée en quatre phases distinctes [64] :

#### **Première phase**

Plissement à schistosité et métamorphisme. Cette phase majeure se manifeste par des structures à grande et petite échelle observables dans le Témoulga et le Doui, contrairement à d'autres régions où elle se caractérise par la schistosité et les linéations associées.

#### **Deuxième phase**

Plissement à schistosité moins prononcée et métamorphisme. Les structures formées durant cette phase (linéaires ou planaires) sont réparties différemment sur les massifs. Les plis varient en échelle, allant de centimétriques à métriques dans le Témoulga et atteignant des tailles hectométriques dans le Doui, englobant l'ensemble du massif de Rouina. Un métamorphisme de type « schiste vert » accompagne également le plissement, comme pour la première phase.

#### **Troisième phase**

Plissement tardif. Cette phase est responsable des plis droits à grande amplitude et des plans axiaux verticaux. Dans le Témoulga, elle se manifeste sous forme de plis en genoux ou en chevrons, avec la présence de plis d'entraînement (centimétriques) accompagnant les grands plis.

#### **Quatrième phase**

Tectonique cassante (failles et diaclases) contemporaine, possiblement liée à une surrection générale de l'ensemble des massifs. Cette phase est compressive, se déroulant à un niveau structural élevé, suivie d'une distension entraînant d'énormes fractures.

#### **4.4. Géologie locale**

Le gisement de fer de Rouina s'inscrit dans le massif rocheux de Rouina, formé après l'orogénèse alpine et situé à la frontière du méga géosynclinal. Il prend la forme d'un anticlinal orienté entre 30° et 40° au nord-est, émergeant au milieu des alluvions de la vallée de Chlef. Les flancs de cet anticlinal sont constitués de terrains carbonatés du secondaire, avec des pendages croissants s'étendant du cœur vers l'extérieur, ce dernier abritant des formations paléozoïques.

Le massif de Rouina est principalement composé des éléments suivants :

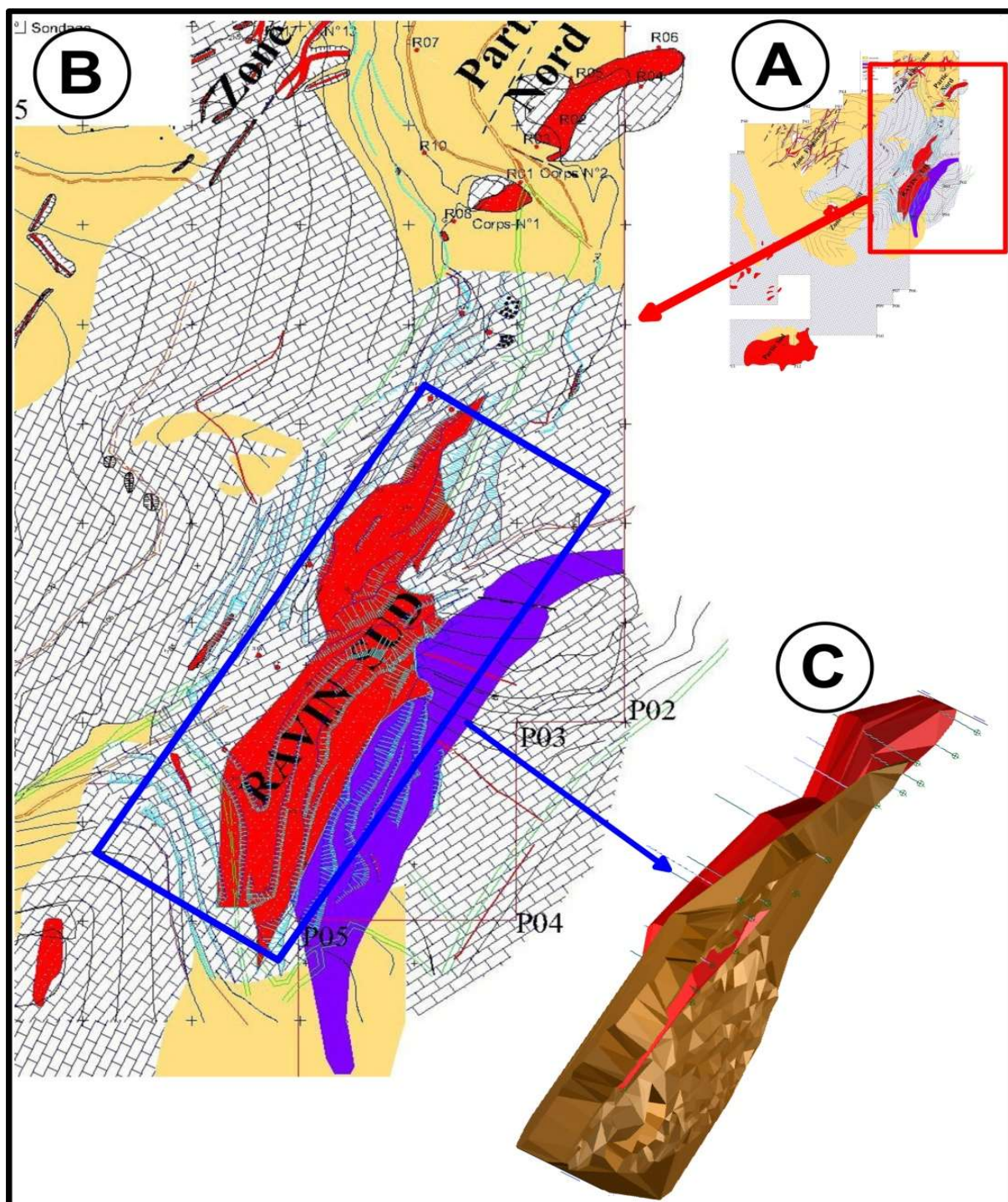
La série schisto-gréseuse et conglomératique du Paléozoïque ;

Les bancs carbonatés (calcaires et schistes) du Jurassique, qui constituent la majorité des affleurements dans la région ;

Un affleurement de marnes du Crétacé inférieur ;

Un conglomérat de base marquant le contact entre le socle et la couverture.

Il est important de noter que les terrains triasiques, tertiaires et quaternaires sont absents dans cette zone. La minéralisation ferrifère de Rouina remonte au jurassique (Lias moyen), ce qui indique une formation datant d'au moins 245 millions d'années.



**Figure 2.4. Carte géologique du gisement de Rouina**

- A- Carte géologique du massif de Rouina (plan d'ensemble) ORGM 1992-2014 actualisée par la SOMIFER 2024 ;
- B- Carte géologique de la zone du Ravin sud ;
- C- Coupe géologique zone du Ravin sud].

#### 4.4.1 Litho-stratigraphie

La succession stratigraphique étudiée s'étend du Jurassique inférieur au Crétacé supérieur, couvrant une large période géologique marquée par des changements paléoenvironnementaux significatifs. Cette séquence inclut plusieurs formations lithostratigraphiques distinctes, caractérisées par une diversité de faciès sédimentaires témoignant des variations des conditions de dépôt (Fig. 2-5). L'analyse détaillée de cette succession permet de mieux comprendre l'évolution paléogéographique et tectonique de la région, notamment en corrélant ces formations avec les principaux événements géodynamiques ayant affecté le domaine nord-africain au cours de cette période.

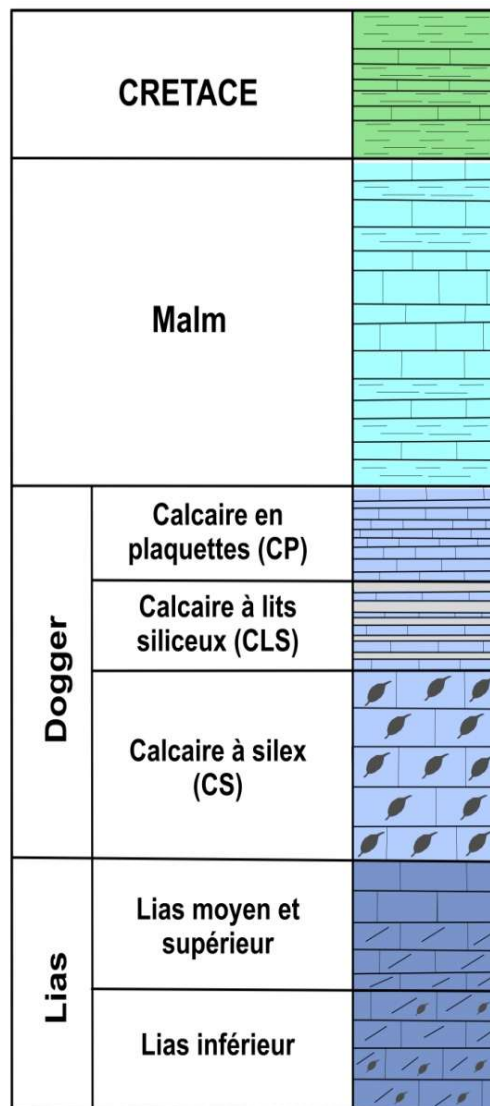


Figure 2.5. Colonne stratigraphique du massif de Rouina [59]

#### **4.4.2 Paléozoïque**

Dans la région d'étude, le substratum permo-triasique paléozoïque, connu sous le nom de série schisto-gréseuse et conglomératique, affleure à l'est du gisement. Cette formation, essentiellement composée de schistes et de quartzites, est mise en contact avec les argiles limonitiques par l'intermédiaire d'une brèche tectonique. La série présente un pendage vers l'ouest et une schistosité bien marquée, accompagnée de calco-schistes versicolores intensément fracturés, dont les fissures sont remplies de minéralisations ferrugineuses.

L'analyse pétrographique révèle une matrice de calcite fine, enrichie en inclusions de matière organique et renfermant de petits grains de quartz détritiques. On y observe également des fragments de feldspath altérés, notamment sous forme d'albite et de plagioclases, ainsi que des paillettes de muscovite et quelques cristaux de tourmaline. La structure de la calcite témoigne d'une orientation liée au métamorphisme, et les fractures qui la traversent sont remplies d'oxydes de fer, parcourues par de fines veinules de calcite limpide.

#### **4.4.3 Jurassique**

Le Jurassique constitue la majeure partie des affleurements observés à Rouina. Comme dans l'ensemble de l'Ouest Algérien, cette période est dominée par des formations carbonatées massives.

##### **a. Lias**

Le Lias repose en discordance sur le socle paléozoïque, marqué par une mince couche d'accumulation (quelques mètres) composée d'éléments de schistes gris clair et violacés. Cette interface illustre la transition entre les schistes paléozoïques et les calcaires jurassiques, bien que l'âge exact de cette formation demeure incertain. Un conglomérat de base est immédiatement surmonté par une puissante couche de calcaire grisâtre attribuée au Lias inférieur. À des niveaux plus élevés, des calcaires rougeâtres se distinguent par la présence, au microscope, de plages de calcite fine contenant des grains de quartz diagénetique et de calcite limpide plus grossière, parfois imprégnée de fer. Ces caractéristiques pétrographiques, associées aux structures diagénetiques et aux oxydes de fer remplissant les fractures, permettent d'attribuer cet horizon au Lias moyen.

##### **b. Dogger**

Le Dogger est représenté par une formation massive de calcaire gris bleuté, riche en nodules de silex, atteignant une épaisseur d'environ 50 mètres. L'étude microscopique menée par Kirreche met en évidence la présence de débris d'entrouques et de micro-filaments, caractéristiques des faciès du Dogger des régions telliennes. Ces observations permettent ainsi d'attribuer cette formation au Dogger [64].

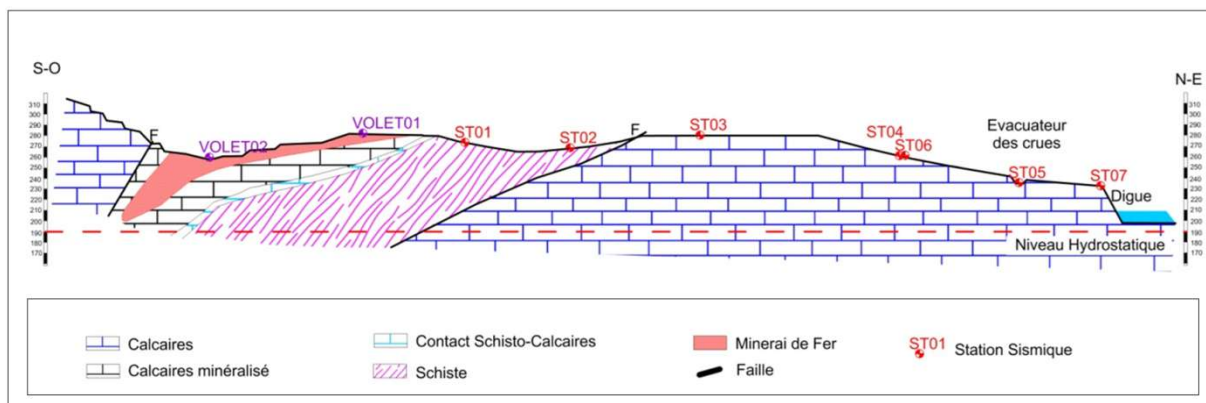
### c. Malm

Au-dessus de la série du Dogger, se développe une séquence calcaire et marno-calcaire en bancs de faible épaisseur, contenant des Calpionelles ainsi que des fragments d'Aptychus. La présence de ces microfossiles constitue un indicateur biostratigraphique fiable, permettant de dater cette formation du Tithonique-Berriasien.

#### 4.4.4 .Crétacé

À l'ouest de l'oued Rouina, un affleurement limité de marnes gris-vert a été observé au-dessus des calcaires jurassiques. Cet horizon marneux a été attribué au Crétacé supérieur en raison de ses caractéristiques lithologiques distinctives.

Les coupes stratigraphiques présentées ci-dessous (Figures 2-6 et 2-7) illustrent la succession des formations géologiques du flanc ouest de l'anticlinal de Rouina. Elles montrent une séquence évoluant depuis le socle paléozoïque, situé à l'est, jusqu'aux dépôts du Miocène supérieur, à l'ouest. Cette coupe traverse les formations jurassiques et crétacées, mais ne met pas en évidence le conglomérat de base qui marque la transition entre le socle et la couverture sédimentaire.



**Figure 2.6** Coupe Est-Ouest montrant le contact socle-couverture.

### 4.5. Tectonique du gisement

La tectonique de la région de Rouina, bien que faisant partie du cadre général des zones telliennes, présente une complexité plus marquée que celle observée dans les massifs voisins de Témoulga et de Doui. Son évolution polyphasée résulte principalement de deux grandes phases de plissements schistogènes, qui constituent l'ossature tectonique dominante du secteur. La première phase tectonique, survenue dans la gouttière du bassin du Chélif, a induit le développement d'une schistosité accompagnée d'un métamorphisme épizonal. Cette déformation s'est traduite par la formation de plis dissymétriques, dont le déversement est orienté vers le sud à sud-ouest. La seconde phase tectonique présente des caractéristiques

similaires, avec des flancs normaux longs et faiblement inclinés, tandis que les flancs inverses sont courts et présentent des pendages plus marqués. Ces deux épisodes de plissement sont également associés à des structures tectoniques planaires et linéaires.

Le massif de Rouina est structuré autour d'un vaste anticlinal, dont l'axe est orienté entre 30° et 40° NE. Cette structure est particulièrement affectée par un réseau de failles sur son flanc ouest, où l'on observe des dépôts minéralisés de calcite palissadique, de barytine, ainsi que des oxydes et hydroxydes de fer. Un métamorphisme localisé est visible au cœur de l'anticlinal, notamment dans les calcschistes (S1 N 30°, 40° SW) et dans les niveaux siliceux des calcaires du Lias et du Dogger. À l'échelle microscopique, cette déformation se manifeste par des foliations marquées dans la calcite fine et par des grains de quartz présentant une extinction roulante.

#### **4.5.1. Les Failles**

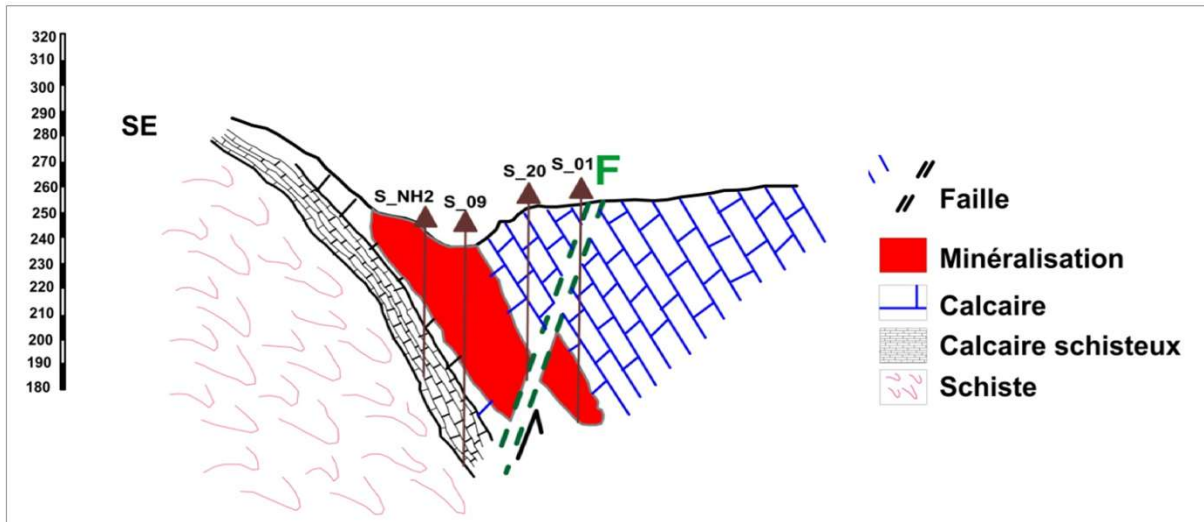
Les formations du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur du massif de Rouina sont intensément affectées par des failles, en particulier dans sa partie occidentale, où elles sont les plus fréquentes et les mieux exposées. Deux principaux types de failles ont été identifiés dans cette zone :

Failles de décrochement : elles sont orientées entre N40° et N60°, avec un mouvement dextre et des pitches variant entre 20° et 30° SW.

Failles normales : ces structures sont les plus répandues, avec une orientation comprise entre N0° et N10°. Des failles inverses sont également présentes, mais elles sont moins développées et plus discrètes.

#### **4.5.2. Les Fentes de Tension**

En complément des structures majeures, des fentes de tension ont été observées, bien qu'elles soient relativement peu nombreuses. Ces fractures, généralement remplies de calcite, présentent des dimensions variables, allant de quelques centimètres à plusieurs décimètres. Leur disposition et leur remplissage témoignent des contraintes tectoniques qui ont affecté le secteur au cours de son évolution géologique.



**Figure 2.7.** Coupe géologique montrant le rejet apparent d'une faille normale (ORGM 1992)

#### 4.6. Minéralisation

Le gisement de minerai de fer de Rouina est situé dans la commune portant le même nom, relevant de la daïra de Rouina, dans la wilaya de Aïn Defla, sur un terrain domanial.

L'essentiel des réserves en minerai de fer se trouve dans la partie inférieure des calcaires du Lias, localisée sur le flanc nord-ouest de l'anticlinal. La minéralisation est le résultat de la circulation de fluides hydrothermaux riches en minéraux à travers des zones de faiblesse tectonique, favorisant ainsi la précipitation du fer.

Le gisement est constitué de quatre corps minéralisés distincts, s'étendant sur un périmètre d'environ 1,5 km de long et 1,0 km de large, avec une orientation générale nord-est. Ces quatre corps, dénommés Ravin Sud, Zone Nord, Zone Filonienne et Merimet, se concentrent particulièrement dans la partie nord-est du district minier.

La minéralisation est strictement conditionnée par le contexte tectonique préexistant, qui a favorisé l'infiltration des solutions hydrothermales dans le milieu encaissant. Cette dynamique a conduit à la formation de filons et de colonnes minéralisées, notamment dans la Zone Filonienne.

L'amas principal de minerai, dont l'épaisseur peut atteindre 30 mètres, est associé à la zone tectonique Ravin Sud-Merimet. Les filons sont constitués de corps minéralisés irréguliers, dont l'épaisseur varie considérablement : certains se rétrécissent jusqu'à disparaître totalement (biseautage), tandis que d'autres présentent des gonflements pouvant atteindre 3 à 4 mètres en direction et en profondeur, conférant ainsi une disposition zonale à la minéralisation. La majorité des corps minéralisés est constituée d'une masse monominérale d'hématite.

Les processus de métasomatose hydrothermale ayant affecté la zone tectonique Ravin Sud-Merimet ont entraîné une dissolution quasi totale de l'oxyde de calcium et un enrichissement en fer et en silice. Dans les niveaux calcaires intensément broyés, il s'est formé des métasomatites ferro-siliceuses de teinte brun-noir, abritant une minéralisation composée essentiellement de goethite et d'hématite.

L'amas principal de minerai a été confirmé par des sondages jusqu'à une profondeur de 75 mètres, mettant en évidence une épaisseur atteignant 30 mètres, qui tend toutefois à s'amenuiser selon le pendage.

La goethite représente la phase minérale dominante des réserves, avec des concentrations irrégulières d'hématite. À proximité des zones de métasomatites, on distingue nettement une forte porosité résultant du lessivage hydrothermal ainsi que la présence de cavités tectoniques. D'un point de vue industriel, le minerai de fer extrait du gisement de Rouina, toutes qualités confondues, est essentiellement destiné à l'industrie cimentière. Il affiche une teneur moyenne en fer total de 40 à 41 %, correspondant à 57-58 % de  $Fe_2O_3$ .

Les réserves géologiques totales du gisement, actualisées en 2024, sont estimées à plus de 5,8 millions de tonnes (SOMIFER, 2024).

## **5. L'exploitation du gisement de Rouina**

En raison du relief montagneux caractérisant le gisement de Rouina, l'approche d'exploitation privilégiée repose sur une extraction à ciel ouvert, qui progresse de manière descendante. Cette mine est organisée en quatre zones principales, selon les données de SOMIFER (2024) :

Zone de Ravin Sud ; Zone Nord ; Zone Filonienne ; La Butte ; Zone de Merimet.

### **5.1. Exploitation à ciel ouvert**

L'exploitation à ciel ouvert s'applique à l'ensemble des zones du gisement de Rouina, à l'exception de la zone Merimet. Cette méthode a été mise en œuvre tant avant qu'après l'accession à l'indépendance. Actuellement, elle est favorisée sur l'ensemble du site en raison de son coefficient de découverte moyen de 2, qui assure une efficacité opérationnelle tout en garantissant des conditions de sécurité optimales pour les travailleurs.

Cependant, l'exploitation de la zone Merimet a été suspendue à cause de l'abondance des venues d'eau, nécessitant des opérations de pompage importantes. Cette situation a compromis la viabilité économique de cette zone, rendant les travaux d'extraction peu rentables.

## **5.2. Exploitation souterraine**

L'exploitation souterraine a principalement concerné la zone du Ravin Sud et la zone Filonienne entre 1912 et 1958. L'extraction dans cette zone a atteint une profondeur de 215 mètres. Des travaux complémentaires ont été effectués aux niveaux de +208 mètres et 196 mètres. Une cheminée d'extraction a été creusée pour transporter le minerai vers la surface, facilitant ainsi l'accès aux ressources.

Zone Filonienne : L'exploitation de cette zone remonte à l'époque coloniale, s'étendant entre les niveaux de +330 mètres et +270 mètres. Des vestiges des anciennes infrastructures minières subsistent encore, certains atteignant des profondeurs de 20 mètres, témoignant de l'activité intense qui y régnait.

Depuis la fin de la période coloniale, aucune extraction souterraine n'a été réalisée à Rouina. Cette situation peut être attribuée à plusieurs facteurs :

Absence de documentation : Il n'existe plus de schémas ni de plans d'exploitation datant de l'époque coloniale, ce qui complique la planification d'une reprise sécurisée des opérations souterraines. Ces documents sont essentiels pour garantir la sécurité des travailleurs et la rentabilité des opérations.

Préférences pour l'exploitation à ciel ouvert : La rentabilité accrue et les conditions de sécurité améliorées offertes par l'exploitation à ciel ouvert ont conduit à une adoption généralisée de cette méthode. En raison de son efficacité et de son rapport coût-bénéfice, l'exploitation à ciel ouvert s'est progressivement imposée comme la méthode de choix pour l'extraction des ressources du gisement de Rouina.

## **6. Conclusion**

La mine de Rouina, est l'une des plus anciennes exploitations minières d'Algérie, qui constitue une source cruciale de minerai de fer pour l'industrie cimentière locale. Le gisement, d'une étendue d'environ 9 km avec une teneur en fer total de 40 à 41 %, s'inscrit dans un contexte géostructural complexe marqué par la tectonique de la région du faciès atlas tellien. La minéralisation ferrifère, principalement localisée dans les calcaires du Lias sur le flanc nord-ouest de l'anticlinal, trouve son origine dans des processus hydrothermaux ayant exploité les discontinuités tectoniques du gisement.

La structuration du gisement en plusieurs zones distinctes (Filonienne, Zone Nord, Butte, Ravin Sud) reflète directement l'influence de la tectonique du gisement, avec une orientation préférentielle nord-est. À l'inverse, la zone de Merimet demeure inexploitée en raison de venues d'eau souterraine probablement contrôlées par ces mêmes structures tectoniques.

L'exploitation à ciel ouvert actuelle produit annuellement environ 200 000 tonnes de minerai. La révision en cours des paramètres d'abattage, notamment par une actualisation de l'étude sismique, vise à optimiser la charge explosive en tenant compte des contraintes structurales et de la proximité d'infrastructures sensibles en l'occurrence le barrage d'Ouled Mellouk, situé à environ 700 mètres du site minier.

La mine de Rouina représente ainsi un cas d'école où la compréhension du cadre géologique et de la tectonique du gisement est essentielle pour développer des pratiques d'exploitation durables, conciliant productivité économique et préservation des ressources naturelles dans ce contexte structural complexe.

# **CHAPITRE III**

## **Démarche Expérimentale**

## **1. Introduction**

L'utilisation d'explosifs pour les travaux d'ouverture et d'extraction à proximité de structures existantes soulève une problématique majeure : l'impact des vibrations induites sur l'intégrité des constructions avoisinantes. Si la maîtrise des vibrations générées par les tirs est possible grâce à des techniques de contrôle adaptées, il reste néanmoins préférable d'anticiper, dès la phase de conception, les niveaux vibratoires susceptibles d'être atteints. Cette prévision revêt une importance capitale non seulement pour garantir la sécurité des ouvrages et limiter les risques de dommages structurels, mais aussi pour optimiser la planification technique et économique des opérations. En effet, une estimation préalable des vibrations permet d'évaluer la nécessité de réduire la charge explosive par tir et, le cas échéant, de déterminer jusqu'à quelle valeur celle-ci peut être ajustée sans compromettre l'efficacité des travaux. Par ailleurs, elle permet de statuer sur l'exigence ou non d'une surveillance spécifique du site durant les opérations. Dans cette optique, des campagnes de mesure des vibrations ont été menées sur plusieurs chantiers impliquant les travaux de tirs afin d'identifier des relations empiriques permettant d'affiner ces prévisions et d'établir des recommandations adaptées aux conditions géotechniques et aux contraintes du site.

## **2. Les vibrations**

Lors d'un tir de mines, la mise à feu des charges explosives génère une onde vibratoire complexe qui se propage à travers le massif rocheux. L'intensité et la nature de cette onde sont influencées par plusieurs paramètres, notamment la Charge Unitaire Instantanée (CUI), qui correspond à la masse d'explosif mise à feu simultanément dans un laps de temps extrêmement court, généralement mesuré à la milliseconde près. La propagation des vibrations dépend également des caractéristiques géologiques du massif, telles que la nature lithologique des roches, la présence de discontinuités (failles, fractures, joints de stratification) et la structure du sous-sol, ainsi que de la distance qui sépare la zone de tir des infrastructures sensibles.

-L'onde vibratoire se décompose en trois composantes principales, qui influencent différemment la transmission de l'énergie dans le milieu :

-L'onde longitudinale (ou radiale) « R », qui se propage dans la direction de l'onde initiale et engendre des contraintes de compression et de dilatation successives.

-L'onde transversale « T », qui oscille perpendiculairement à la direction de propagation et génère des efforts de cisaillement pouvant affecter la stabilité des structures.

-L'onde verticale « V », qui agit perpendiculairement au sol et peut avoir un impact significatif sur les ouvrages environnants.

L'évaluation des vibrations générées par un tir est réalisée à l'aide de sismographes, qui enregistrent la vitesse particulière (exprimée en mm/s) et la fréquence du signal (exprimée en Hz) sur ces trois axes. L'analyse conjointe de ces paramètres permet de calculer une vitesse particulière pondérée, indicateur clé utilisé pour quantifier l'impact global des vibrations sur les structures environnantes et déterminer si elles restent dans des seuils acceptables.

En l'absence de réglementation spécifique en Algérie, les niveaux vibratoires mesurés doivent être comparés aux seuils établis par les normes internationales. Ces valeurs limites varient en fonction de plusieurs critères, notamment le type de construction et sa sensibilité aux vibrations, ainsi que la fréquence dominante des ondes affectant la structure. Une analyse rigoureuse de ces paramètres est essentielle pour garantir la sécurité des infrastructures situées à proximité des tirs et pour adapter les charges explosives en fonction des contraintes du site.

### **3. Réglementation et normalisation des vibrations**

La réglementation encadrant les vibrations générées par les tirs de mines dans les carrières repose sur des textes réglementaires et des normes techniques visant à limiter les nuisances et à prévenir d'éventuels dommages aux infrastructures environnantes. Plusieurs référentiels internationaux établissent des seuils et des méthodologies de mesure, permettant une harmonisation des pratiques en matière de surveillance et de contrôle des vibrations industrielles.

En France, l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994, accompagné de sa circulaire d'application du 2 juillet 1996, définit les limites admissibles des vibrations en carrières, en tenant compte à la fois du risque de dégradation des structures et du niveau de nuisance perçu. De plus, la circulaire du 23 juillet 1986 précise les seuils réglementaires applicables aux vibrations d'origine industrielle, renforçant ainsi le cadre normatif en vigueur.

Au niveau international, plusieurs organismes ont établi des normes de référence pour l'évaluation et la maîtrise des vibrations. Aux États-Unis, l'United States Bureau of Mines (USBM) a publié en mars 2017 un ensemble de directives visant à encadrer les vibrations issues des activités minières et à protéger les bâtiments sensibles. Par ailleurs, dans le domaine ferroviaire, l'instruction normalisée SNCF IN1226 est applicable aux infrastructures situées à proximité des voies ferrées, offrant un cadre méthodologique pour l'analyse des effets vibratoires sur les ouvrages voisins. En complément, la norme française NF E 90020 du 26 septembre 2015 définit les protocoles techniques de mesure des vibrations, garantissant une approche rigoureuse et reproductible lors des campagnes de surveillance.

L'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 établit des seuils de vibration au-delà desquels un risque de dommages structurels peut apparaître, tout en tenant compte du caractère temporaire des impacts liés aux tirs de mines. Il précise notamment que :

Pour des fréquences comprises entre 1 et 5 Hz, la vitesse particulière maximale admissible est de 10 mm/s, correspondant à un déplacement de 320  $\mu\text{m}$ .

Entre 5 et 30 Hz, la limite reste fixée à 10 mm/s.

Pour des fréquences élevées, de 30 à 80 Hz, la vitesse autorisée est également de 10 mm/s, avec un déplacement réduit à 50  $\mu\text{m}$ .

Ces valeurs ne constituent pas des seuils de perception sensorielle des vibrations, mais bien des limites définies pour prévenir des effets structuraux sur les bâtiments. Pour les sources vibratoires impulsionnelles isolées, comme les tirs de mines, il n'existe pas de seuil spécifique de gêne, mais plutôt des niveaux considérés comme tolérables en raison de la courte durée d'exposition. Ainsi, l'arrêté établit une limite de 10 mm/s pour les structures habitées, tout en permettant des valeurs plus élevées pour d'autres types de constructions moins sensibles.

Afin d'assurer une meilleure interprétation des données sismiques, la réglementation impose que la vitesse particulière pondérée soit mesurée sur les trois composantes de l'onde sismique (longitudinale, transversale et verticale). Cette pondération repose sur une courbe continue définie par des points caractéristiques, tels que ceux indiqués dans le tableau 3.1, permettant ainsi d'adapter les seuils vibratoires aux différentes gammes de fréquences. Plutôt que d'appliquer une pondération directe sur le signal enregistré, il est également possible de définir des vitesses particulières limites spécifiques en fonction des bandes fréquentielles, optimisant ainsi l'analyse des vibrations générées par les tirs de mines.

**Table 3.1.** Norme française (NF E 90020 - 2015) Valeurs de pondération du signal de la bande fréquentielle

Bande de fréquence en Hz	Pondération du signal	Vitesse limite (mm/s)
1	5	2
5	1	10
30	1	10
80	3/8	26,7

#### **Norme américaine -USBM du 09/03/2017**

L'United States Bureau of Mines (USBM) a joué un rôle clé dans l'étude des effets des tirs de mines sur l'environnement en développant des référentiels largement adoptés par de nombreux pays. Grâce à des recherches approfondies sur les phénomènes vibratoires liés aux

sautages, l'USBM a établi des normes de référence qui servent aujourd'hui de base à la réglementation internationale.

L'une des avancées majeures de ces études réside dans l'introduction du concept d'amplitude des vibrations, permettant une évaluation plus précise de l'impact des ondes sismiques sur les structures. L'USBM a ainsi démontré que la vitesse particulaire maximale admissible devait être ajustée en fonction de la fréquence des vibrations. Pour des fréquences inférieures à 40 Hz, cette vitesse diminue progressivement afin de limiter les risques de dommages aux bâtiments et aux infrastructures sensibles.

Selon le type de structure concerné, les seuils définis varient :

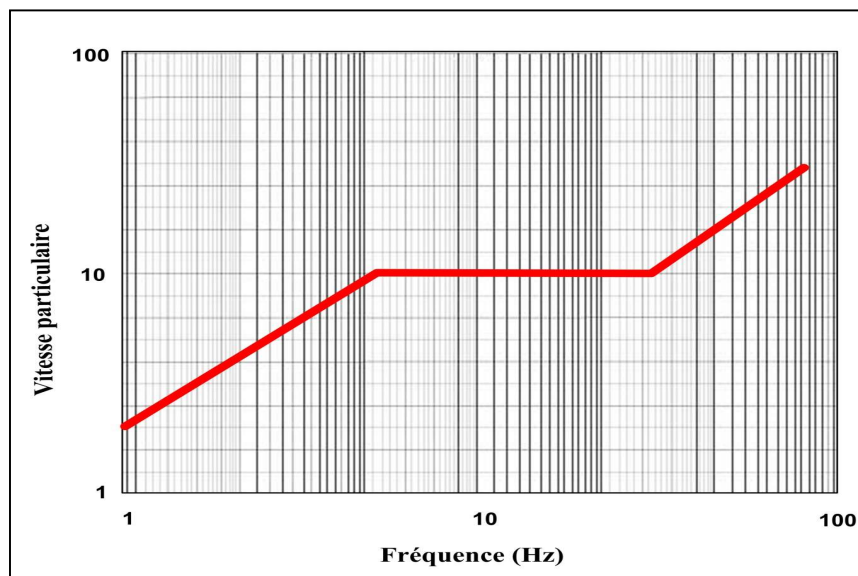
Certaines constructions peuvent tolérer une vitesse particulaire allant jusqu'à 19 mm/s.

D'autres, plus vulnérables, ont une limite fixée à 12,7 mm/s.

Ces seuils, présentés en détail dans le tableau ci-dessous, illustrent l'importance de prendre en compte la nature des structures exposées afin d'adapter les critères d'évaluation des vibrations issues des tirs de mines :

**Tableau 3.2.** Normes de l'USBM

Type de structures	Limite des vibrations maximales	
	Fréquence < 40 Hz	Fréquence > 40 Hz
Maison moderne et structures en mur sec	19 mm/s	50,8 mm/s
Vieilles maisons avec mur de plâtre	12,7 mm/s	50,8 mm/s



**Figure 3.1.** La vitesse particulaire pour un signal mono fréquentiel - Arrêté du 22 septembre 1994

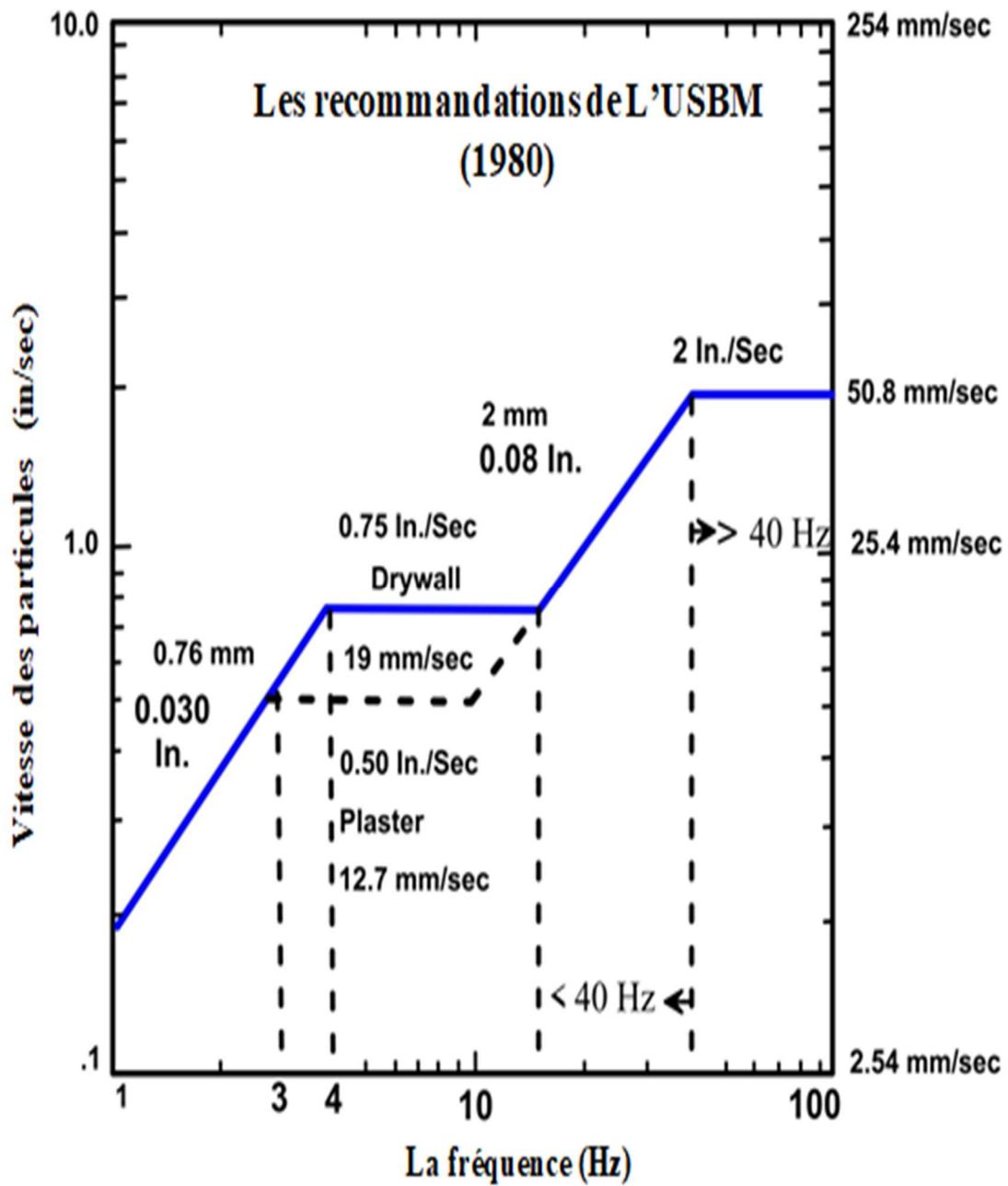


Figure 3.2. La vitesse particulaire suivant la Normes de l'USBM

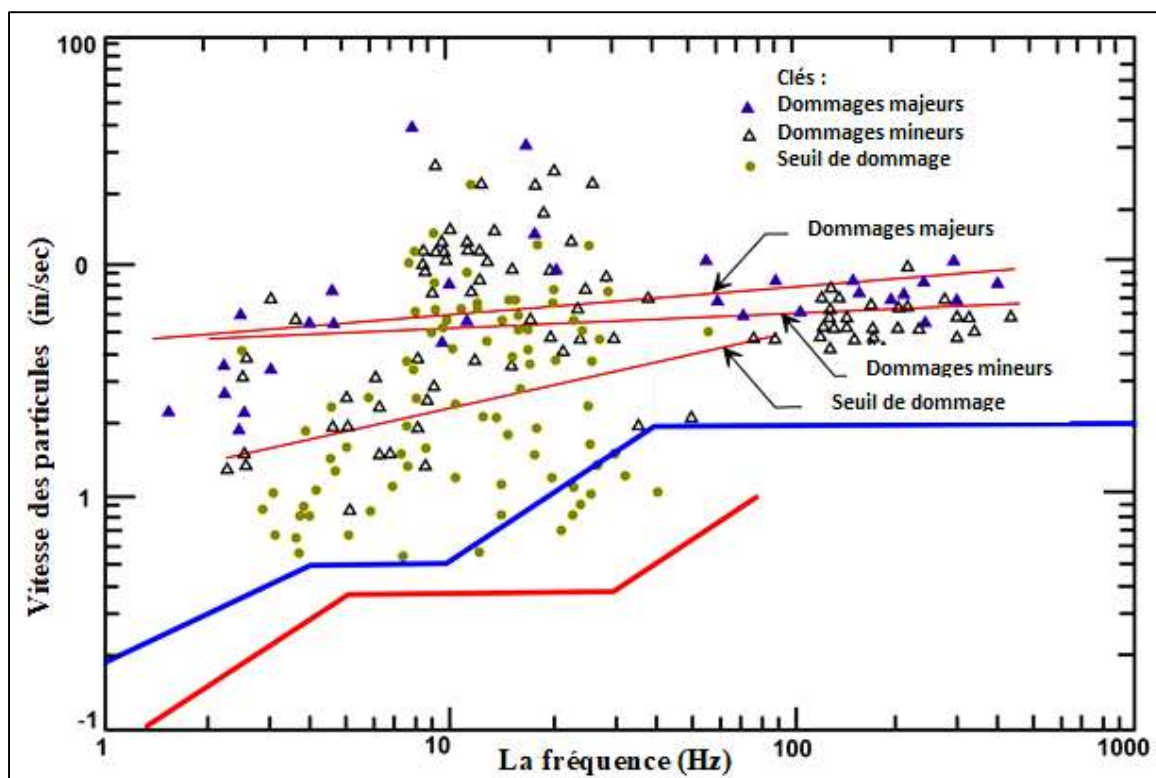


Figure 3.3. Comparaisons européennes et américaines-1

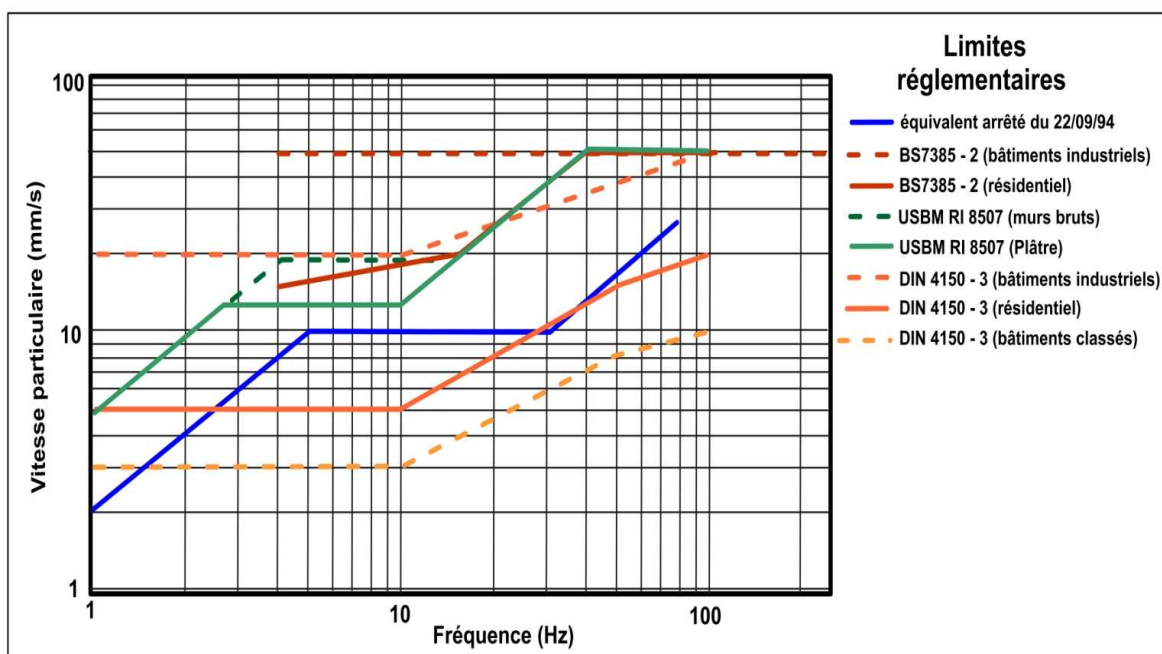


Figure 3.4. Limites réglementaires des vitesses, pour différentes structures

### **Circulaire du 23 juillet 1986 (France)**

La circulaire ministérielle du 23 juillet 1986 constitue une référence en matière de réglementation des vibrations industrielles en France. Elle fixe des seuils au-delà desquels les vibrations générées par des sources mécaniques, telles que les engins de chantier ou les installations industrielles, sont susceptibles d'entraîner des dommages aux structures avoisinantes.

L'expérience terrain a montré que la perception des vibrations et le niveau de gêne ressentie varient selon la durée d'exposition. Ainsi, la probabilité d'apparition de plaintes augmente dans les cas suivants :

Pour des chantiers de courte durée (quelques jours), lorsque les vibrations atteignent des niveaux proches des seuils de dommages définis par la circulaire.

Pour des chantiers de plusieurs mois, dès que les niveaux vibratoires atteignent 1 à 2 mm/s, en fonction de la fréquence.

Pour des travaux de longue durée (plus de six mois), dès que les vibrations dépassent 0,5 mm/s, avec une intensification progressive des plaintes, indépendamment du niveau exact des vibrations.

### **Instruction normalisée SNCF IN1226 (01/09/2009)**

Cette instruction, mise en place par la SNCF, vise à protéger les infrastructures ferroviaires contre les effets des vibrations causées par l'utilisation d'explosifs ou de puissants engins mécaniques. Elle s'applique notamment aux :

Travaux de terrassement et à l'exploitation de carrières.

Opérations de creusement et d'abattage.

Travaux de démolition.

Utilisations spécifiques d'explosifs dans le cadre de travaux spéciaux.

### **Norme NF E 90020 (26/09/2015) : Vibrations et chocs mécaniques**

Cette norme définit les méthodes de mesure et d'évaluation des vibrations ayant un impact sur les structures et les personnes. Elle se divise en trois parties :

Analyse de la réponse des structures aux vibrations générées par des activités humaines.

Évaluation des vibrations dans les installations sensibles, situées à l'intérieur ou à proximité des structures concernées.

Évaluation des nuisances vibratoires pour les occupants (habitants, travailleurs ou personnes de passage).

Ces cadres réglementaires permettent d'encadrer et de limiter l'impact des vibrations issues des activités industrielles et de travaux publics, en veillant à la préservation des infrastructures et au confort des riverains.

#### **4. Méthodologie**

L'étude des vibrations induites par les tirs à l'explosif dans un massif rocheux est une tâche complexe en raison de la multiplicité des paramètres en jeu. Certains facteurs, comme la structure géologique du massif, échappent à tout contrôle, tandis que d'autres interagissent de manière non linéaire. Ces contraintes rendent difficile la mise en place d'expériences contrôlées en conditions réelles, où la modification d'un paramètre tout en maintenant les autres constants est souvent irréalisable.

Cependant, notre étude s'appuie sur un site expérimental présentant une configuration géologique bien définie, ce qui constitue un atout méthodologique. Ce site se situe dans une zone structurale autochtone du Chélif, caractérisée par un relief montagneux accidenté et affectée par des discontinuités géologiques. Les formations prédominantes sont d'âge paléozoïque et comprennent la série schisto-gréseuse et conglomératique du Paléozoïque. Dans ce contexte géologique particulier, nous avons focalisé notre étude sur les paramètres contrôlables des tirs à l'explosif, avec un accent particulier sur les observations de terrain plutôt que sur les approches purement théoriques.

##### **Approche expérimentale et paramètres d'analyse**

L'expérimentation a été guidée par une analyse détaillée des signaux vibratoires issus des tirs, en considérant plusieurs paramètres clés :

Le mouvement particulière, qui décrit le déplacement d'un point du massif sous l'effet du passage de l'onde. Il est quantifié par la vitesse particulière, généralement de l'ordre de quelques mm/s.

Le front d'onde, représentant l'ensemble des points atteints simultanément par l'onde. Sa propagation dépend des propriétés mécaniques du milieu et de la position de la source explosive.

Le coefficient d'amortissement ( $K$ ), qui caractérise la capacité du massif à atténuer les vibrations.

La vitesse particulière subit une atténuation rapide lors de la propagation de l'onde, en raison de la dissipation de l'énergie vibratoire dans le milieu rocheux. Il est bien établi que l'intensité des vibrations est directement proportionnelle à la charge unitaire d'explosif utilisée. Ainsi, la vitesse particulière maximale constitue un indicateur clé pour caractériser les vibrations générées par un tir de mine.

## Acquisition et traitement des signaux vibratoires

L'étude des vibrations induites par les tirs repose sur l'enregistrement des signaux sismiques dans trois directions orthogonales :

Radiale (dans l'axe de propagation de l'onde).

Transversale (perpendiculaire à la direction de propagation).

Verticale (composante verticale du mouvement vibratoire).

Les principales grandeurs mesurées et analysées sont :

La vitesse maximale enregistrée dans chaque direction.

La vitesse résultante (ISO20816-1), obtenue par la somme vectorielle des vitesses maximales dans chaque direction :

$$V_{res} = \sqrt{V_{xMAX}^2 + V_{yMAX}^2 + V_{zMAX}^2} \quad (\text{Eq.3.1})$$

Les vitesses maximales dans chaque direction ne sont généralement pas synchrones, ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

La vitesse résultante réelle, définie comme la valeur maximale atteinte par la vitesse résultante au cours du temps :

$$V_{resVRAIE} = \text{MAX}(V_{VRAIE}) \quad (\text{Eq.3.2})$$

## Analyse fréquentielle du signal vibratoire

L'analyse fréquentielle est essentielle pour comprendre l'impact des vibrations, notamment sur les structures environnantes. Deux paramètres clés sont étudiés :

La pseudo-fréquence, qui est calculée à partir du temps de montée du pic de vitesse maximale. Cette mesure est toutefois d'une portée limitée, car elle ne reflète pas directement le spectre fréquentiel réel du signal.

La fréquence dominante dans le spectre de Fourier, qui constitue l'indicateur le plus représentatif du contenu énergétique du signal vibratoire.

Il est important de souligner que le contenu fréquentiel des vibrations est fortement influencé par plusieurs facteurs, notamment :

La nature du massif rocheux (présence de fractures, lithologie, homogénéité).

Les conditions de transmission des vibrations aux structures environnantes, qui peuvent entraîner des phénomènes de résonance ou d'amplification locale.

#### **4.1. Acquisition des données vibratoires**

L'enregistrement des données vibratoires repose sur l'utilisation d'un capteur sismique spécialement conçu pour détecter et mesurer les oscillations du sol. Ce capteur transforme les mouvements mécaniques en signaux électriques, qui sont ensuite traités et stockés pour une analyse approfondie. La précision des mesures dépend largement des conditions d'installation du capteur. Un couplage inadéquat avec le sol, qu'il résulte d'un scellement insuffisant ou d'une simple pose en surface, peut introduire des distorsions dans les signaux enregistrés. Ces anomalies peuvent notamment se traduire par une amplification artificielle des vibrations, faussant ainsi l'interprétation des résultats.

Afin de garantir une acquisition fiable et représentative, il est essentiel de respecter les bonnes pratiques en matière de positionnement et d'orientation du capteur. Celui-ci doit être installé dans les directions principales de la structure étudiée et placé à proximité des éléments porteurs, là où les vibrations sont les plus significatives. Cette disposition permet de recueillir des données exploitables pour l'évaluation des effets vibratoires sur les infrastructures.

L'analyse des mesures obtenues repose sur leur comparaison avec les normes et réglementations en vigueur, lesquelles définissent les seuils admissibles de vibrations en fonction du type de structure et de son usage. Le respect de ces normes est crucial pour évaluer l'impact des vibrations sur la stabilité des bâtiments et la sécurité des occupants. Une instrumentation et un positionnement rigoureux du capteur permettent ainsi de garantir la fiabilité des résultats et d'optimiser l'interprétation des phénomènes vibratoires observés.

#### **4.2. Analyse et Fiabilité des Données Vibratoires Issues des Tirs en Carrière - Enregistrement, Estimation des Distances et Traitement des Vitesses**

Les tirs effectués dans la carrière ont donné lieu à un enregistrement systématique des données vibratoires grâce à l'utilisation du capteur Miniseis. Ces enregistrements sont conservés dans une base de données détaillée, intégrant des paramètres tels que la position du capteur, la distance estimée entre celui-ci et le point de tir, la charge unitaire maximale utilisée, ainsi que la localisation exacte du tir. Les données collectées couvrent une période allant de 2002 à 2007, bien que certaines années, notamment 2005, présentent des lacunes attribuables à des défaillances techniques ou à l'absence d'enregistrements.

Concernant la distance entre le capteur et le tir, celle indiquée dans la base de données résulte généralement d'une estimation réalisée sur le terrain par le personnel de la carrière, plutôt que d'une mesure précise obtenue par des moyens géodésiques tels qu'un GPS. Cette approximation peut induire des écarts significatifs. Par exemple, pour le tir n°3, la distance avait été estimée à

300 mètres alors qu'une mesure GPS a révélé une distance réelle de 430 mètres. Cette tendance à la sous-estimation peut affecter l'analyse des résultats vibratoires et nécessiter des corrections. Une approche plus rigoureuse consiste à recalculer la distance effective à partir des enregistrements sismiques et acoustiques, en exploitant le différentiel de temps entre l'arrivée des ondes sonores et sismiques. Cette méthode repose sur les vitesses de propagation des ondes dans le sol et l'air, permettant ainsi une estimation plus fiable de la distance entre le point de tir et le capteur.

Les vitesses enregistrées dans la base de données correspondent aux vitesses maximales observées sur les trois axes de mesure : radiale, verticale et transversale. Certaines valeurs ont été ajustées en appliquant une pondération réglementaire qui accorde un poids plus important aux fréquences basses, ces dernières étant considérées comme plus dommageables pour les structures. Cependant, dans une démarche d'analyse scientifique plus approfondie des vibrations, il est recommandé d'utiliser les vitesses brutes non corrigées, afin d'éviter toute altération des signaux d'origine. Une solution plus appropriée consiste à calculer la vitesse résultante dans les trois directions, ce qui permet d'obtenir une représentation plus fidèle de l'intensité réelle du mouvement vibratoire.

L'un des aspects influant sur la qualité des enregistrements est le scellement du capteur. Dans cette étude, les mesures sismiques ont été réalisées avec un capteur non scellé, ce qui peut entraîner une amplification artificielle des signaux due à un mauvais couplage entre l'instrument et la surface d'appui. Une telle configuration peut introduire des incertitudes dans les données, affectant potentiellement leur exploitation dans des analyses précises. Malgré ces limites, les enregistrements obtenus restent exploitables pour une première évaluation des niveaux vibratoires et permettent d'identifier les tendances générales des effets dynamiques générés par les tirs de mines. Une amélioration des conditions d'acquisition, notamment par l'optimisation du couplage capteur-sol, permettrait d'affiner la fiabilité des mesures et d'améliorer l'interprétation des résultats..

#### **4.3. Prévision des vibrations générées par un tir**

Des modèles empiriques ont été élaborés afin d'anticiper l'amplitude des vibrations induites par les tirs de mine. Ces modèles reposent sur des relations mathématiques dérivées de l'équation de Chapot, dont l'expression générale prend la forme suivante : Hunt, R. E., and Stone, W. B. (1983)

$$V_{res} = K \times D^{-\alpha} \times Q^{\beta} \quad (\text{Eq.3.3})$$

Dans cette équation :

$V_{res}$  : la vitesse résultante des vibrations,

$D$  : la distance entre le tir et le capteur,

$Q$  : la charge unitaire maximale,

$K$  : un coefficient prenant en compte la nature du massif,

$\alpha, \beta$ : coefficients empiriques déterminés par régression.

L'une des formes les plus utilisées de cette loi est celle de Chapot, qui est :

$$V = K \cdot \left[ \frac{D}{\sqrt{Q_i}} \right]^{-1,8} ; \text{ mm/s} \quad (\text{Eq.3.4})$$

Les valeurs du paramètre  $K$  sont variables et dépendent principalement de la qualité du massif rocheux dans lequel les tirs sont réalisés. Une meilleure connaissance de ces paramètres permet d'affiner les prévisions de propagation des ondes sismiques et de mieux évaluer les effets des tirs sur l'environnement et les infrastructures situées à proximité.

Afin de répondre aux interrogations soulevées dans cette étude, un programme d'essais a été mis en place avec des objectifs précis. L'un des enjeux majeurs consiste à analyser les impacts dynamiques induits par les explosions sur les structures du barrage, notamment l'évacuateur de crue et la galerie. À cet effet, un dispositif d'instrumentation a été conçu et déployé, impliquant l'installation de cinq accélérographes de type ETNA et de deux sismographes de type K2. Ce réseau de capteurs permet d'assurer un enregistrement précis des mouvements vibratoires engendrés par l'explosion d'une charge totale de 500 kg, répartie en deux séquences de 250 kg chacune, avec une charge instantanée de 20 kg.

L'une des étapes clés de cette étude repose sur l'enregistrement des mouvements en champ libre. Cette approche vise à caractériser de manière détaillée les explosions en tenant compte de paramètres fondamentaux tels que la fréquence des vibrations générées, l'amplitude maximale des ondes et la durée des secousses observées. Ces données sont essentielles pour mieux comprendre les mécanismes de propagation des vibrations dans le sol et leur interaction avec les structures avoisinantes.

Un autre aspect important de cette recherche concerne l'analyse du phénomène d'atténuation des vibrations entre la source d'explosion et les différents points de mesure. Cette étude permettra d'établir une corrélation entre la vitesse vibratoire mesurée et les valeurs seuils réglementaires définies pour la protection des infrastructures sensibles. La comparaison entre les vitesses enregistrées et les limites imposées par les normes en vigueur est essentielle pour évaluer le risque potentiel associé aux tirs et, si nécessaire, ajuster les paramètres d'exploitation afin de minimiser les effets indésirables sur les structures existantes.

En combinant ces différentes approches expérimentales et analytiques, cette étude vise à mieux appréhender les phénomènes vibratoires liés aux tirs de mine et à optimiser les méthodes de prévision et de contrôle des impacts sur l'environnement et les ouvrages d'ingénierie.

#### 4.4. Localisation des mesures de vibrations

L'expérience est effectuée en deux (02) volets pour étudier l'impact des vibrations sur le site de Rouina (champ libre et les structures du barrage de Ouled Mellouk : commune de Rouina, W Ain Defla) distante de 700m de la source d'explosion (fig. 3-5).

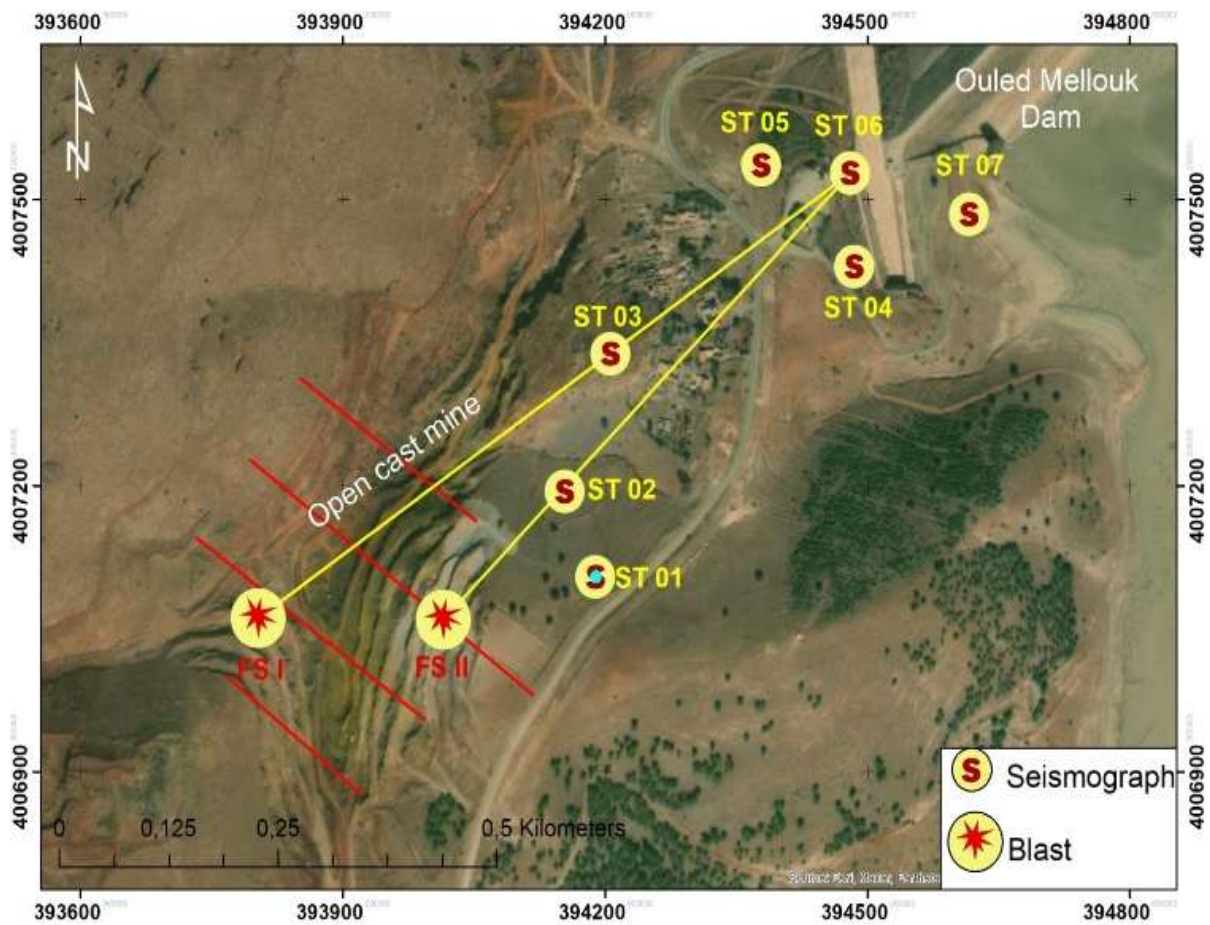


Figure 3.5. Position des sources de tir et des dispositifs d'acquisition sur le terrain

Les distances des stations d'enregistrement par rapport aux deux (02) sources d'explosions sont données dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3** coordonnées géographiques des stations d'enregistrement

Station	Distance par rapport à la source 1 volet 1 (m)	Distance par rapport à la source 2 Volet 2 (m)
ST1 (ETNA)	100	275
ST2 (ETNA)	200	360
ST3 (ETNA)	350	460
ST4 (ETNA)	540	650
ST5 (ETNA)	630	760
ST6 (ETNA)	540	650
ST7 (ETNA)	700	840

- Un accélérographe (ST1) en champ libre situé au Sud-Ouest des deux sources.
  - Un accélérographe (ST2) en champ libre situé au Sud-Ouest des deux sources.
  - Un accélérographe (ST3) en champ libre (au voisinage des habitations) situé au Sud-Ouest des deux sources.
  - Un accélérographe (ST4) en champ libre (au voisinage des logements de l'ANBT du barrage de Ouled Mellouk) situé au Sud-Ouest des deux sources.
  - Un accélérographe (ST5) sur l'axe de l'évacuateur de Crue situé au Sud-Ouest des deux sources.
  - Un sismographe (ST6) en champ libre (au voisinage des logements de l'ANBT du barrage d'Ouled Mellouk) situé au Sud-ouest des deux sources.
- Un sismographe (ST7) sur la rive gauche du barrage d'Ouled Mellouk à l'entrée de la galerie situé au Sud-Ouest des deux sources.

## **5. Appareils d'enregistrement :**

Le réseau est composé de cinq (05) accélérographes triaxiaux de type ETNA et de deux (02) sismographes composées d'un capteur triaxial de type LE-3Dlite (modèle LENNARTZ) et un digitaliseur de type K2.

Les caractéristiques et les paramètres de calibration peuvent être résumés comme suit :

### **Accélérographe ETNA**

Ces accélérographes sont de type numérique et présentent les caractéristiques techniques suivantes :

- Fréquences naturelles des accéléromètres: 200 Hz
- Amortissement critique: 0.700
- Enregistrement sur carte PCMCIA de 16 Mo

Paramètres de calibration:

Seuil de déclenchement : Les accéléromètres ont été calibrés pour un seuil minimum de déclenchement de 1/1000e de g. Il est à noter que dans le domaine du génie parasismique, les accélérations inférieures à 5/100e de g sont considérées négligeables et sans effet sur les structures.

Echantillonnage : Le pas d'échantillonnage est choisi égale à  $\Delta t = 0.004$  s (250 enregistrements par seconde). Ce choix permet d'enregistrer aussi les hautes fréquences induites par les explosions.

Orientation : Accéléromètre longitudinal suivant la direction longitudinale du tir.

- Accéléromètre transversal suivant la direction transversale du tir.
- Accéléromètre vertical

Ces accélérographes de type ETNA présentent un support d'enregistrement de type fichier numérique, qui ne nécessite pas des opérations spéciales au préalable et sont directement utilisables.

### **Sismographe K2**

Ces sismographes sont de type numérique, présentent les caractéristiques techniques suivantes:

- Fréquences naturelles des capteurs : 1 Hz
- Amortissement critique: 0.707
- Enregistrement sur carte PCMCIA de 64 Mo

Paramètres de calibration:

Seuil de déclenchement : Les capteurs ont été calibrés pour un déclenchement en STA/LTA (short time average/ long time average) pour éviter la saturation des capteurs.

Orientation :

- Capteur longitudinal suivant la direction longitudinale du tir
- Capteur transversal suivant la direction transversale du tir
- Capteur vertical

## **6. Résultats et enregistrements**

Une fois la mise en place et la vérification du bon fonctionnement des instruments de mesure achevées, les opérations de tir ont été réalisées conformément aux paramètres établis. L'explosion de la charge totale de 500 kg, répartie en deux séquences de 250 kg chacune avec

une charge instantanée de 20 kg, a été exécutée dans des conditions contrôlées afin d'assurer une acquisition fiable des données vibratoires.

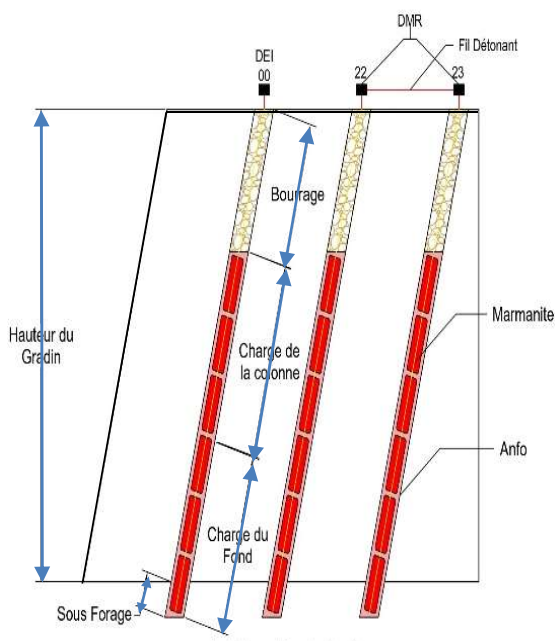
Les enregistrements des événements ont été effectués à l'aide des stations de mesure déployées sur le site. Toutefois, il est à noter que pour le second volet des tirs, les stations 3, 4 et 5 n'ont pas enregistré de données exploitables, ce qui pourrait être attribué à des interférences techniques ou à des conditions locales affectant la transmission des signaux sismiques. Les valeurs maximales des vitesses mesurées ont été compilées et résumées dans le tableau (2), offrant ainsi une vision globale de l'intensité des vibrations générées par les explosions.

L'analyse des vitesses maximales enregistrées a permis d'effectuer une comparaison avec les seuils réglementaires établis par les normes internationales. Ces seuils varient en fonction du type de construction concerné ainsi que de la fréquence des vibrations générées par les explosions. Il est essentiel de confronter les résultats obtenus aux valeurs limites préconisées afin d'évaluer l'impact potentiel des tirs sur les infrastructures environnantes et d'anticiper d'éventuelles mesures d'atténuation si nécessaire.

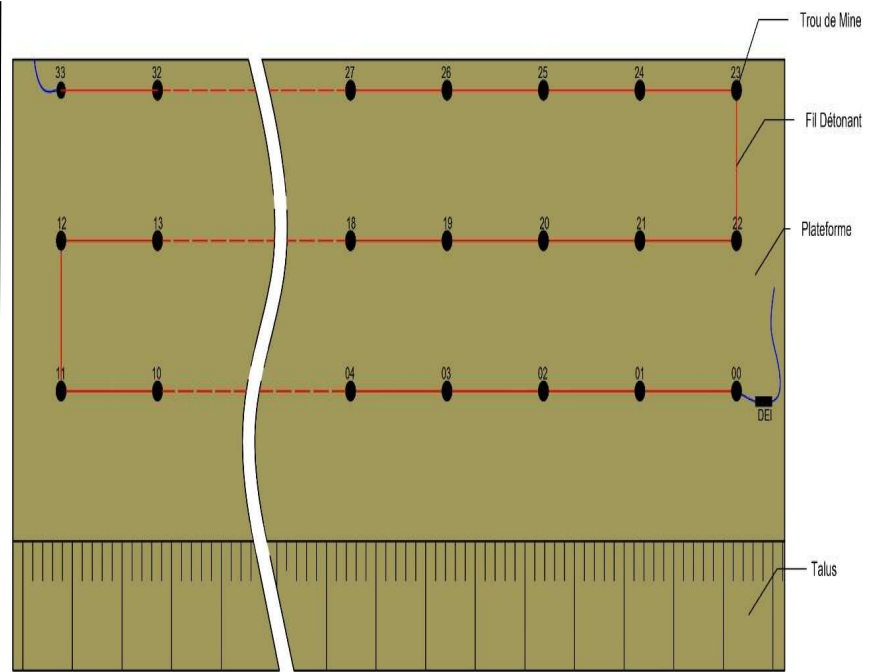
Le tableau (3.4) présente une synthèse détaillée des valeurs maximales des vitesses enregistrées aux différentes stations de mesure, en prenant en compte les trois directions principales : longitudinale, transversale et verticale. Cette approche tridimensionnelle permet d'affiner l'interprétation des données et de mieux comprendre la propagation des ondes vibratoires dans le massif rocheux.

L'examen des résultats met en évidence des variations significatives des amplitudes vibratoires en fonction des paramètres géotechniques du site et des conditions spécifiques de mise en œuvre des charges explosives. Ces disparités peuvent être influencées par divers facteurs tels que la nature du massif rocheux, la distance entre le point d'explosion et les capteurs, ainsi que les caractéristiques intrinsèques des charges utilisées. L'étude de ces paramètres permet non seulement d'améliorer les prévisions sur la propagation des vibrations, mais aussi d'optimiser les techniques de tir pour minimiser les impacts sur les structures sensibles.

Enfin, la confrontation des données mesurées avec les standards internationaux constitue une étape clé dans l'évaluation de la conformité des opérations de tir. Cette comparaison permet de déterminer si les niveaux vibratoires générés restent dans des marges acceptables ou s'ils nécessitent des ajustements afin de garantir la sécurité des infrastructures situées à proximité. L'ensemble des observations et des analyses issues de cette étude contribue à une meilleure compréhension des phénomènes vibratoires induits par les explosions et à l'amélioration des stratégies de gestion et de contrôle des tirs en milieu sensible.



**Plan de tir-mine de Rouina**



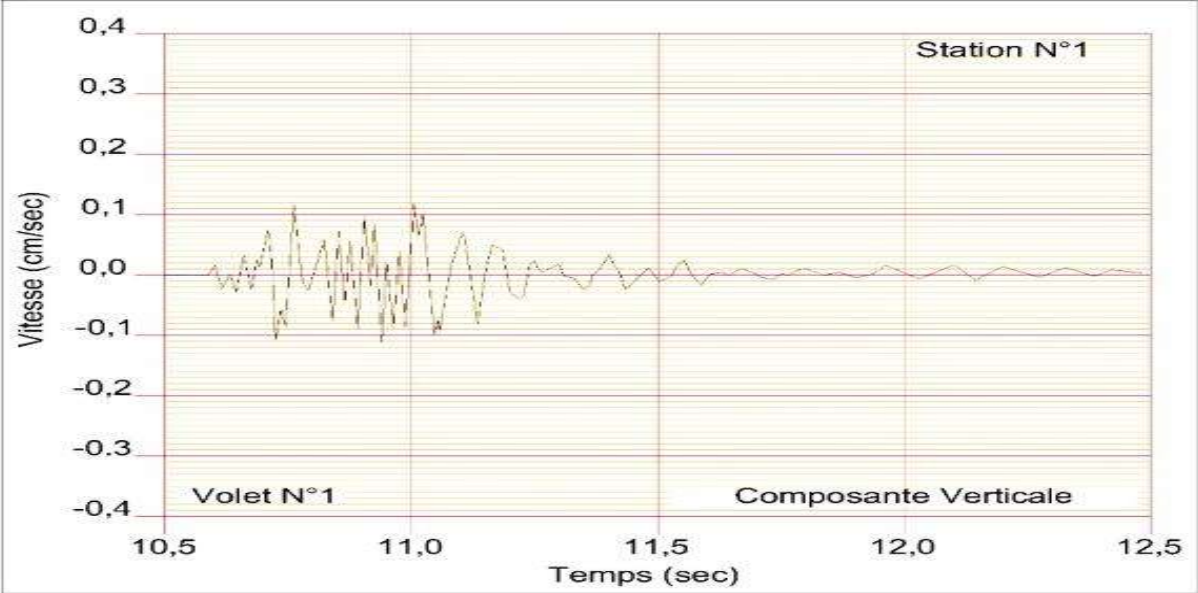
**Schéma de connexion-mine de Rouina**

**Tableau 3.4 .** Valeurs maximales des vitesses suivant les trois (03) directions au niveau des stations d'enregistrement données en mm/s.

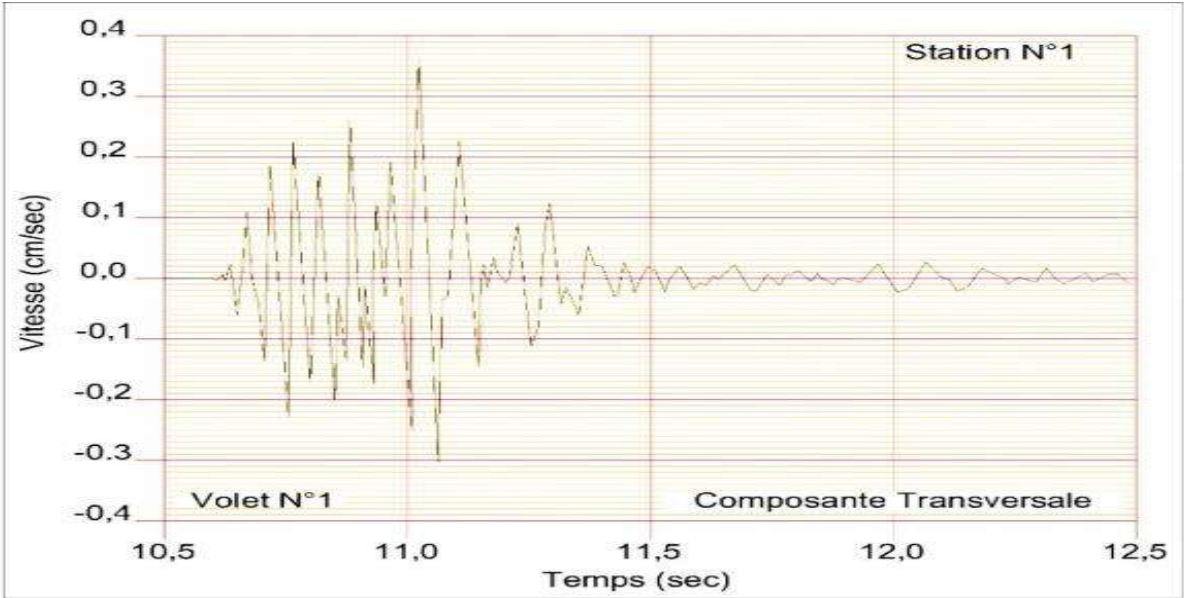
**Volet N°1**

Station	Distance (m)	V. Long. (mm/s)	V. Tran. (mm/s)	V.Ver (mm/s)	Vmax (mm/s)	K
ST1	100	2.72	3.61	1.18	3,61	969,57
ST2	200	0.46	0.42	0.40	0,46	430,21
ST3	350	0.32	0.30	0.12	0,32	768,28
ST4	540	-	-	-		
ST5	630	0.09	0.09	0.07	0,09	503,07
ST6	540	-	-	-		
ST7	700	0.05	0.05	0.04	0,05	445,88

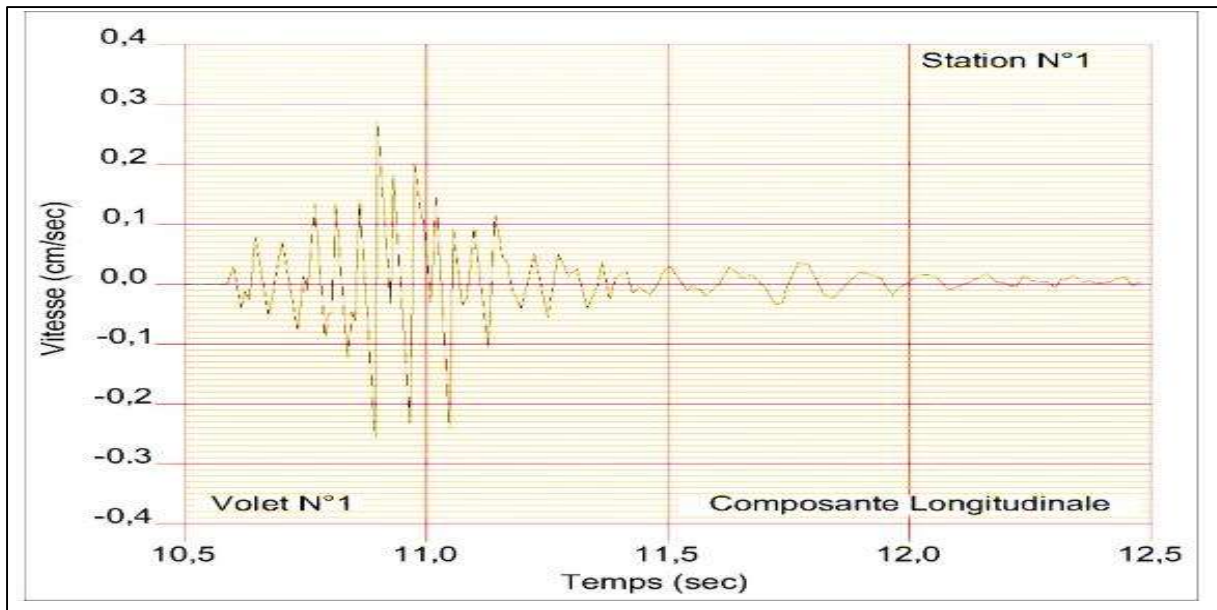
Les vitesses enregistrées au niveau de la première station (volet 01) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.6.1), (3.6.2) et (3.6.3) respectivement.



**Figure 3.6.1.** Vitesse verticale mesurée (1.18 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1

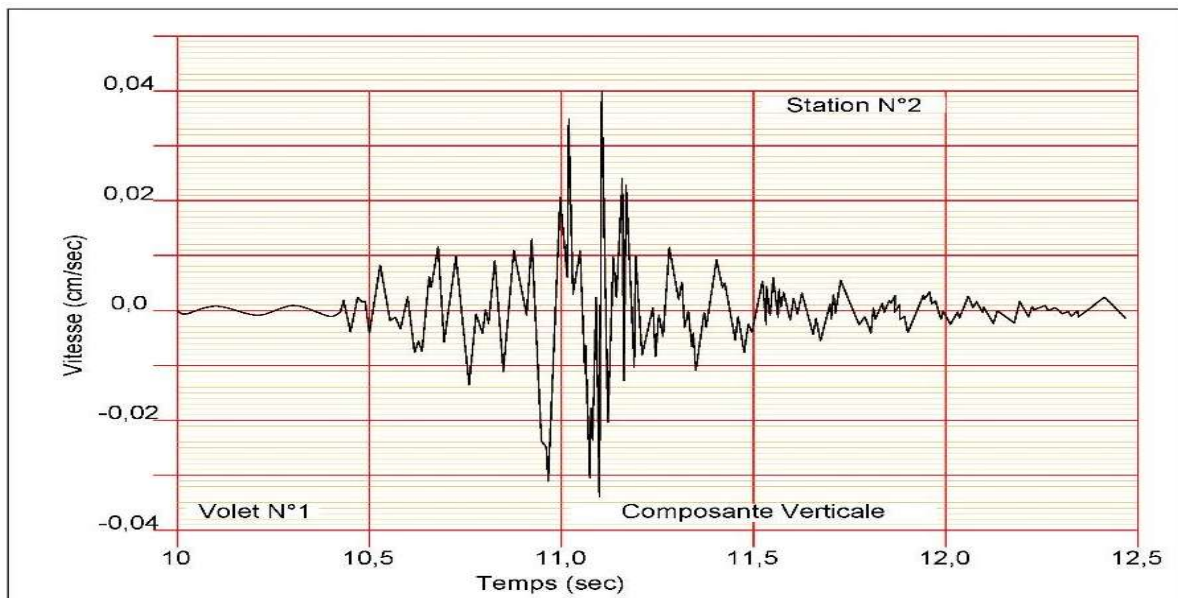


**Figure 3.6.2.** Vitesse transversale mesurée (3.61 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1

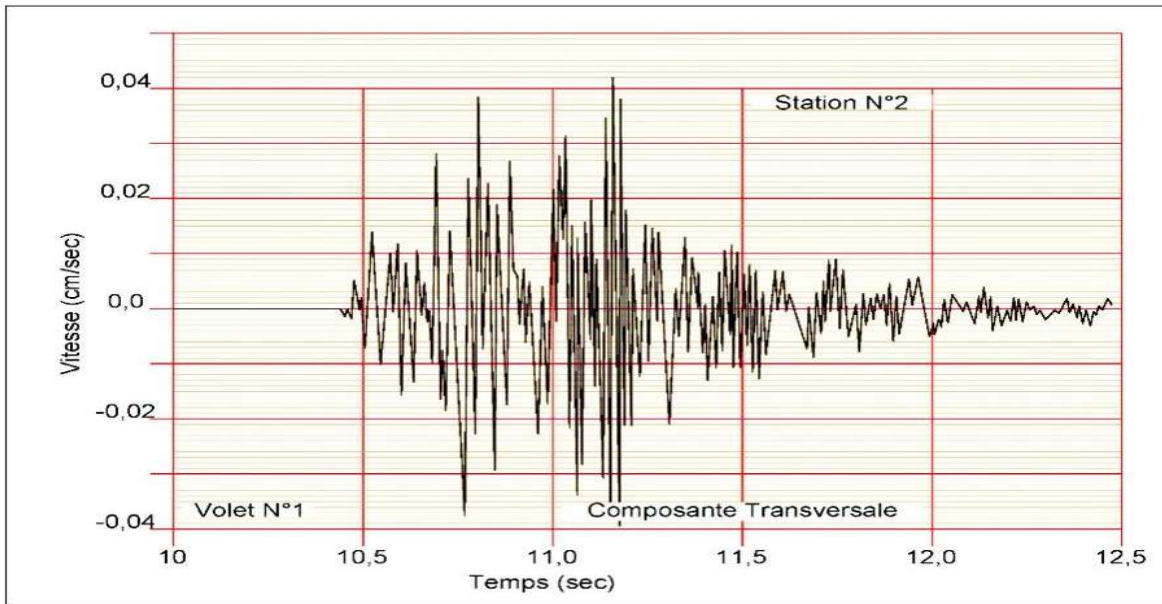


**Figure 3.6.3.** Vitesse longitudinale mesurée (2.72 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°1

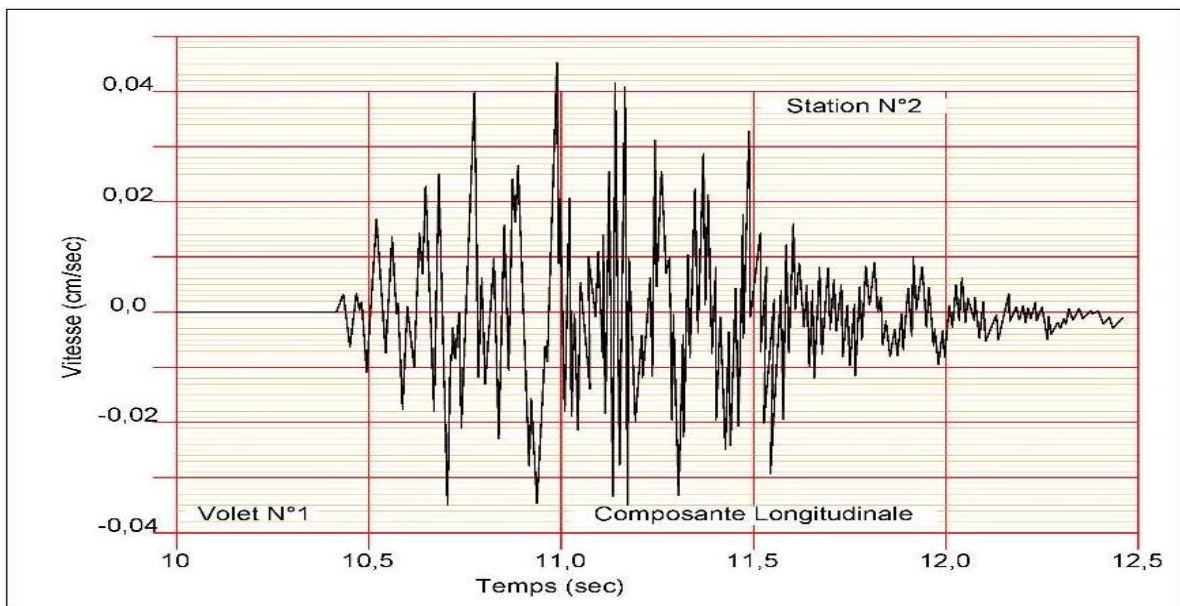
Les vitesses enregistrées au niveau de la deuxième station (volet 01) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.6.1), (3.6.2) et (3.6.3) respectivement.



**Figure 3.6.4.** Vitesse verticale mesurée (0.40 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1

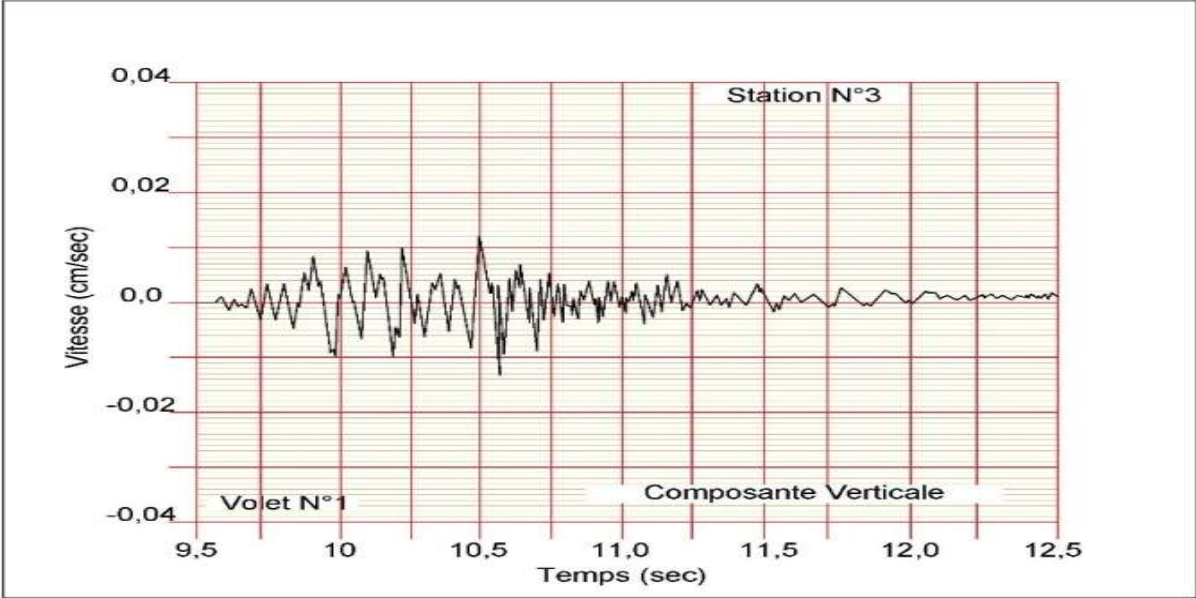


**Figure 3.6.5.** Vitesse transversale mesurée (0.42 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1

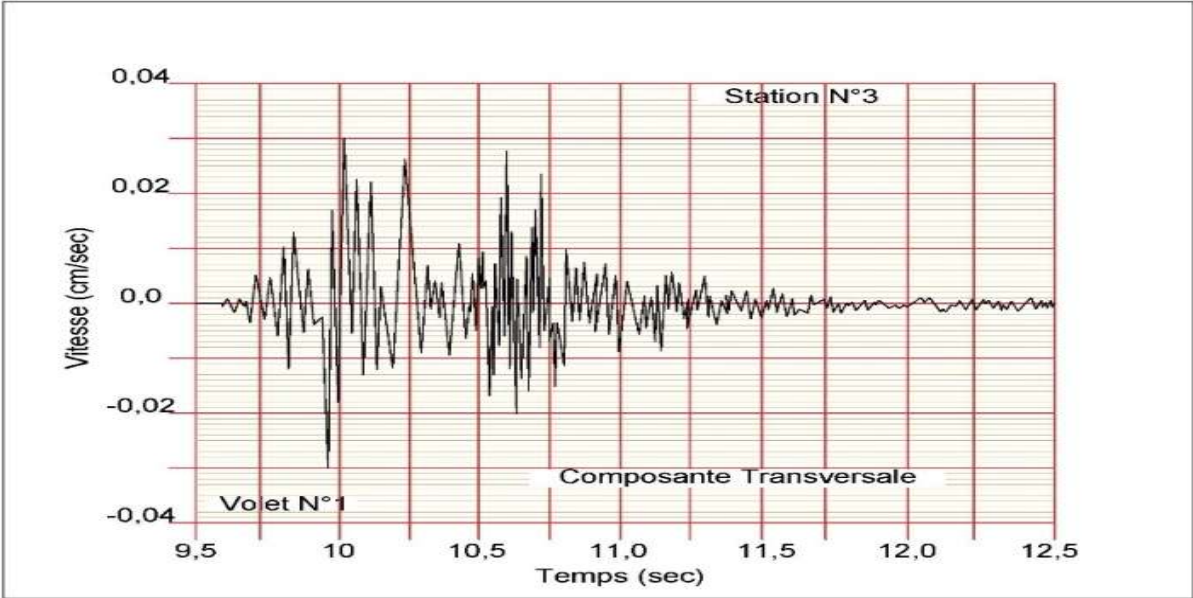


**Figure 3.6.6.** Vitesse longitudinale mesurée (0.46 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°1

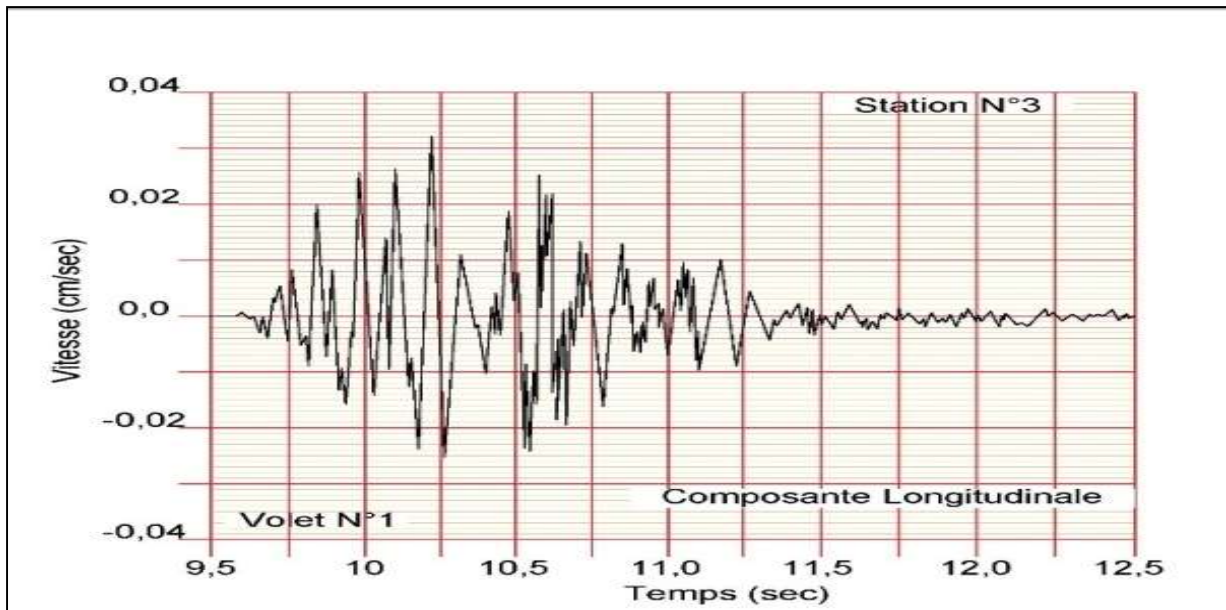
Les vitesses enregistrées au niveau de la troisième station (volet 01) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.6.7), (3.6.8) et (3.6.9) respectivement.



**Figure 3.6.7.** Vitesse verticale mesurée (0.12 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1

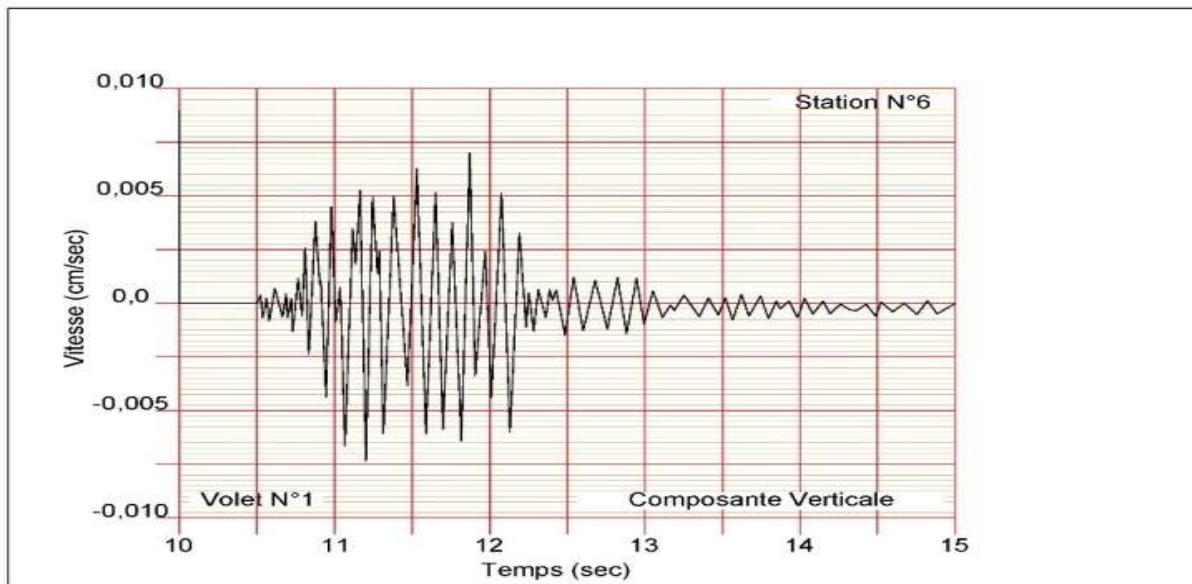


**Figure 3.6.8.** Vitesse transversale mesurée (0.30 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1

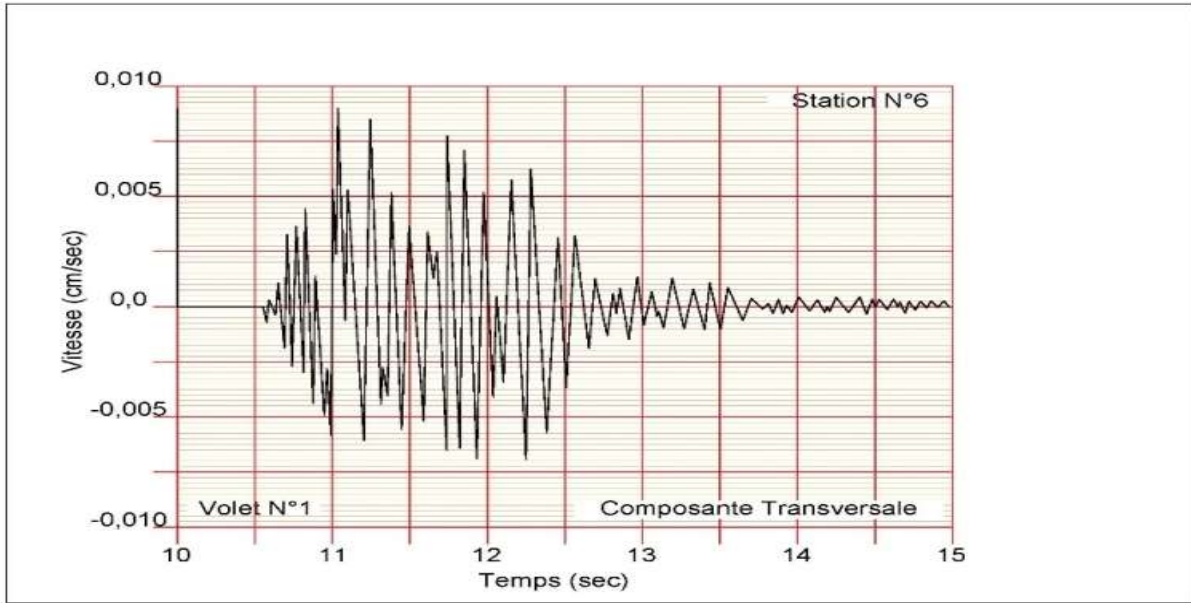


**Figure 3.6.9.** Vitesse longitudinale mesurée (0.32 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 03 - Volet N°1

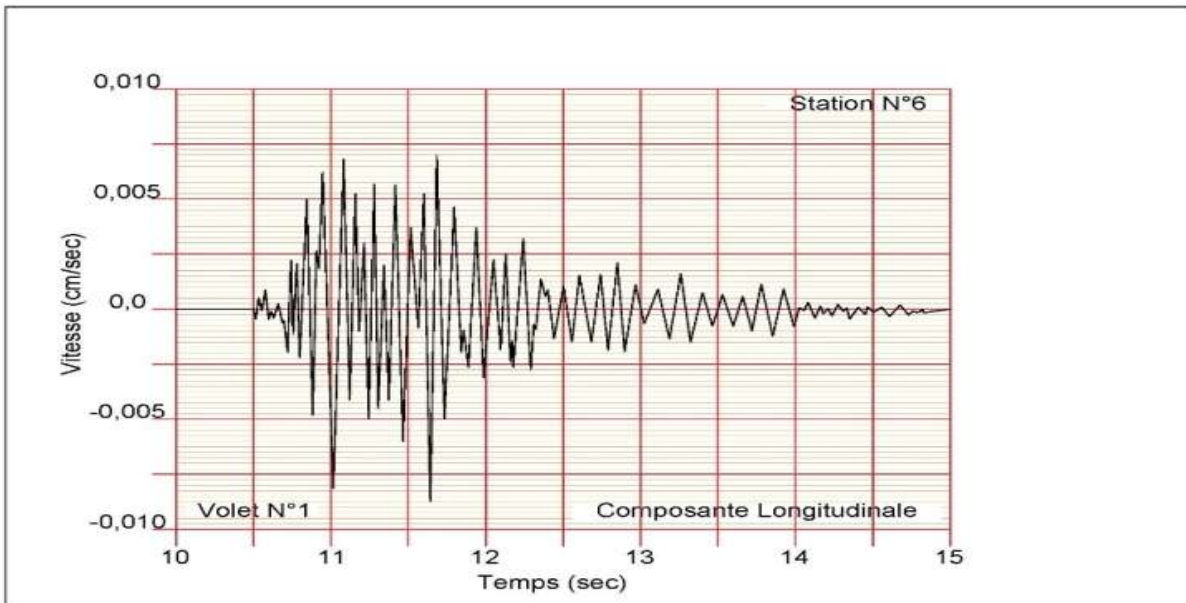
Les vitesses enregistrées au niveau de la station № 06 (volet 01) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.6.10), (3.6.11) et (3.6.12) respectivement.



**Figure 3.6.10.** Vitesse verticale mesurée (0.07 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1

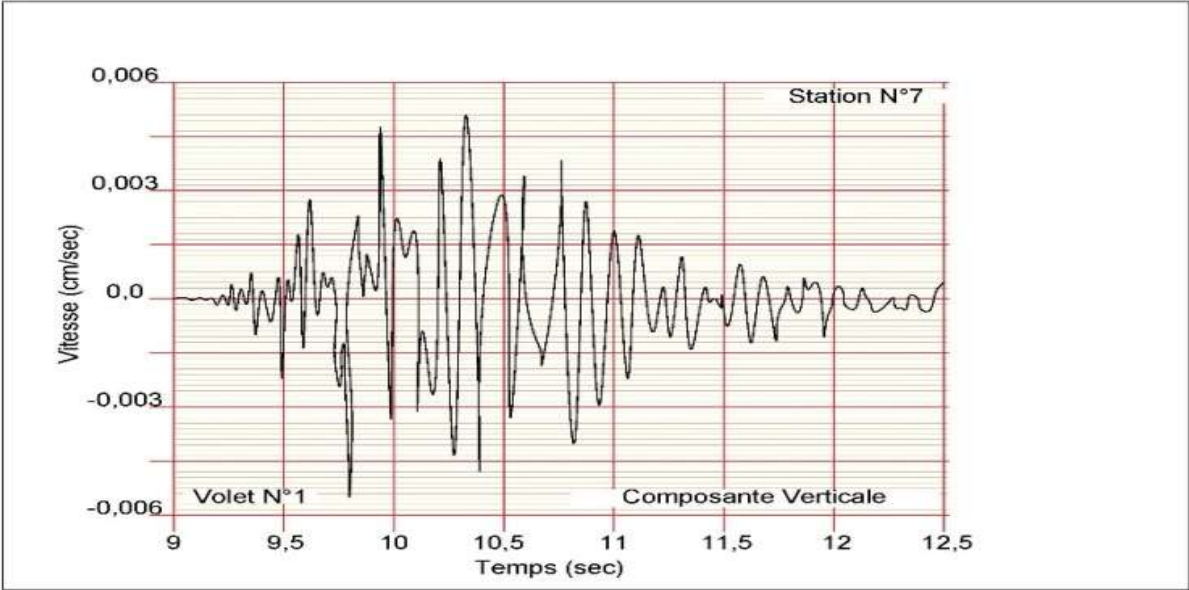


**Figure 3.6.11.** Vitesse transversale mesurée (0.09 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1

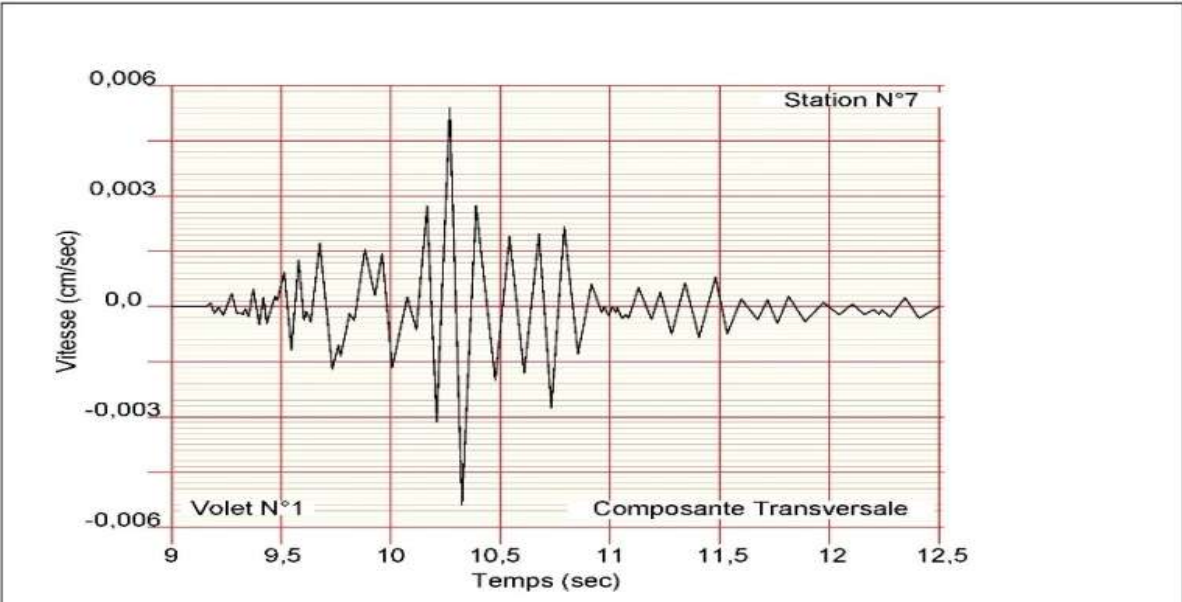


**Figure 3.6.12.** Vitesse longitudinale mesurée (0.09 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°1

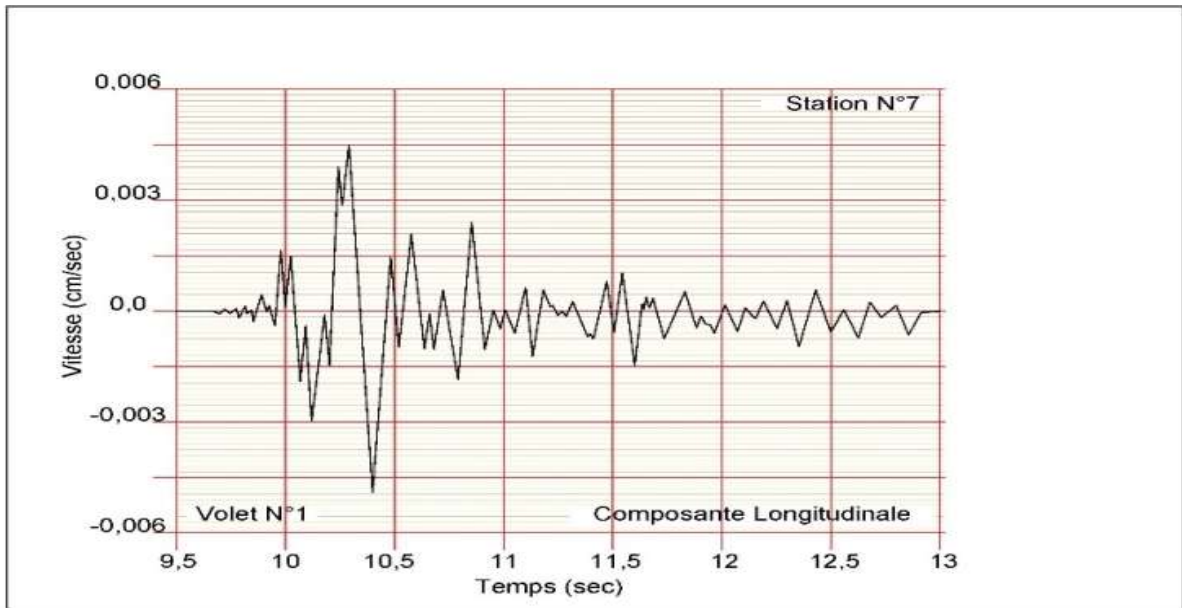
Les vitesses enregistrées au niveau de la station N° 07 (volet 01) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.6.13), (3.6.14) et (3.6.15) respectivement.



**Figure 3.6.13.** Vitesse verticale mesurée (0.04 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1



**Figure 3.6.14.** Vitesse transversale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1



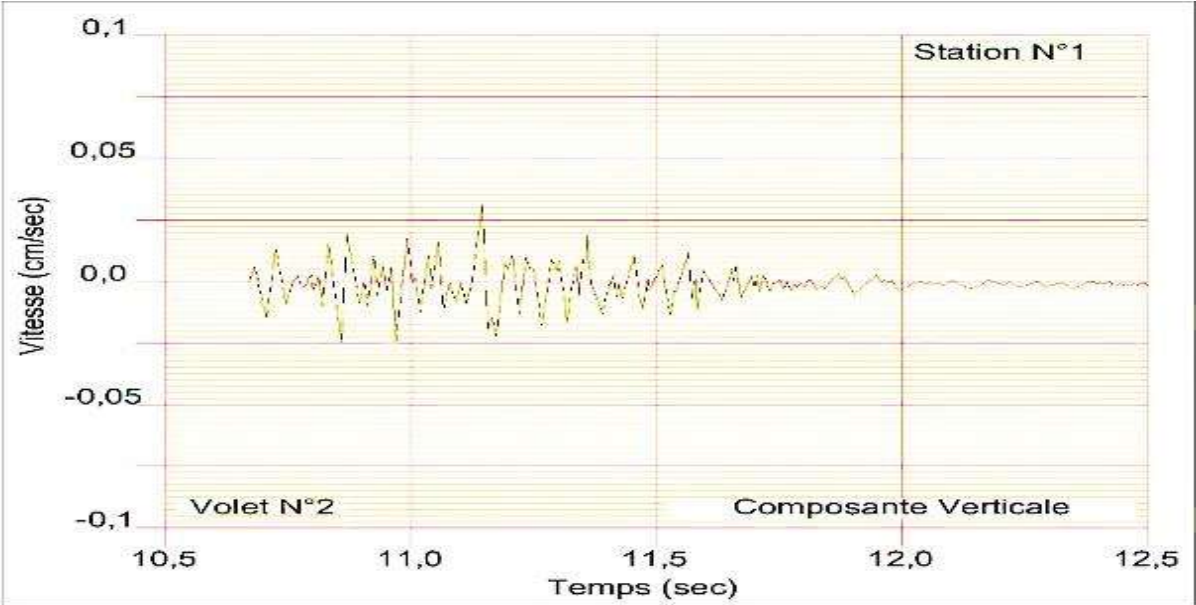
**Figure 3.6.15.** Vitesse longitudinale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°1

**Tableau 3.5.** Valeurs maximales des vitesses suivant les trois (03) directions au niveau des stations d'enregistrement données en (mm/s).

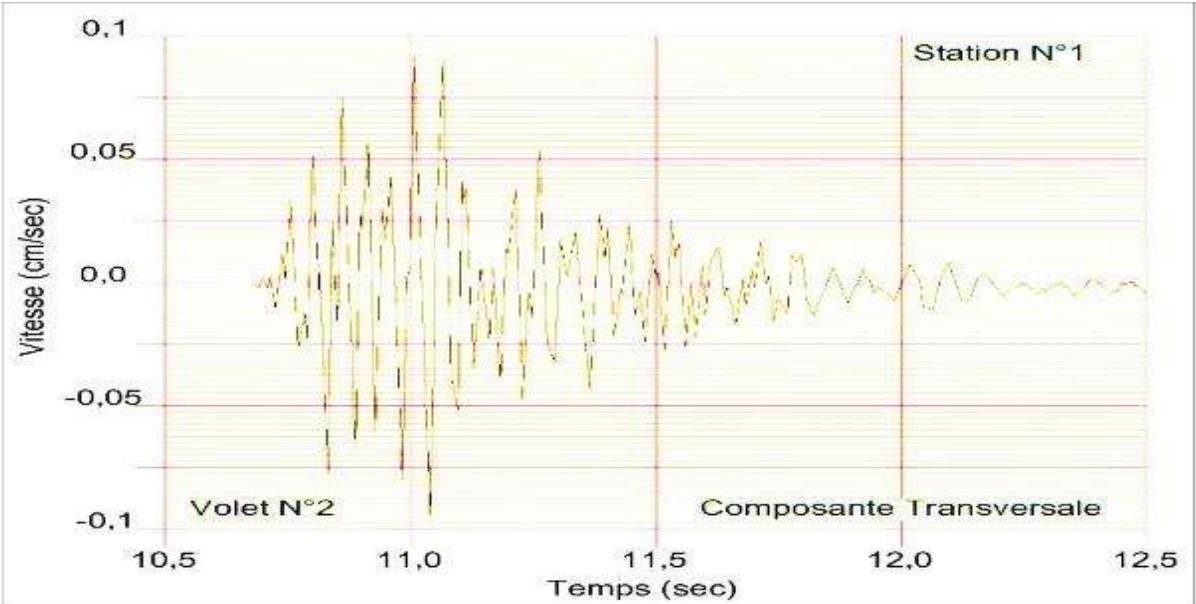
**Volet N°2**

<b>Station</b>	<b>Distance (m)</b>	<b>V. Long. (mm/s)</b>	<b>V. Tran. (mm/s)</b>	<b>V.Ver (mm/s)</b>	<b>Vmax (mm/s)</b>	<b>K</b>
ST1	275	0.66	0.92	0.32	0,92	1 526,37
ST2	360	0.20	0.30	0.16	0,30	808,24
ST3	460	-	-	-	-	-
ST4	650	-	-	-	-	-
ST5	760	-	-	-	-	-
ST6	650	0.05	0.05	0.03	0 ,05	390,20
ST7	840	0.02	0.01	0.01	0,02	247,63

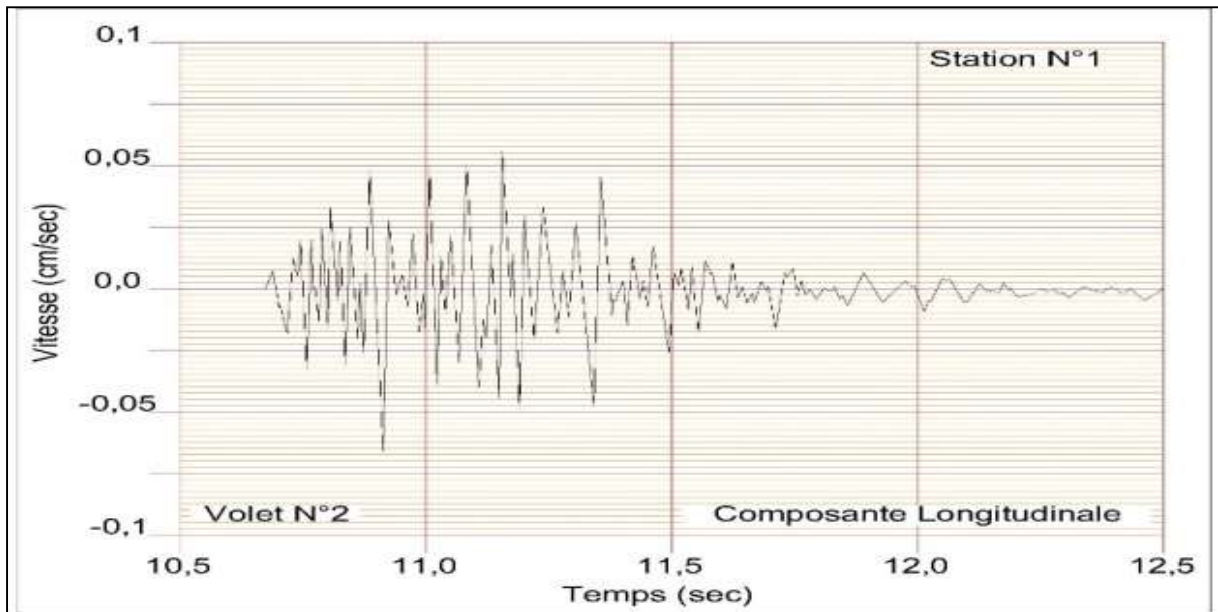
Les vitesses enregistrées au niveau de la première station (volet 02) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.7.1), (3.7.2) et (3.7.3) respectivement.



**Figure 3.7.1.** Vitesse verticale mesurée (0.32 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2

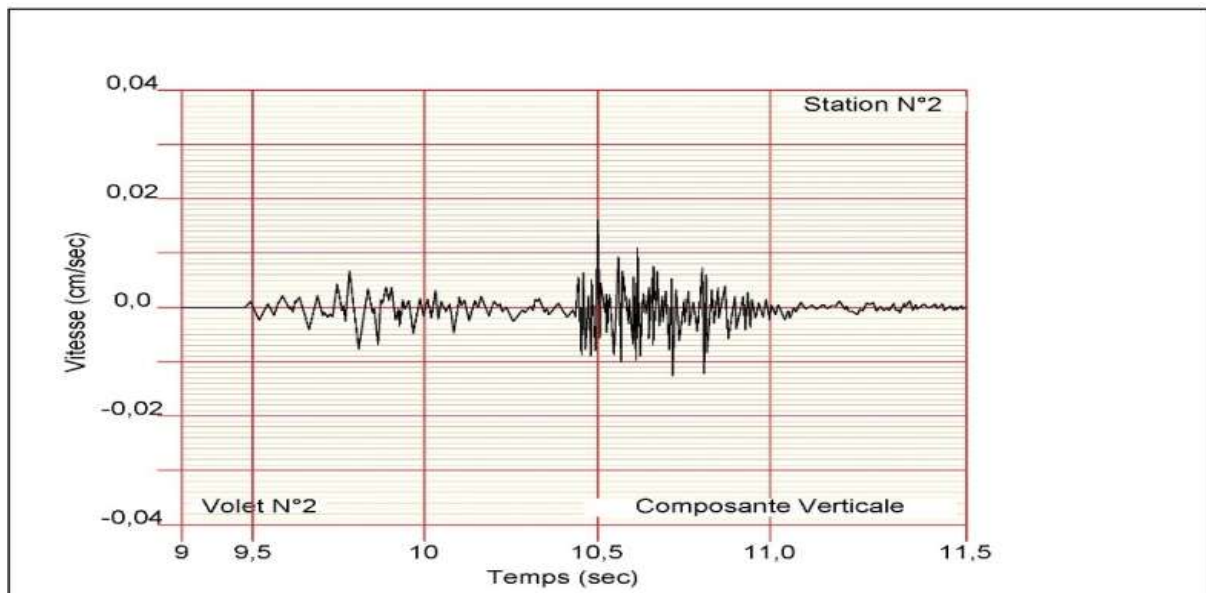


**Figure 3.7.2.** Vitesse transversale mesurée (0.92 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2

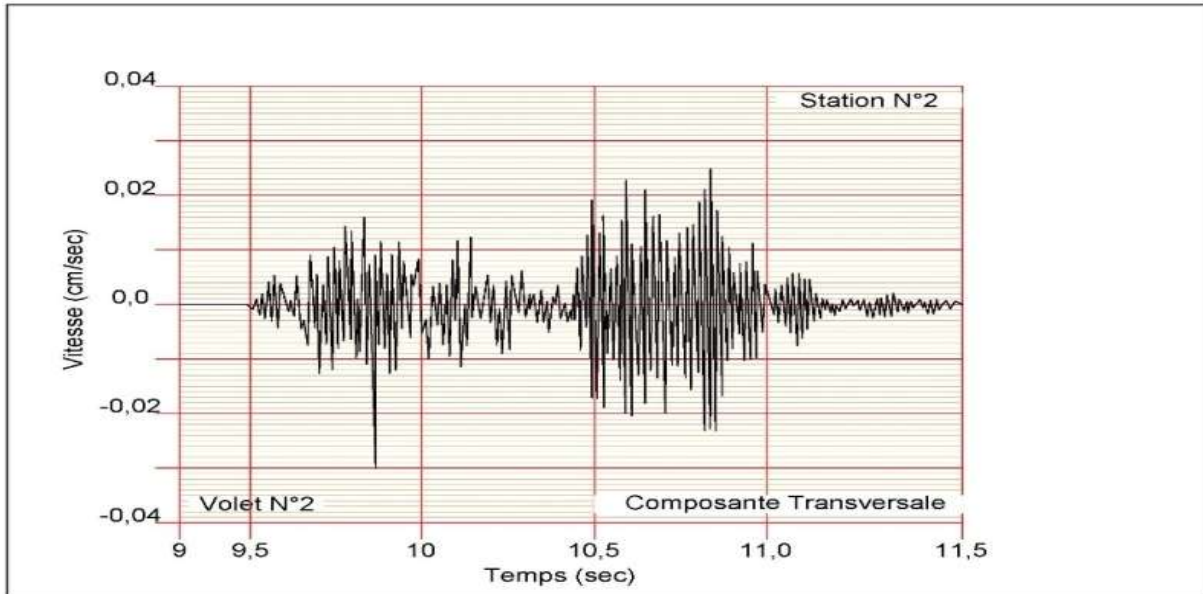


**Figure 3.7.3.** Vitesse longitudinale mesurée (0.66 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 01 - Volet N°2

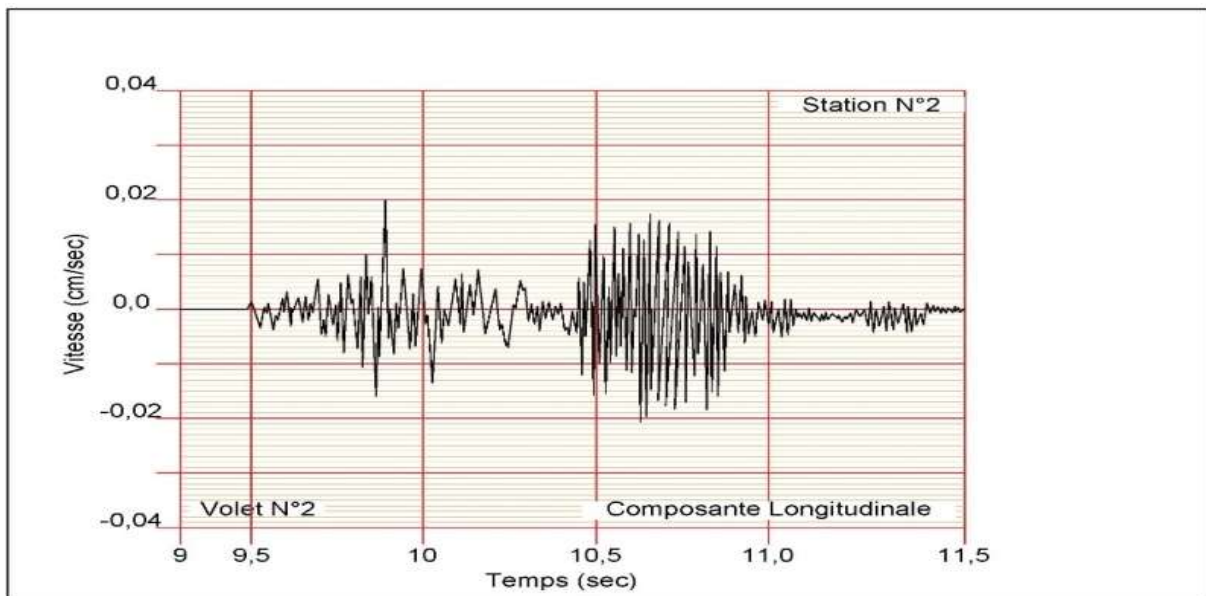
Les vitesses enregistrées au niveau de la deuxième station (volet 02) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.7.1), (3.7.2) et (3.7.3) respectivement.



**Figure 3-7-4.** Vitesse verticale mesurée (0.16 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2

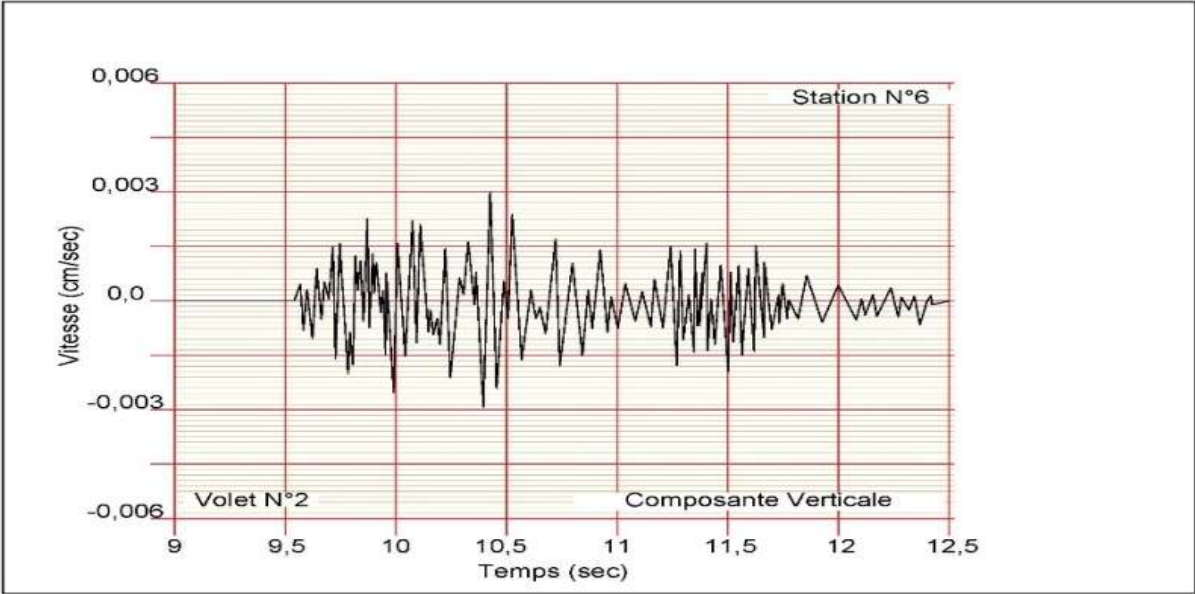


**Figure 3.7.5.** Vitesse transversale mesurée (0.30 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2

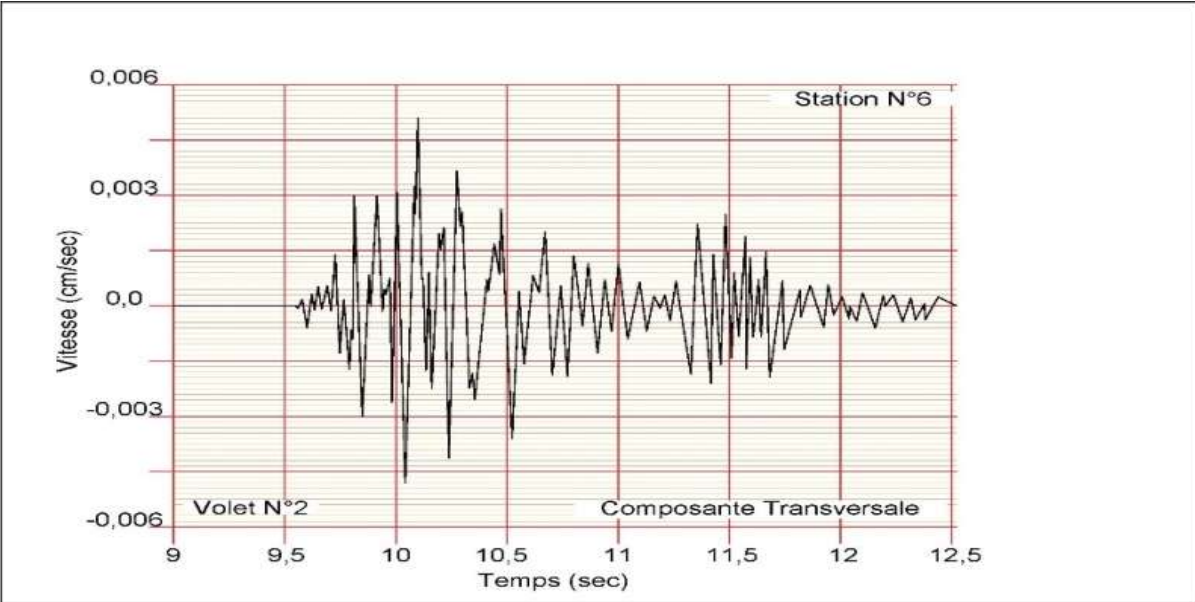


**Figure 3.7.6.** Vitesse longitudinale mesurée (0.20 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 02 - Volet N°2

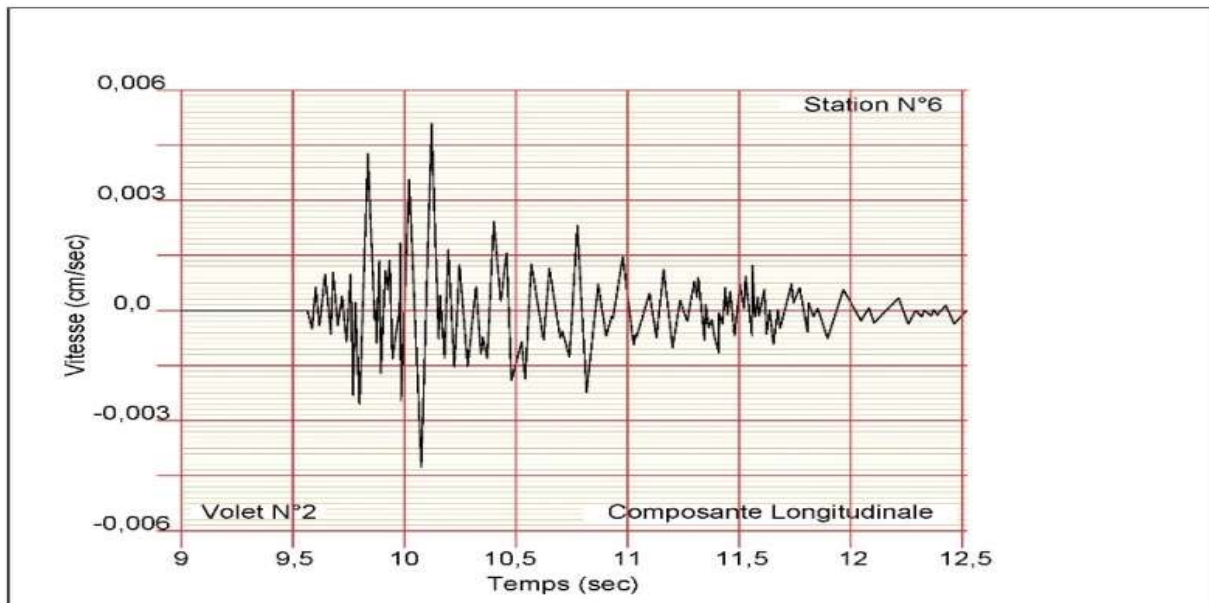
Les vitesses enregistrées au niveau de la station N° 06 (volet 02) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.7.7), (3.7.8) et (3.7.9) respectivement.



**Figure 3.7.7.** Vitesse verticale mesurée (0.03 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2

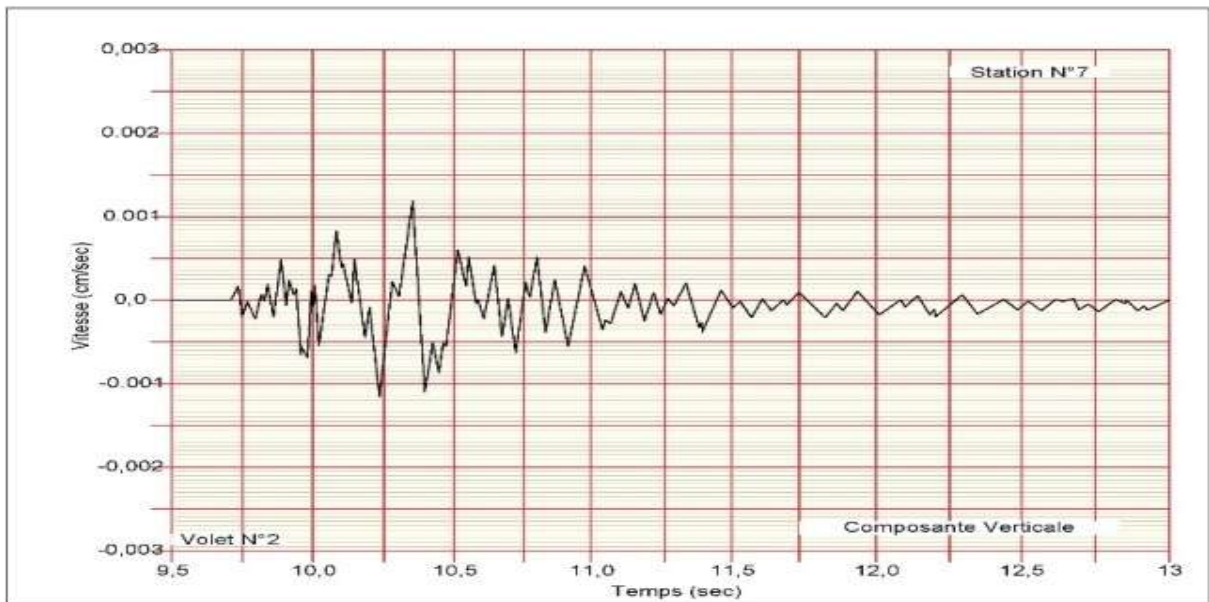


**Figure 3.7.8.** Vitesse transversale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2

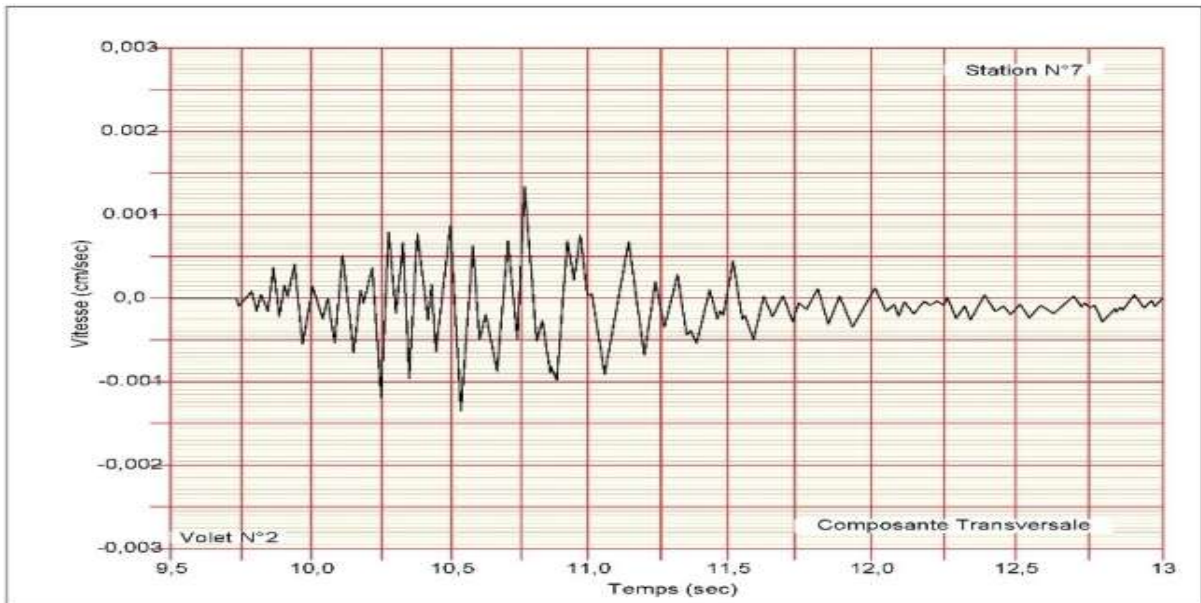


**Figure 3.7.9.** Vitesse longitudinale mesurée (0.05 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 06 - Volet N°2

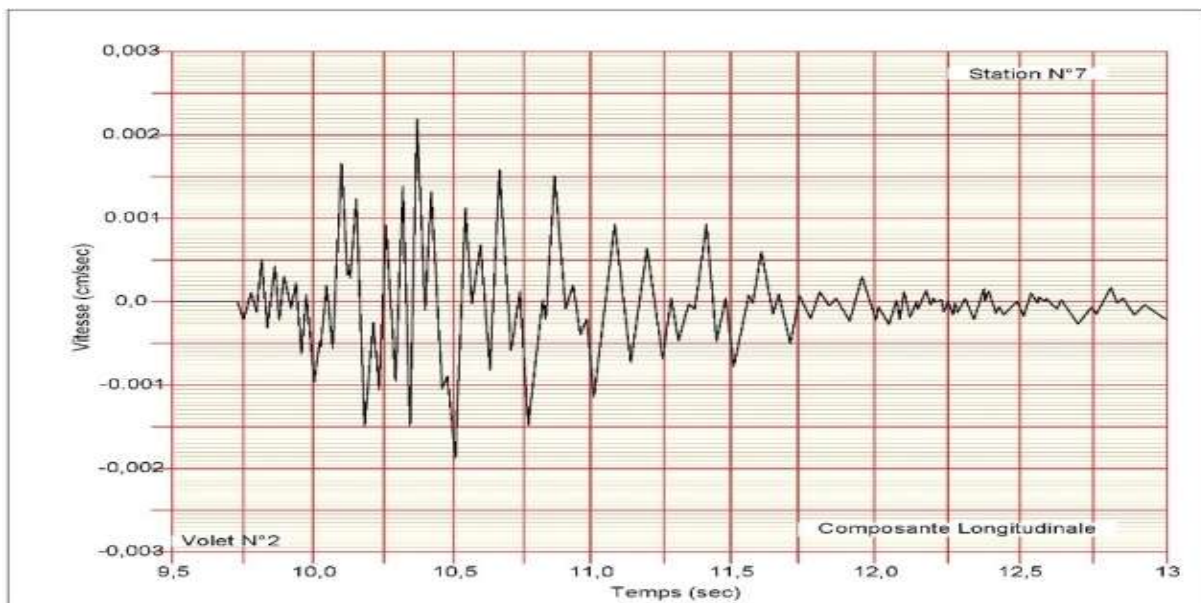
Les vitesses enregistrées au niveau de la station N° 07 (volet 02) et suivant les trois directions sont présentées dans les figures (3.7.10), (3.7.11) et (3.7.12) respectivement.



**Figure 3.7.10.** Vitesse verticale mesurée (0.01 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2



**Figure 3.7.11.** Vitesse transversale mesurée (0.01 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2



**Figure 3.7.12.** Vitesse longitudinale mesurée (0.02 mm/s) au niveau de la station d'enregistrement 07 - Volet N°2

Les courbes de vitesses en fonction de la distance, enregistrées sur les cinq stations sont présentées dans les figures (3.8) et (3.9) pour les deux volets respectivement.

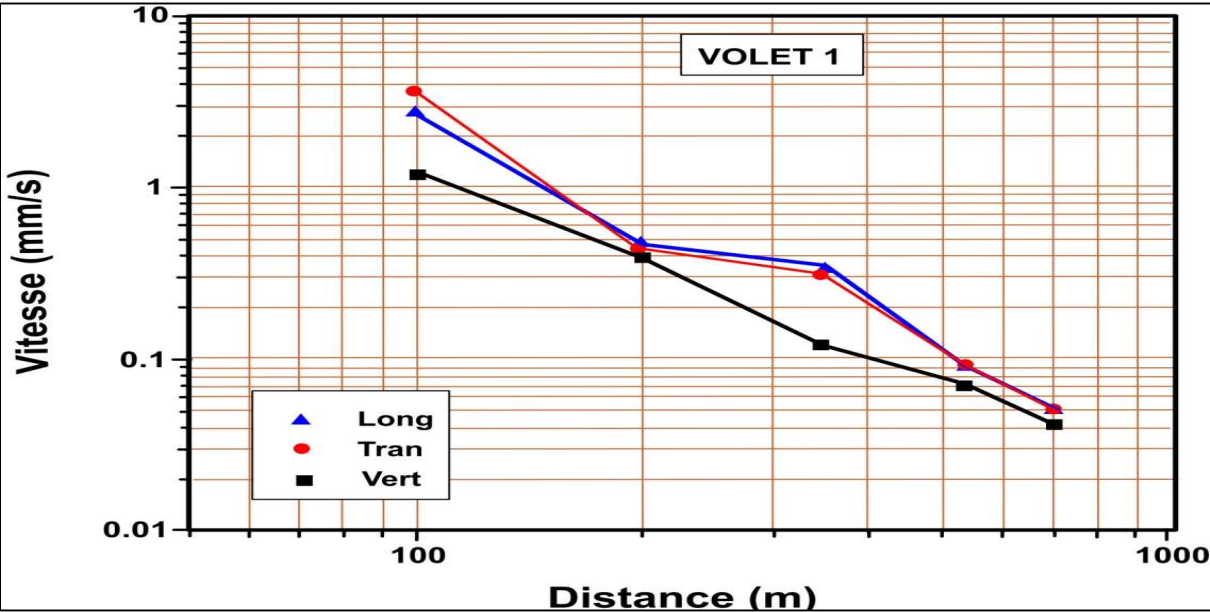


Figure 3.8 . Vitesses particulières enregistrées suivant les directions LONG, TRAN, VERT  
Volet de tir 01

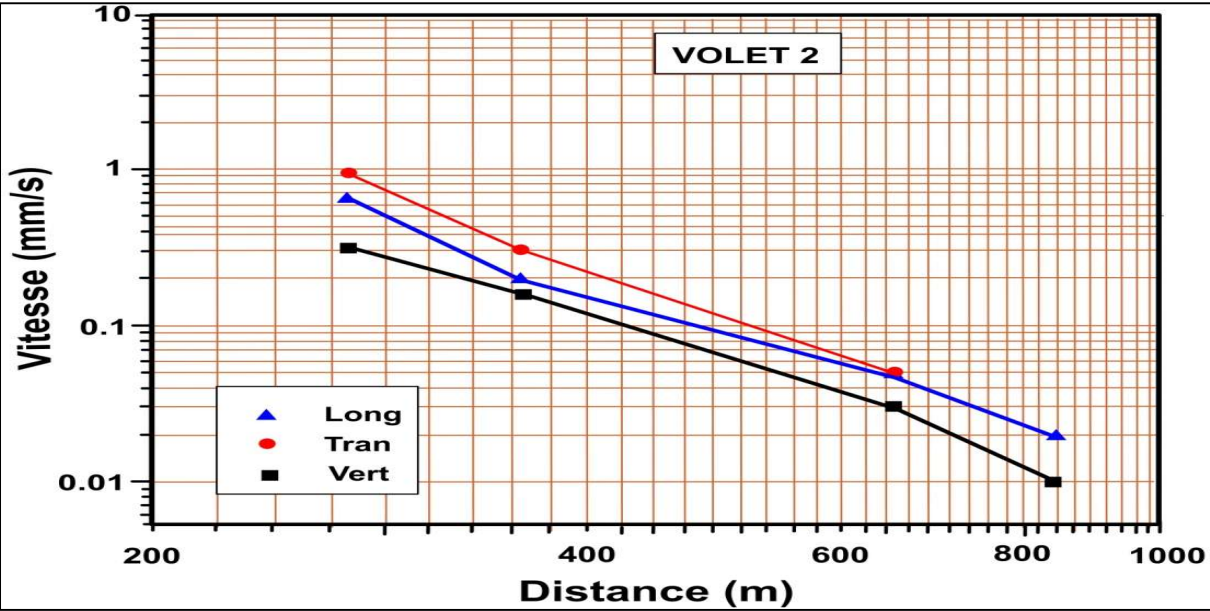


Figure 3.9. Vitesses particulières enregistrées suivant les directions LONG, TRAN, VERT  
Volet de tir 02

## **7. Analyse des Résultats et Impact sur les Structures Environnantes**

L'analyse des résultats obtenus met en évidence une conformité totale avec les normes réglementaires en vigueur en matière de vibrations induites par les tirs de mines. En particulier, la norme française (NF E 90020 - 2015) stipule que la vitesse particulière pondérée ne doit pas excéder 10 mm/s afin de garantir l'intégrité des constructions environnantes. L'exploitation des données issues des essais montre que les vitesses enregistrées lors des explosions restent largement en deçà de ce seuil critique. En effet, pour les stations situées à proximité immédiate des structures sensibles, notamment les logements ANBT et la rive gauche du barrage de Ouled Mellouk, les vitesses mesurées varient entre 0,05 mm/s et 3,61 mm/s. Ces valeurs, nettement inférieures à la limite fixée, attestent d'une propagation vibratoire modérée, sans risque apparent pour les infrastructures voisines.

L'examen des vitesses en fonction des différentes directions met en lumière une disparité entre les composantes horizontales et verticales des vibrations. Comme cela a été rapporté dans de nombreuses études sur la propagation des ondes sismiques, les vitesses les plus élevées sont généralement observées dans les directions longitudinale et transversale. Cette tendance s'explique par la nature même des mécanismes de transmission des ondes dans le sol, où l'énergie se dissipe principalement à l'horizontale en raison des caractéristiques du milieu rocheux et des conditions de confinement des charges explosives. En revanche, les vitesses verticales demeurent faibles et peu significatives, traduisant une atténuation rapide des vibrations dans cette direction.

Un autre facteur déterminant dans l'analyse des résultats est l'atténuation progressive des vibrations avec la distance. Les enregistrements montrent une diminution constante des vitesses mesurées au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source d'explosion. Cette décroissance est conforme aux lois classiques de propagation des ondes de choc dans les massifs rocheux, où l'énergie vibratoire se dissipe progressivement en fonction de la densité et de la nature du matériau traversé. Ainsi, pour les stations les plus éloignées, telles que ST7 située à plus de 700 mètres, les amplitudes vibratoires enregistrées sont significativement réduites par rapport à celles relevées près du point de tir, confirmant l'efficacité du phénomène d'atténuation.

Dans une perspective plus large, les résultats obtenus ont également été confrontés aux standards internationaux, notamment ceux définis par l'United States Bureau of Mines (USBM) (2017). Ces normes recommandent des seuils de vitesse maximaux variables selon le type de structure et la fréquence des vibrations engendrées. Par exemple, pour les constructions modernes et les structures en murs secs, la norme fixe un seuil de 19 mm/s pour des fréquences

inférieures à 40 Hz. Une comparaison avec les valeurs mesurées révèle que celles-ci restent bien en dessous des niveaux critiques définis par l'USBM, ce qui confirme l'absence d'un impact significatif des explosions sur les bâtiments et ouvrages environnants.

En définitive, l'ensemble de ces observations démontre que les tirs de mines réalisés respectent pleinement les exigences de sécurité en matière de vibrations. Les valeurs relevées, bien que présentant des variations en fonction de la direction et de la distance, restent largement inférieures aux seuils réglementaires établis à l'échelle nationale et internationale. Ces résultats permettent ainsi d'affirmer que les explosions mises en œuvre dans ce cadre n'induisent aucun risque structurel notable pour les infrastructures avoisinantes et qu'elles s'inscrivent dans une démarche maîtrisée visant à limiter les nuisances vibratoires.

## **8. Conclusion**

La démarche expérimentale menée sur les vibrations induites par les tirs a démontré que les niveaux enregistrés restent inférieurs aux seuils réglementaires français et aux recommandations de l'USBM. L'analyse des données a révélé une atténuation progressive des ondes avec la distance, caractérisée par une prédominance des composantes horizontales liée aux mécanismes de rupture de la roche et à l'interaction explosif-roche. Cette dissipation est directement influencée par les discontinuités géologiques et le coefficient d'amortissement géologique  $K$  du site, qui conditionnent la propagation énergétique.

Bien que les résultats actuels garantissent la sécurité des structures avoisinantes, la poursuite du monitoring vibratoire s'avère essentielle pour maîtriser les effets cumulatifs des tirs répétés. Les recherches futures devraient quantifier plus finement le rôle des paramètres géomécaniques et du coefficient  $K$  dans l'atténuation vibratoire, afin d'optimiser les plans de tir dans ce contexte géologique spécifique. Cette approche expérimentale structurée constitue ainsi un prérequis indispensable pour concilier efficacité opérationnelle et préservation du patrimoine bâti.

**CHAPITRE IV**

**Impacts Environnementaux**  
**Et Mesures D'atténuation**

## **1. Introduction**

L'utilisation des explosifs dans les travaux miniers, notamment à proximité d'infrastructures de génies civils sensibles, soulève d'importantes préoccupations quant aux impacts des vibrations générées sur la stabilité et l'intégrité des structures avoisinantes. La propagation des ondes sismiques induites par les tirs de mine peut, en fonction de plusieurs paramètres tels que la nature du sol, la distance entre la source d'explosion et les constructions, ainsi que la charge explosive utilisée, entraîner des effets indésirables qui doivent être rigoureusement évalués. Dès lors, une compréhension approfondie des mécanismes de transmission des vibrations et de leur atténuation devient essentielle pour garantir la sécurité des ouvrages et optimiser les stratégies d'exploitation.

L'une des principales préoccupations dans ce domaine concerne la prévisibilité des vibrations engendrées avant même le début des opérations de minage. Il est crucial d'estimer, avec une précision suffisante, les niveaux vibratoires susceptibles d'être atteints afin de mettre en place les mesures de prévention adaptées. Cette anticipation permet non seulement de minimiser les risques de dommages structurels, mais également de mieux planifier l'organisation des travaux en optimisant les charges explosives à utiliser. Ainsi, la mise en œuvre d'une méthodologie fiable pour prévoir l'intensité des vibrations constitue un enjeu majeur dans le domaine de la géotechnique et de l'ingénierie des explosifs.

En pratique, la mesure et l'analyse des vibrations induites par les tirs de mine permettent d'établir des modèles empiriques et analytiques visant à quantifier leur impact. Plusieurs approches ont été développées afin de corréliser les paramètres des tirs aux amplitudes vibratoires observées, offrant ainsi des outils d'aide à la décision pour les ingénieurs et exploitants miniers. L'objectif est d'identifier les seuils critiques à ne pas dépasser et d'adapter les configurations de tir en conséquence pour assurer un équilibre entre l'efficacité du minage et la préservation des structures environnantes.

Par ailleurs, la variabilité des conditions géologiques et géotechniques impose une analyse spécifique pour chaque site d'exploitation. Les propriétés mécaniques du massif rocheux, la présence de discontinuités et la nature des matériaux traversés influencent considérablement la propagation des ondes de choc. Une approche rigoureuse, combinant études de terrain, modélisations numériques et validation expérimentale, s'avère donc indispensable pour caractériser ces phénomènes avec précision.

Dans ce contexte, les mesures de vibrations effectuées nous offrent une base de données précieuse pour développer des modèles prédictifs fiables. En exploitant ces données, il est possible d'optimiser les techniques de tir en minimisant les nuisances vibratoires et en garantissant la conformité aux réglementations en vigueur.

## **2. Impacts paysagers et visuels**

L'analyse des paysages environnant une exploitation minière permet d'appréhender les interactions visuelles et spatiales entre les différentes unités qui composent le territoire. Cette démarche repose sur une identification rigoureuse des unités paysagères, lesquelles sont définies en fonction de critères morphologiques, écologiques et perceptuels. La diversité et la structuration du paysage dans la zone d'étude sont largement influencées par la topographie, qui façonne les reliefs et conditionne les perspectives visuelles, ainsi que par la répartition des éléments naturels et anthropiques.

La composante naturelle, en particulier le modelé du terrain et la couverture végétale, joue un rôle central dans la définition des entités paysagères. Le relief agit comme un facteur déterminant, délimitant des espaces aux dynamiques visuelles distinctes et influençant la manière dont les différents éléments du paysage sont perçus. Les zones de crêtes et de versants offrent des points d'observation privilégiés, tandis que les fonds de vallées structurent les vues et modifient la perception des distances et des profondeurs.

En complément du relief, la végétation participe activement à l'organisation du paysage. La répartition des formations arborées, des haies bocagères et des zones de couverture herbacée influence les lignes de fuite et les jeux de transparence au sein de l'espace visuel. Ces éléments végétaux, en interaction avec les structures hydrographiques comme les cours d'eau et les zones humides, composent une trame verte et bleue essentielle à la dynamique paysagère locale. Ils contribuent non seulement à la qualité esthétique du territoire, mais aussi à la régulation des impacts environnementaux liés à l'exploitation minière.

L'analyse cartographique du relief et des structures paysagères permet ainsi de délimiter les unités paysagères en fonction de critères objectifs, tout en intégrant la dimension perceptive propre à chaque site. L'influence de la position du site d'exploitation sur les modes de perception est significative : selon l'orientation, l'altitude et la présence de masques végétaux ou bâtis, l'impact visuel de la mine peut être atténué ou, au contraire, accentué. Ainsi, la configuration du paysage environnant joue un rôle clé dans l'évaluation de l'intégration du site et dans la définition des mesures d'atténuation visant à minimiser les nuisances visuelles associées à l'exploitation.

### **3. Evaluation des impacts de la mine**

#### **3.1. Modification de la morphologie du site**

L'aménagement et l'exploitation d'une carrière entraînent une transformation significative de la morphologie naturelle du site, modifiant à la fois son relief et son intégration paysagère. L'intervention humaine sur le terrain se traduit par l'introduction de structures géométriques aux lignes anguleuses et rectilignes, en contraste avec les formes naturelles plus douces et ondulées du paysage environnant. Ces modifications sont particulièrement perceptibles dans le cas des carrières situées en sommet de versant, où l'altération de la silhouette du relief peut générer des ruptures visuelles notables.

Le projet de réouverture de la carrière par la société Matériaux De l'ouest concerne un site dont l'exploitation a été interrompue après plusieurs décennies d'activité, laissant place à un processus naturel de recolonisation végétale. Aujourd'hui, les anciens fronts d'extraction, progressivement recouverts de végétation, s'intègrent de manière discrète dans le paysage et sont difficilement perceptibles à l'échelle du territoire. La réactivation de l'exploitation implique toutefois la mise à nu de certaines parties du gisement, ce qui pourrait entraîner une réapparition brutale des surfaces minérales et créer un contraste marqué avec les formations naturelles environnantes.

Consciente des enjeux paysagers et environnementaux liés à cette reprise d'activité, la société a opté pour une orientation stratégique des travaux d'extraction vers la partie Est du site, préservant ainsi les anciens fronts d'exploitation végétalisés à l'Ouest. Cette disposition permet de limiter l'impact visuel perçu depuis les points d'observation situés à proximité, tout en optimisant les conditions d'exploitation. L'organisation spatiale des travaux prévoit une extraction progressive selon un axe Ouest-Est, engendrant un abaissement du terrain pouvant atteindre une trentaine de mètres.

La configuration topographique de la zone orientale, moins accidentée que celle de l'Ouest, atténuera en partie la perception de ces modifications, bien que l'excavation entraîne inévitablement une rupture des lignes naturelles du paysage. Toutefois, l'impact visuel direct restera circonscrit, car seuls les sommets des nouveaux fronts d'extraction seront visibles depuis certains points d'observation spécifiques, notamment le lieu-dit « Rouina », qui constitue l'un des rares postes d'observation dégagés sur cette portion du site.

Dans une perspective d'aménagement durable, il conviendra d'anticiper des mesures d'atténuation et de réhabilitation progressive du site, visant à limiter la perception des contrastes morphologiques et à favoriser une intégration paysagère harmonieuse des nouvelles formes

d'exploitation.

### **3.2. Éléments du site impactant le paysage**

Tout projet d'exploitation minière modifie inévitablement le paysage en raison de l'altération des éléments du site et de leur interaction avec l'environnement visuel. Pour la mine de Rouina, son intégration dans un paysage homogène, avec peu de diversité dans l'occupation du sol et la couverture végétale, limite son impact sur la structure paysagère globale. Son isolement réduit également le risque de rupture visuelle, préservant les caractéristiques fondamentales de l'environnement naturel.

Cependant, l'exploitation du gisement entraînera des modifications significatives des contrastes chromatiques, exposant des formations rocheuses qui pourraient ne pas s'harmoniser avec le paysage environnant. Cette mise à jour créera des points d'attraction visuelle, particulièrement perceptibles durant les phases initiales d'exploitation, lorsque l'excavation est moins intégrée à la morphologie du site. L'analyse des impacts visuels révèle que ces premières étapes constituent la période critique pour la visibilité et l'intégration paysagère, car les nouveaux fronts d'exploitation n'auront pas encore subi d'évolution permettant d'atténuer les contrastes. Concernant les infrastructures, l'impact paysager des bâtiments est limité. La mine de Rouina présente une emprise bâtie réduite, avec un unique bâtiment administratif et quelques baraques préfabriquées, ce qui minimise l'effet visuel des aménagements anthropiques.

Pour une gestion durable de l'impact paysager, il serait judicieux d'envisager des mesures compensatoires, telles que la réhabilitation anticipée des fronts d'exploitation visibles, l'optimisation de la disposition des déblais pour atténuer les contrastes et l'implantation de dispositifs de camouflage végétal. Une approche proactive de l'aménagement paysager pourrait ainsi réduire les effets des modifications induites par l'exploitation et favoriser une meilleure acceptation du projet par les populations locales.

### **3.3. Mesures d'intégration**

#### **3.3.1. Éléments d'intégration paysagère existants**

Les mesures d'intégration paysagère ont pour objectif de préserver et valoriser les éléments naturels du paysage afin d'harmoniser l'exploitation minière avec son environnement. Des éléments tels que les haies bocagères et les bosquets périphériques jouent un rôle crucial dans l'atténuation des impacts visuels et écologiques du site. Pour la mine de Rouina, plusieurs composantes paysagères existantes ont été identifiées comme significatives pour cette intégration, tant pendant la phase d'exploitation que lors de la remise en état future.

Parmi ces éléments, des boisements situés à l'est et au sud-est, principalement constitués de résineux, masquent efficacement les zones d'activité minière, telles que l'extraction et le stockage. La société SOMIFER-spa s'engage à préserver ces formations végétales ainsi que la zone humide à l'extrême est, proche du barrage d'Ouled Mellouk, qui contribue à la régulation hydrique et à la biodiversité locale. De plus, pour renforcer l'intégration paysagère, un écran périphérique composé de plantations et de merlons sera créé, particulièrement dans la zone nord, où une habitation se trouve à proximité.

L'isolement visuel de la mine par rapport à « La Ville de Rouina » est également un atout pour son intégration paysagère. La topographie naturelle du site, qui ne sera pas modifiée dans sa partie est, contribue à cet isolement, car aucune activité extractive n'est prévue dans cette zone, actuellement occupée par la zone humide. Cette préservation permet de maintenir un équilibre entre les activités minières et les caractéristiques naturelles du paysage, tout en limitant les impacts visuels sur les zones habitées environnantes.

Ces mesures d'intégration, alliant préservation des éléments existants et aménagements complémentaires, visent à réduire l'empreinte visuelle et environnementale de l'exploitation minière. Elles s'inscrivent dans une démarche de développement durable, où la valorisation des ressources naturelles est accompagnée d'une attention particulière à la préservation des écosystèmes et à la qualité de vie des populations locales.

### **3.3.2. Mesures d'intégration paysagère**

Les mesures d'intégration paysagère pour le projet minier ont été élaborées afin de minimiser les impacts sur le paysage dès la phase initiale. Ces mesures, à la fois structurelles et organisationnelles, visent à harmoniser les activités d'extraction avec l'environnement naturel. L'exploitation minière est prévue selon un axe est-ouest, avec une bande végétalisée de 40 mètres qui protège les infrastructures avoisinantes, comme la route et le barrage, tout en améliorant l'intégration visuelle du site. La méthode d'extraction en fosse limite l'exposition des fronts rocheux, réduisant ainsi l'impact visuel.

Le phasage des travaux a été soigneusement conçu pour optimiser cette intégration. L'exploitation se fera sur un seul bord exploitable, avec plusieurs paliers travaillés simultanément, ce qui permet de dissimuler efficacement les activités minières sous la topographie naturelle. Cette approche réduit la visibilité des opérations depuis les zones environnantes, préservant la qualité visuelle du paysage.

La plateforme de stockage, située au sud du site, sera la seule zone accessible au public et nécessitera une attention particulière pour la sécurité et l'intégration paysagère. Les matériaux

utilisés pour les ateliers de chantier seront soigneusement sélectionnés en fonction de leur couleur et texture pour s'harmoniser avec l'environnement. La centralisation des stocks sur une plateforme unique permettra de contrôler leur hauteur et de réduire leur impact visuel, tout en facilitant une gestion plus efficace des ressources et une meilleure organisation des opérations.

### **3.4. Tirs de mines et effets vibratoires**

#### **3.4.1. Conditions de minage et impacts potentiels**

L'exploitation du gisement de Rouina, caractérisé par sa roche massive, repose sur des techniques d'abattage des fronts d'extraction, impliquant l'utilisation d'explosifs. Ces opérations de minage sont menées selon des protocoles rigoureux, dont les conditions spécifiques sont détaillées dans le tableau 4.1. Chaque année, des demandes d'autorisation pour l'utilisation d'explosifs sont renouvelées, en tenant compte de l'évolution de la production et des besoins en minage. Les quantités d'explosifs sont ajustées en fonction des impératifs opérationnels, garantissant ainsi une gestion optimale des ressources tout en respectant les normes de sécurité et les réglementations en vigueur. Les travaux de forage, qui précèdent les tirs, ainsi que les opérations de minage proprement dites, sont réalisés par du personnel qualifié et habilité de la société SOMIFER-spa, assurant une exécution précise et sécurisée des activités. Lors d'un tir de mines, l'énergie libérée par l'explosion se répartit entre deux formes principales : le « travail utile » et l'« énergie de choc ». Environ 80 % de cette énergie est consacrée à l'ébranlement et à la fragmentation du massif rocheux, ce qui permet d'extraire les matériaux de manière efficace. Les 20 % restants se dissipent sous forme d'ondes vibratoires, qui se propagent à travers le sol sous forme d'ondes sismiques et dans l'air sous forme d'ondes aériennes. Cette répartition énergétique peut engendrer plusieurs types de nuisances, dont les impacts varient en fonction de divers paramètres.

**Les principales nuisances associées aux tirs de mines incluent :**

**La transmission d'ondes de pression dans le sol :** Ces vibrations, également appelées ondes sismiques, peuvent se propager à travers le substratum rocheux et affecter les structures environnantes, notamment les bâtiments et les infrastructures. L'intensité de ces vibrations dépend de la charge explosive utilisée et des caractéristiques géologiques du site.

**La transmission d'ondes de pression dans l'air :** Les ondes aériennes générées par l'explosion se traduisent par un bruit intense, qui peut être perçu comme une nuisance sonore par les populations locales. L'amplitude de ce bruit est influencée par la distance entre le point d'explosion et les zones habitées, ainsi que par les conditions météorologiques.

**La projection de roches et de poussières** : L'explosion peut entraîner l'éjection de fragments de roche et la dispersion de poussières dans l'air, ce qui pose des risques pour la sécurité des travailleurs et des riverains, ainsi que des impacts potentiels sur la qualité de l'air.

**L'ampleur de ces effets dépend principalement de deux facteurs clés** : la nature du tir, notamment la quantité et le type d'explosifs utilisés, ainsi que la composition géologique et morphologique du substratum rocheux. Par exemple, les propriétés mécaniques de la roche, telles que sa densité, sa dureté et sa fracturation, influencent la propagation des ondes vibratoires dans le sol. De même, la topographie du site et la présence de formations géologiques particulières peuvent moduler la diffusion des ondes aériennes et l'étendue des projections.

Pour atténuer ces impacts, des mesures de contrôle et de surveillance sont mises en œuvre, notamment le suivi des vibrations et des niveaux sonores, ainsi que l'utilisation de techniques de minage optimisées pour limiter les charges explosives tout en assurant une fragmentation efficace de la roche. Ces pratiques visent à réduire les nuisances pour les populations locales et à préserver l'intégrité des écosystèmes environnants, tout en garantissant une exploitation durable et sécurisée du gisement. Le tableau (4.1) présente le mode de tir réalisé au niveau de la mine de Rouina.

**Tableau 4.1.** Caractéristiques des tirs réalisés au niveau de la mine de Rouina

Fréquence de tir	Opérateurs Forage et tir	Modalités d'utilisation des explosifs	Charges totales d'explosifs/tir	Charge unitaire
03 tirs par mois au maximum	Personnel spécialisé de la société SOMIFER	Acheminement des explosifs par la société sous-traitante ONEX, pour une utilisation dès réception (absence de stockage d'explosifs sur le site)	1300 kg	20Kg

### 3.5. Ondes de pressions dans le sol (vibrations)

#### 3.5.1. Analyse du phénomène vibratoire

##### **Le phénomène vibratoire et ses effets potentiels**

L'analyse des vibrations est cruciale pour évaluer les impacts des activités minières, en particulier lors de l'utilisation d'explosifs. Les vibrations, définies comme un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre, se décomposent en trois composantes : radiale, tangentielle et verticale. Ces composantes sont quantifiées par des paramètres tels que le déplacement, l'accélération, la vitesse particulière et la fréquence, qui aident à déterminer les

effets sur l'environnement et les structures avoisinantes.

La propagation des vibrations dans le sol peut provoquer des secousses susceptibles d'endommager des bâtiments, représentant ainsi un risque pour les personnes et les biens. L'étendue des dommages dépend de la robustesse des constructions et des caractéristiques des vibrations, notamment leur fréquence et leur vitesse. Par exemple, une vitesse particulière élevée à basse fréquence peut exacerber les effets sur des structures fragiles, surtout si elles sont proches du point d'explosion, rendant une planification rigoureuse des opérations de minage essentielle.

Les critères d'évaluation des dommages et les prescriptions réglementaires reposent sur des recherches, notamment celles du Groupement Français d'Énergie Explosive (GFEE), qui a désigné la vitesse particulière comme principal indicateur d'impact. Les fréquences inférieures à 5 Hz sont particulièrement nuisibles, car elles peuvent engendrer des résonances dans les bâtiments. La réglementation française, suivant les recommandations du GFEE, fixe un seuil de 10 mm/s pour les vibrations ressenties par les constructions, ajusté selon la fréquence avec une pondération de 5 pour les fréquences inférieures à 5 Hz. Cette approche vise à minimiser les risques, y compris ceux liés à des microfissures, en appliquant le principe de précaution. Bien que des vitesses supérieures à 10 mm/s puissent être tolérées sans dommages majeurs, la réglementation favorise une large marge de sécurité pour protéger biens et personnes, indépendamment des spécificités géologiques.

**Tableau 4.2.** Apparition de dégâts consécutifs à des tirs de mines- **norme allemande DIN 4150-3:1999**

Type de dommage selon la vitesse des ondes dans le substratum	Vitesse particulière en mm/s		
	Sables, graviers, argiles saturées	Schistes, calcaires tendres	Granites, calcaires durs
Aucune formation de microfissure notable	18	36	72
Petites microfissures, chutes de plâtres	30	56	110
Apparition de fissures	41	81	160
Fissures importantes	61	115	230

### **3.5.2. Mesures d'atténuation**

Les mesures d'atténuation mises en place sur le site de la mine de Rouina visent à minimiser les impacts des opérations de minage, notamment les vibrations et les ondes de choc des tirs d'explosifs. Ces mesures reposent sur une méthode rigoureuse, impliquant des professionnels qualifiés et des protocoles de sécurité stricts. Les plans de tir sont élaborés par des experts certifiés, garantissant une maîtrise technique et une compréhension approfondie du gisement et de son environnement.

Chaque tir est préparé et exécuté par la même équipe, favorisant la continuité dans la gestion des opérations. Avant chaque tir, des calculs de sécurité déterminent les charges unitaires maximales admissibles, en tenant compte de la distance aux zones résidentielles, de la nature du substratum et des conditions topographiques. Cette approche préventive limite les risques de dommages liés aux vibrations et assure le respect des normes réglementaires.

Lorsque l'exploitation se rapproche de zones sensibles, des tirs préliminaires à charges réduites sont effectués pour évaluer les effets vibratoires. Les résultats permettent d'ajuster les plans de tir afin de réduire les impacts. Parallèlement, un programme de surveillance vibratoire est mis en place, avec des contrôles lors de chaque tir pour mesurer en temps réel les vitesses et fréquences des ondes générées. Ces données sont analysées pour adapter les charges d'explosifs en fonction des conditions géologiques.

La communication avec les parties prenantes, y compris les populations locales et les autorités, est également une priorité. Des rapports détaillés sur les contrôles vibratoires et les ajustements des plans de tir sont régulièrement partagés, renforçant la transparence et la confiance. Cette démarche proactive s'inscrit dans une logique de développement durable, cherchant à concilier les impératifs économiques de l'exploitation minière avec la préservation de l'environnement et la qualité de vie des communautés riveraines.

## **3.6. Ondes de pressions aériennes (détonations)**

### **3.6.1. Nature et impact du phénomène**

Lors d'un tir de mines, une partie de l'énergie libérée se manifeste sous forme d'ondes de pression aériennes, générant ce que l'on appelle communément une « détonation ». Ces ondes sonores, dont l'intensité dépasse souvent 100 décibels (dB), se propagent dans l'air et peuvent être perçues comme un bruit intense et soudain. Bien que ces émissions sonores soient de nature impulsionnelle et ne durent que quelques millisecondes, leur impact peut être significatif, en particulier pour les personnes situées à proximité du site minier. En effet, l'intensité du bruit diminue progressivement avec la distance, mais il reste suffisamment

puissant pour provoquer une sensation de surprise ou d'inconfort chez les riverains.

Il est important de noter que les niveaux sonores générés par un tir de mines ne peuvent pas être techniquement réduits à la source, car ils sont intrinsèquement liés au processus d'explosion. Cependant, des mesures peuvent être prises pour atténuer l'effet de surprise et la gêne ressentie par les populations avoisinantes. Par exemple, dans le cas de la carrière de Trévadoret, un signal sonore spécifique, tel qu'un klaxon, est utilisé pour avertir les riverains de l'imminence d'un tir. Cette pratique permet de préparer psychologiquement les personnes à l'événement, réduisant ainsi l'effet de surprise et le stress associé.

Bien que la détonation en elle-même ne provoque pas de gêne auditive prolongée, son caractère soudain et intense peut être perçu comme désagréable, voire perturbant. De plus, des études ont montré que la perception de ces détonations peut être amplifiée lorsque les ondes de pression aériennes sont accompagnées de vibrations transmises à travers le sol. Cette combinaison de surpression aérienne et de vibrations peut créer une expérience sensorielle plus marquée, augmentant ainsi l'inconfort ressenti. Par exemple, une personne située à proximité du site pourrait non seulement entendre le bruit de l'explosion, mais aussi ressentir les secousses associées, ce qui renforce l'impact global du phénomène.

Pour mieux comprendre ces effets combinés, des outils tels que des abaques sont utilisés pour illustrer la relation entre la surpression aérienne, les vibrations et la perception humaine. Ces modèles permettent d'évaluer comment les différents paramètres, tels que la distance par rapport au site, la charge explosive utilisée et les caractéristiques du terrain, influencent l'expérience des riverains. En analysant ces données, il est possible d'adapter les pratiques de minage pour minimiser les nuisances, tout en tenant compte des contraintes techniques et opérationnelles.

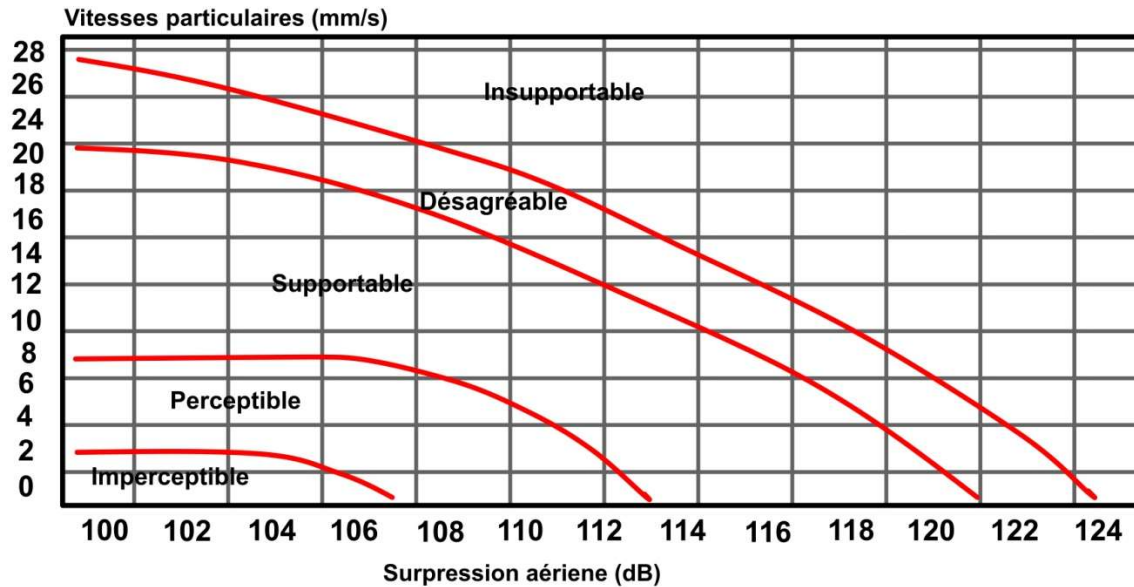


Figure 4.1. Sensibilité aux détonations de tirs-norme française NF S 31-085 (Octobre 2015)

### 3.6.2. Gestion des nuisances sonores des détonations minières:

Les niveaux sonores impulsionnels produits lors d'un tir de mines, bien que de courte durée, sont intrinsèquement liés au processus d'explosion et ne peuvent être techniquement atténués à la source. Ces émissions sonores, souvent perçues comme des détonations soudaines et intenses, peuvent provoquer un effet de surprise susceptible de causer une gêne, voire un certain inconfort, pour les personnes situées à proximité du site minier. Cependant, il est possible de réduire cet impact psychologique en mettant en place des mesures préventives simples mais efficaces. Par exemple, dans le cas de la mine de Rouina, l'émission d'un signal sonore distinctif, tel qu'une sirène, permet d'avertir les riverains de l'imminence d'un tir. Cette alerte sonore offre aux habitants un temps de préparation mentale, atténuant ainsi la sensation de surprise et le stress associé à l'événement.

Cette approche, bien que ne modifiant pas les niveaux sonores eux-mêmes, joue un rôle clé dans la gestion des perceptions et des réactions des populations locales. En informant les riverains à l'avance, on crée un climat de transparence et de confiance, tout en minimisant les désagréments liés aux activités minières. De plus, cette pratique s'inscrit dans une démarche plus large de responsabilité sociale, visant à concilier les impératifs techniques de l'exploitation avec le bien-être des communautés environnantes. Bien que les détonations restent inévitables, leur impact psychologique peut être significativement réduit grâce à des mesures de communication proactive et adaptée.

### **3.7. Projections de roches et de poussières**

#### **3.7.1. Identification des risques**

Lors des opérations de tir de mines, l'émission de poussières demeure généralement un phénomène limité dans le temps et l'espace. Toutefois, leur dispersion au-delà du périmètre du site peut survenir en présence de conditions météorologiques particulières, notamment en cas de vents soutenus favorisant leur transport. En revanche, les projections de roches représentent un danger plus significatif, notamment pour la sécurité des individus ou des animaux situés à proximité immédiate du point d'explosion ou sur la trajectoire des débris. Ce risque est particulièrement accru lors des phases d'exploitation des niveaux supérieurs d'une mine, où les forces en jeu et la hauteur des déblais peuvent amplifier la portée des projections.

La trajectoire des roches projetées dépend en grande partie de la configuration et de la préparation des trous de forage, notamment de leur orientation et de leur profondeur. Une planification rigoureuse du plan de tir permet de minimiser les risques en canalisant les projections dans des zones prédéfinies et sécurisées. Cependant, des erreurs dans la préparation ou l'exécution du tir peuvent entraîner des projections incontrôlées, susceptibles de dépasser les limites de la zone d'extraction. Ces situations, souvent liées à une mauvaise évaluation des paramètres techniques ou à des imprécisions dans la mise en œuvre, mettent en lumière l'importance d'une gestion minutieuse des opérations.

Les scénarios suivants décrivent les principales configurations susceptibles de générer des projections de roches, en mettant en évidence les facteurs techniques, environnementaux et opérationnels qui influencent leur occurrence et leur ampleur. Ces exemples illustrent la complexité des phénomènes en jeu et soulignent la nécessité d'une approche préventive pour anticiper et maîtriser les risques associés.

Les principales circonstances à l'origine de projections lors de tirs de mines, sont illustrées par les figures suivantes :

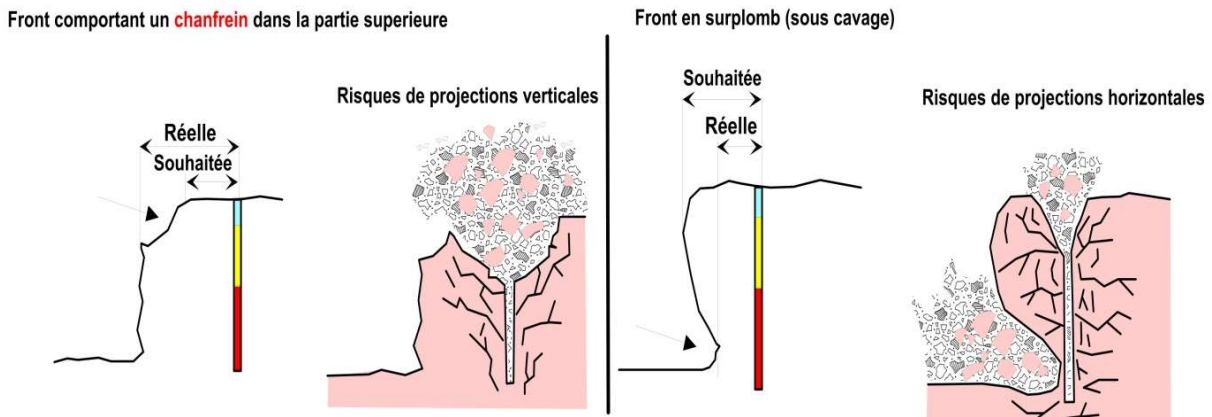


Figure 4.2. Projections liées à des irrégularités au niveau des fronts de tailles

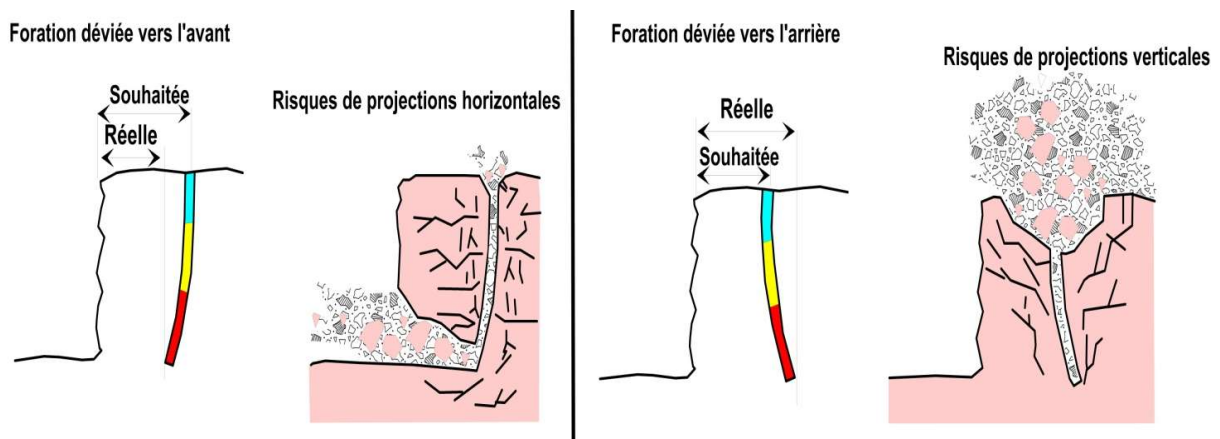


Figure 4.3. Projections liées à des déviations des forations

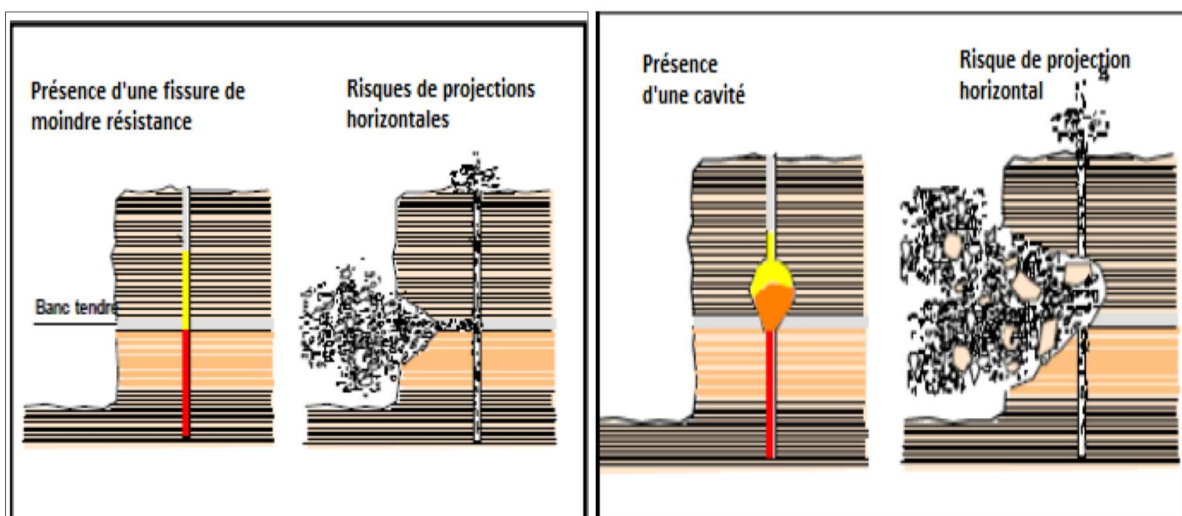


Figure 4.4. Projections liées à des faiblesses dans le massif

### **3.7.2. Dispositifs de prévention**

La prévention des risques liés aux projections de roches repose sur une planification minutieuse des tirs et une exécution précise des opérations. L'implantation des charges explosives, ainsi que l'inclinaison et l'orientation des forages, sont étudiées pour diriger les projections vers l'intérieur de la zone d'extraction, limitant ainsi les débordements. Les professionnels chargés de préparer les tirs ont une expertise approfondie des conditions techniques et environnementales, garantissant des plans de tir optimaux adaptés aux spécificités géologiques du site.

À la mine de Rouina, une attention particulière est portée à la précision des forages, depuis la profondeur jusqu'à l'alignement, pour assurer que les projections restent confinées. Des mesures préventives, combinées à une surveillance rigoureuse, visent à éliminer le risque de projections hors du périmètre d'exploitation. Avant chaque tir, une inspection systématique de la zone est effectuée pour s'assurer qu'aucune personne n'y est présente.

L'accès à la zone d'extraction est strictement contrôlé pendant les opérations, avec un périmètre fermé et surveillé par le personnel. Cette vigilance commence avant le tir et se prolonge jusqu'à ce qu'une inspection confirme l'absence de danger. Ces protocoles rigoureux, alliant préparation technique et vigilance humaine, sont essentiels pour garantir la sécurité des personnes et des biens.

## **3.8. Impacts sur les eaux**

### **3.8.1. Incidences sur les eaux souterraines**

La mine de Rouina exploite un gisement riche en hématite et goethite, situé dans un environnement géologique de calcaire et de schistes, ce qui influence les interactions entre les activités minières et les ressources en eau souterraine. Les roches présentent une faible porosité primaire, ce qui limite la circulation de l'eau, tandis que leur perméabilité, principalement due aux fractures formées par des processus tectoniques, permet l'infiltration des eaux souterraines. Cette hydrogéologie particulière a des implications pour la gestion des eaux, car toute perturbation des fractures, causée par les travaux miniers ou les vibrations des tirs, peut modifier les flux naturels. La faible capacité de stockage d'eau dans ces roches souligne l'importance des fractures comme voies de circulation. Une compréhension approfondie de la géométrie et de la densité de ces fractures est donc essentielle pour anticiper les impacts des activités minières sur les ressources en eau et pour développer des mesures de prévention appropriées.

### **3.8.2. Inventaire des effets possibles**

L'exploitation minière peut avoir des effets significatifs sur les eaux souterraines, notamment en altérant leur qualité. Cette dégradation peut se traduire par une augmentation des concentrations en hydrocarbures due à des fuites ou déversements accidentels. Des changements dans les paramètres physicochimiques, tels que le pH ou la concentration en métaux lourds, peuvent également entraîner la déstabilisation de minéraux auparavant protégés, libérant des substances nocives dans les eaux souterraines.

En outre, les activités minières perturbent les flux naturels des eaux souterraines. Les excavations et pompages peuvent provoquer un rabattement de la nappe phréatique, entraînant une baisse du niveau de l'eau qui affecte les écosystèmes environnants et les ressources en eau. L'ampleur de ce rabattement dépend de divers facteurs, notamment la profondeur des travaux et la perméabilité des formations géologiques. Des terrains perméables peuvent faciliter un rabattement plus étendu, tandis que des formations moins perméables limiteront cet effet. Ces impacts soulignent la nécessité d'une gestion rigoureuse des ressources en eau dans les projets miniers. Une compréhension approfondie des caractéristiques hydrogéologiques et la mise en œuvre de mesures de surveillance et de prévention sont essentielles pour préserver la qualité et la disponibilité des eaux souterraines.

### **3.8.3. Effets des vibrations sur les eaux souterraines**

Les vibrations générées par les tirs à l'explosif lors des opérations minières peuvent affecter les eaux souterraines, tant en quantité qu'en qualité. Concernant les effets quantitatifs, ces vibrations peuvent influencer la piézométrie locale, touchant particulièrement deux types d'aquifères : un aquifère superficiel dans les couches altérées près de la surface, accessible par des puits peu profonds, et un aquifère plus profond, généralement situé entre 50 et 100 mètres, où l'eau circule à travers les fractures. À la mine de Rouina, la nappe phréatique se situe à environ 180 mètres de profondeur. Les extractions atteignant 190 mètres devraient limiter le rabattement de la nappe aux zones périphériques, sans affecter les ressources en dehors du périmètre d'exploitation. Le barrage d'Ouled Mellouk, situé à 700 mètres à l'est, est protégé des vibrations par une formation de schistes, garantissant l'intégrité de ses ressources.

Sur le plan qualitatif, des mesures strictes sont mises en œuvre pour prévenir la contamination des eaux souterraines. Des plateformes en dur sont utilisées pour le stockage des fûts d'huile et le lavage des engins, évitant ainsi des déversements accidentels d'hydrocarbures. De plus, les matières en suspension (MES) sont décantées avant tout rejet, réduisant les risques de pollution. Dans les zones décapées, l'infiltration d'eau est quasi inexistante, limitant encore les risques de contamination des eaux souterraines par les activités minières.

### 3.9. Incidences sur les zones humides

#### 3.9.1. les zones humides

Les zones humides sont des écosystèmes uniques caractérisés par des sols régulièrement inondés ou saturés d'eau. Elles abritent une végétation hygrophile adaptée à ces conditions, jouant un rôle crucial dans l'équilibre environnemental. Hydrologiquement, elles régulent les flux d'eau, atténuent les crues et rechargent les nappes phréatiques. Biogéochimiquement, elles purifient l'eau en filtrant les polluants et en transformant des substances chimiques. Écologiquement, elles favorisent la biodiversité en hébergeant de nombreuses espèces spécifiques. Cependant, ces écosystèmes fragiles sont sensibles aux pressions anthropiques, telles que l'urbanisation, l'agriculture intensive et l'exploitation minière, rendant leur préservation essentielle pour maintenir leurs fonctions. Dans la région de la mine de Rouina, le barrage d'Ouled Mellouk régule un bassin versant de 876 km<sup>2</sup>, avec des précipitations annuelles de 461 mm et un apport liquide de 45 millions de mètres cubes. Malgré cela, le bassin subit une érosion significative, entraînant un engorgement du réservoir et réduisant sa capacité utile de 40 %. Les pertes d'eau par évaporation, atteignant 1 325 mm par an, influencent également la disponibilité des ressources en eau.

Ces caractéristiques soulignent l'importance d'une gestion durable des zones humides et des ressources en eau associées. Toute perturbation, qu'elle provienne d'activités minières ou d'autres facteurs, pourrait compromettre ces écosystèmes sensibles, affectant leur fonctionnalité écologique et leur rôle dans le cycle hydrologique.

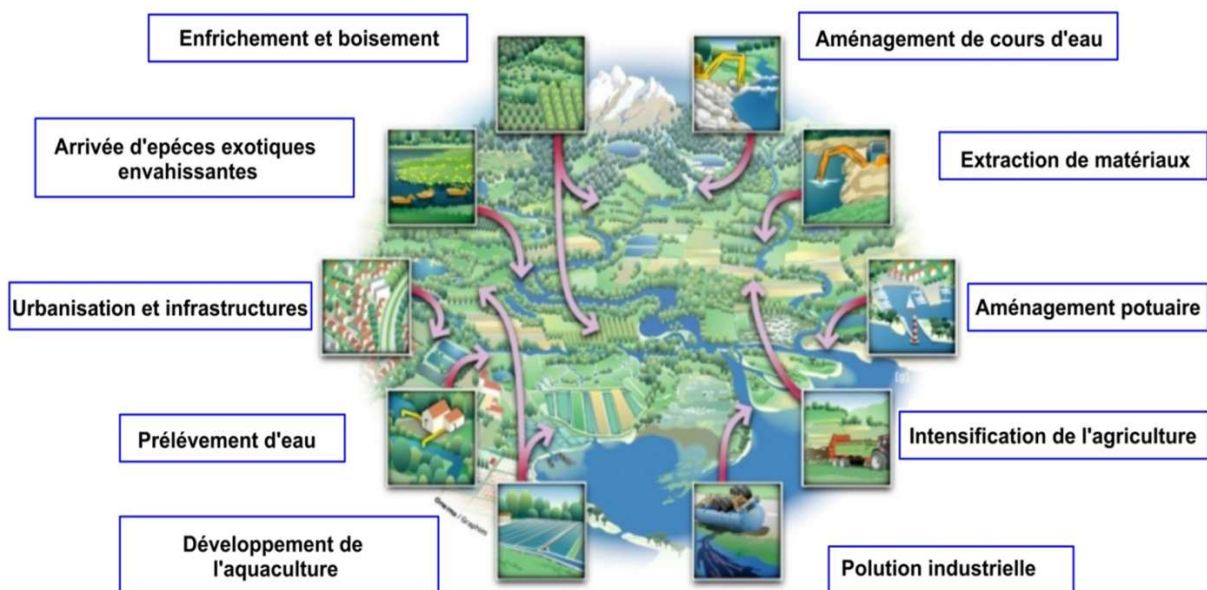


Figure 4.5. Principaux impacts sur les zones humides



**Figure 4.6.** Vue panoramique du barrage d'Ouled Mellouk

### **3.10. Impact de l'exploitation et mesures**

L'exploitation de la mine de Rouina a été planifiée pour minimiser les impacts sur les écosystèmes environnants, en particulier sur le barrage d'Ouled Mellouk. Une bande végétale de plus de 40 mètres de large sera aménagée entre les limites de l'excavation et cette zone humide, agissant comme une barrière naturelle pour protéger le barrage et maintenir la stabilité écologique et hydrologique de la région. Cet espace tampon permettra d'atténuer les impacts potentiels des activités minières, tels que les poussières et les perturbations du sol.

Il convient de souligner que l'exploitation de la carrière n'affectera pas l'alimentation en eau de la zone humide, qui dépend principalement des précipitations locales. Les techniques de tir, telles que la charge instantanée contrôlée et l'amorçage séquentiel, ont été choisies pour limiter les vibrations et les impacts sur les structures environnantes, y compris le barrage, réduisant ainsi les risques de dommages tout en assurant l'efficacité des opérations.

Concernant les infrastructures d'accès, des précautions ont été prises pour éviter toute perturbation des zones humides. Les pistes d'accès sont tracées sur des surfaces déjà dénudées,

évitant ainsi la création de fossés qui pourraient altérer le régime hydrologique local. Ces mesures témoignent d'une gestion responsable et respectueuse de l'environnement, visant à concilier les besoins de l'exploitation minière avec la protection des zones humides et des ressources en eau de la région.

### **3.11. Circuit des eaux**

La gestion des eaux sur le site de la mine de Rouina a été soigneusement planifiée pour assurer une collecte, un traitement et un rejet responsables des eaux d'exhaure et de ruissellement. Ces eaux, issues des infiltrations dans la fosse et des précipitations, seront dirigées vers un bassin spécialement aménagé au fond de l'excavation. Ce bassin, situé à une légère surprofondeur sur le dernier niveau exploité, à la cote de +220 mètres, servira de point de collecte central. Une fois rassemblées dans ce bassin, les eaux subiront un processus de décantation naturel, permettant aux matières en suspension et aux particules solides de se déposer au fond. Cette étape est essentielle pour réduire la turbidité et améliorer la qualité de l'eau avant son rejet dans l'environnement.

Après décantation, les eaux clarifiées seront pompées vers un fossé situé à la limite sud-ouest du site minier. Ce fossé, conçu pour acheminer les eaux en toute sécurité, les dirigera vers le milieu naturel environnant, où elles pourront rejoindre le cycle hydrologique local sans perturber les écosystèmes. Ce circuit des eaux a été pensé pour minimiser l'impact environnemental tout en garantissant une gestion efficace des ressources hydriques générées par les activités minières. En intégrant des étapes de décantation et de contrôle, ce système permet de respecter les normes environnementales et de préserver la qualité des eaux rejetées, contribuant ainsi à la durabilité des opérations minières et à la protection de l'environnement.

## **4. Conclusion**

Ce chapitre a examiné en profondeur les divers impacts environnementaux liés à l'exploitation minière, en soulignant les interactions complexes entre les activités minières et les écosystèmes. Les vibrations causées par les tirs à l'explosif, bien que perturbatrices, peuvent être maîtrisées grâce à des techniques de minage optimisées et à une surveillance rigoureuse. Les mesures d'atténuation, telles que l'ajustement des charges explosives et la création de zones tampons végétalisées, montrent qu'il est possible de concilier efficacité opérationnelle et protection de l'environnement.

Les impacts paysagers ont été abordés par une approche proactive, intégrant la réhabilitation progressive des fronts d'extraction et la préservation des éléments paysagers comme les haies et les zones humides, visant à réduire l'empreinte visuelle de l'exploitation minière. Ces efforts

s'inscrivent dans une démarche de développement durable, où la valorisation des ressources naturelles est couplée à la qualité de vie des populations locales.

Concernant les ressources en eau, les études démontrent que les impacts sur les eaux souterraines et de surface peuvent être limités par une gestion stricte des flux hydriques et des mesures préventives, telles que la création de bassins de décantation et la protection des zones humides. Les vibrations des tirs sont surveillées pour prévenir tout effet négatif sur les aquifères et les infrastructures hydrauliques.

Les nuisances sonores et les risques de projections de roches ont également été pris en compte, avec des solutions techniques et organisationnelles visant à réduire leur impact. L'utilisation de signaux d'avertissement avant les tirs et la formation du personnel contribuent à garantir la sécurité des travailleurs et des riverains.

Ce chapitre met en avant l'importance d'une approche intégrée et proactive dans la gestion des impacts environnementaux de l'exploitation minière. Les mesures mises en œuvre à la mine de Rouina illustrent la possibilité d'une exploitation durable, respectueuse des écosystèmes et préservant les ressources naturelles pour les générations futures, alliant innovation technique, responsabilité environnementale et engagement social.

# **Conclusion Générale**

## CONCLUSION GENERALE

Cette thèse a permis d'explorer en profondeur les impacts technico-économiques et environnementaux des tirs à l'explosif dans le contexte de l'exploitation minière, en se focalisant sur le cas fictif de la mine de fer de Rouina. Les résultats obtenus apportent des réponses claires à la problématique initiale, en démontrant que la qualité de la fragmentation des roches joue un rôle central dans l'efficacité des opérations minières. Une fragmentation optimisée influence directement la productivité, réduit les coûts d'exploitation et améliore la rentabilité globale des projets miniers. Par ailleurs, cette recherche a mis en évidence l'importance d'une gestion rigoureuse des paramètres d'abattage, tels que la charge explosive, la géométrie des tirs et les propriétés géologiques des roches, pour atteindre un équilibre entre performance économique et respect de l'environnement.

Sur le plan environnemental, les analyses ont révélé que les tirs à l'explosif, bien qu'indispensables pour l'extraction des minerais, génèrent des nuisances vibratoires et sonores susceptibles d'affecter les infrastructures avoisinantes et les populations locales. Les mesures d'atténuation proposées, notamment l'optimisation des charges explosives, la mise en place de protocoles de surveillance en temps réel et l'adoption de techniques de minage plus précises, se sont avérées essentielles pour limiter ces impacts. Ces solutions contribuent non seulement à préserver la sécurité des infrastructures et des habitants, mais aussi à renforcer la durabilité des opérations minières.

Cependant, un bilan critique de cette recherche met en lumière certaines limites. La variabilité des conditions géologiques sur le site de Rouina, ainsi que le manque de données historiques détaillées sur les impacts des tirs à l'explosif, ont constitué des défis méthodologiques importants. Ces contraintes ont parfois limité la généralisation des résultats et soulignent la nécessité de disposer de données plus complètes et standardisées pour des analyses plus robustes. Malgré ces limites, les avancées scientifiques et pratiques apportées par cette étude sont significatives.

Les contributions de cette thèse sont multiples. Sur le plan scientifique, elle enrichit la littérature existante en proposant une approche pluridisciplinaire qui intègre des dimensions technico-économiques, géologiques et environnementales. Sur le plan technique, elle fournit des outils et des recommandations concrètes pour optimiser les tirs à l'explosif, améliorer la qualité de la fragmentation et réduire les nuisances environnementales. Enfin, sur le plan

pratique, cette recherche offre des pistes d'action pour les acteurs de l'industrie minière, en alignant les pratiques d'exploitation sur les normes de sécurité et de durabilité actuelles.

Cette thèse ouvre également des perspectives prometteuses pour des recherches futures. Parmi les axes d'amélioration, l'intégration de technologies innovantes, telles que l'intelligence artificielle pour la prédiction des impacts vibratoires ou l'utilisation d'explosifs à faible impact environnemental, mérite d'être explorée. De plus, une évaluation des impacts à long terme des activités minières sur les écosystèmes et les communautés locales pourrait compléter les résultats obtenus. Enfin, une extension de cette étude à d'autres sites miniers, présentant des caractéristiques géologiques et opérationnelles différentes, permettrait de valider et d'élargir la portée des conclusions.

Cette thèse constitue une étape importante vers une exploitation minière plus durable et responsable. En conciliant performance économique, sécurité opérationnelle et respect de l'environnement, elle répond aux défis actuels et futurs de l'industrie extractive. Les résultats et les recommandations proposés offrent une base solide pour guider les décideurs, les ingénieurs et les chercheurs dans leurs efforts pour transformer les pratiques minières et contribuer à un développement plus équilibré et respectueux des ressources naturelles.

## REFERENCES

- [01] Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662.
- [01 bis] Lèbre, É. et al. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823.
- [01 ter] MERABET.D et al., 1997. Amélioration de la qualité de fragmentation des roches fissurées lors de l'abattage à l'explosif dans les mines à ciel ouvert, (*Revue Française De Géotechnique* N° 78 (1er trimestre 1997)).
- [02] KAMLI W., 2019. Influence du tir à l'explosif sur la stabilité des terrains, Cas de la mine de Fer de Boukhadra (Tébessa).
- [03] Etude des dangers de la demande de renouvellement et d'approfondissement de la carrière d'Eguenig (90), *Sciences Environnement* 12-200 (Oct 2014)
- [04] COULOMBEZ .C, 2011. Analyse Et Optimisation Des Pratiques D'abattage A L'explosif Dans Une Carrière De Granulats, ). *Journal of metamorphic geology*, 28 (2007) 41 p.
- [05] Scott A., Cameron A., 1988. The Field Evaluation of Explosives Performance. In *proceedings of the Explo '88 Conference*, pages 50 -58.
- [06] Hustrulid W.A., 1999. *Blasting Principles for Open Pit Mining*, volume I-II. Taylor & Francis.
- [07] McKenzie A.S., 1967. Optimum Blasting. In *Proceedings of the 28th Annual Minnesota Mining Symposium*, pages 181-188.
- [08] Brent G.F., 2010. Greenhouse gas implications of explosives and blasting. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 673-682.
- [09] SOMIFER-spa, 2024,. *Rapport géologique actualisé des mines de Rouina et Chaabet El Ballout*.
- [10] Du Mouza J., Aler J., 1993. Optimisation de la fragmentation des massifs rocheux à l'explosif: apports de la modélisation tridimensionnelle des discontinuités. In *Proceedings of the Alès International Summer School on Rock Blasting*, pages 456-469.
- [11] Hamdi E., 2003. Contribution à l'étude de l'interaction énergie explosive-massif rocheux en vue de la maîtrise de la fragmentation liée aux tirs. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris.
- [12] Bhandari S., 1997. *Engineering Rock Blasting Operations*. A.A. Balkema. ISBN : 90-5410-663-8.
- [13] U.S. Bureau of Reclamation., 2001. *Engineering Geology Field Manual*. ISBN : 978-0160617164.
- [14] Jimeno C.L., Jimeno E.L., Ayala Carcedo F.J., 1995. *Drilling and blasting of rocks*. Balkema. ISBN-13 : 978-1315141435.
- [15] Wild, W., 1984. *Sprengtechnik im Bergbau, Tunnel und Stollenbau sowie in Tagebauen und Steinbrüchen*. Verlag Glückauf GmbH. ISBN 3773904339.

- [16] Bohlooli B., Hoven E., 2007. A laboratory and full-scale study on the fragmentation behaviour of rocks. In *Engineering Geology*, volume 89 (1-2), pages 1-8. DOI:10.1016/j.enggeo.2006.05.010.
- [17] Steiner H.J., 1991. The Significance of the Rittinger Equation in Present-day Comminution Technology. In *Proceedings of the XVIIth International Mineral Processing Congress, Dresden 1991*, volume I, pages 177-188. DOI:10.1016/0032-5910(91)80102-o.
- [18] Steiner H.J., 1998. Zerkleinerungstechnische Eigenschaften von Gesteinen. In *Felsbau (Sonderdruck aus )*, volume 16, Nr.5, pages 320-325.
- [19] Onederra I. and Esen S., 2003. Selection of inter-hole and inter-row timing for surface blasting an approach based on burden relief analysis. In *Proceedings of the 3rd European Federation of Explosive Engineers (EFEE) Conference*. DOI 10.1201/9781439833476.ch33.
- [20] Persson P.-A., Holmberg R. and Lee J., 1994. Rock Blasting and Explosives Engineering, chapter 6. Principles of Charge Calculation For Surface Blasting, pages 184-185. CRC Press. DOI : 10.1201/9780203740514.
- [21] Day P.R., 1982. Controlled Blasting to Minimize Overbreak with Big Boreholes Underground. In *Proceedings 8th Conference on Explosives and Blasting Technique*, pages 264-271.
- [22] Ash R.L., 1963. The mechanics of rock breakage Part II : Standards for blasting design. In *Pit and Quarry* 56 (3), pages 118-122.
- [23] Hustrulid W., 2008. A gas pressure-based drift round blast design methodology. In *Proceedings of the 5th International Conference & Exhibition on Mass Mining*, pages 657-669.
- [24] Hagan T.N., 1983. The influence of Controllable Blast Parameters on Fragmentation and Mining Costs. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*.
- [25] Langefors U. and Kihlström H., 1963. *The Modern Technique of Rock Blasting*. John Wiley & Sons Inc. ISBN-13 : 978-0471515715.
- [26] Chiappetta R.F., 1998. Blast Monitoring Instrumentation and Analysis Techniques, With an Emphasis on Field Applications. In *FRAGBLAST-International Journal of Blasting and Fragmentation*, volume 2, No. 1, pages 79-122. DOI : 10.1080/13855149809408880.
- [27] Grange S., 2007. Expérimentation et modélisation de l'endommagement sous chargements dynamiques de deux roches calcaires. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan. Identifiant : thèse n° 2007DENS0029.
- [28] Blair D.P., 2010. Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 171-184.
- [29] Rossmanith H.P., Kouzniak N., 2004. Supersonic Detonation in Rock Mass - Part 2: Particle Displacements and Velocity Fields for Single and Multiple Non-Delayed and Delayed Detonating Blastholes. In *International Journal for Blasting and Fragmentation*, volume 8 (2), pages 95-117. DOI : 10.1080/13855140412331336179.

- [30] Cunningham C.V.B., 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pages 439-454. ISBN des actes : 978-9172608511.
- [31] Meyer J.-L., 2002. ~~Foration.~~ In Les Techniques de l'Industrie Minérale, volume N° 14 « TIRS » Tome 2: Applications et implications, pages 14-22.
- [32] Brinkmann J.R., 1990. An experimental study of the effects of shock and gas penetration in blasting. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting.
- [33] Drukovyani M.F., Kravisov V.S., Chernyavskii Y.E., Shelenok V.V., Reva N.P., Zver'kov, S.N., 1976. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. In Soviet Mining Science, pages 292-295.
- [34] Esen S., Onederra I., Bilgin H.A., 2003. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pages 485-495. DOI : 10.1016/S1365-1609(03)00018-2.
- [35] Rustan A., Nie S.L., 1978. New method to test the rock breaking properties of explosives in full-scale. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. DOI : 10.1080/09208119208944336.
- [36] Nielsen K., 1999. Economic effects of blasting on the crushing and grinding of ores. In Proceedings of the 6th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pages 251-256.
- [37] Hamdi E., Du Mouza J., Le Cléac'h J.-M., 2006. Micro-fragmentation energy evaluation in rock blasting. In Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pages 134-139.
- [38] Rinehart J., Pearson J., 1954. Behavior of metals under impulsive loads. Dover. - ISBN : 978-0486613604.
- [39] Christmann W., 1971. Le mécanisme du tir au rocher. In Revue de l'Industrie Minérale Mines, pages 134-145.
- [40] Persson P.-A., 1996. The relationship between strain energy, rock damage, fragmentation and throw in rock blasting. In Proceedings of the 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pages 113-120.
- [41] Moser P. and Grasedieck A., Du Mouza J. and Hamdi E., 2003. Breakage energy in rock blasting. In Proceedings of the 3rd European Federation of Explosive Engineers (EFEE) Conference, pages 323-334. DOI: 10.1201/9781439833476.ch39.
- [42] Saharan M.R., Mitri H.S., 2008. Numerical Procedure for Dynamic Simulation of Discrete Fractures Due to Blasting. In Rock Mechanics and Rock Engineering, pages 641-670. DOI : 10.1007/s00603-007-0136-9.
- [43] Malvard L.J., Crawford E., 1998. Dynamic increase factors for concrete. In 28th DDESB Seminar, pages 702-708.
- [44] Lu Y.B., Li Q.M., Ma G.W., 2010, Numerical investigation of the dynamic compressive strength of rocks based on split Hopkinson pressure bar tests. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, pages 829-838. DOI:10.1016/j.ijrmms.2010.03.013.

- [45] Rosin P., Rammler E., 1933. The laws governing fineness of powdered coal. In *J. Inst. Fuel*, volume 7 (31), pages 29-36.
- [46] M. Masson, L. Richard., 2023. Décomposition des distributions granulométriques issues des analyses par diffraction laser à des fins de bancarisation des données,
- [47] Ouchterlony F., 2005. The Swebrec function linking fragmentation by blasting and crushing. In *Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A)*, volume 114, pages A29-A44. DOI : 10.1179/037178405x44539.
- [48] Ouchterlony F., 2010. Fragmentation characterization; the Swebrec function and its use in blast engineering. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 3-22.
- [49] Kuznetsov V.M. (1973). The mean diameter of fragments formed by blasting rock. In *Soviet Mining Science*, volume 9 (2), pages 144-148. DOI: 10.1007/bf02506177.
- [50] Lilly P., 1986. An empirical method of assessing rock mass blastability. In *Proc. Large Open Pit Mining Conference (AusIMM)*, pages 89-92.
- [51] Ouchterlony F. and Moser P., 2006. Likenesses and differences in the fragmentation of fullscale and model-scale blasts. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 207-220.
- [52] Bergmann O.R., Riggle J.W. and Wu F.C., 1973. Model rock blasting Effect of explosives properties and other variables on blasting results. In *International J Rock Mechanics & Mining Sciences*, volume 10 (6), pages 585-612. DOI :10.1016/0148-9062(73)90007-7.
- [53] Kou, S., Rustan, A., 1993. Computerized Design and Result Prediction of Bench Blasting. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Vienna, Austria, 263-271.
- [54] Ouchterlony F., 2005. What does the fragment size distribution of blasted rock look like .In *Proceedings of the 4th European Federation of Explosive Engineers (EFEE) Conference*, pages 189-199.
- [55] Ouchterlony F., 2010. A common form for fragment size distributions from blasting and a derivation of a generalized Kuznetsov's X50 equation. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pages 199-208.
- [56] Ouchterlony F.,2022. Influence of blasting on the size distribution and properties of muckpile fragments, a state-of-the-art review. Technical report, Swedish Blasting Research Centre (SWEBREC) - Luleå University of Technology, December 2002. MinFo Project P2000-10: Energioptimering vid netbrytning / Energy optimization in comminution.
- [57] Maurice. M., 1951. La présence de structures obliques dans l'ATLAS Tellien de la province d'Alger , DOI :10.2113/gssgfbull.s6-i.8.693.
- [58] Claude Lepvrier et Jean Magné,1975. Le Néogène « Postnappes » du Tell septentrional à l'Ouest d'Alger. DOI :10.2113/gssgfbull.s7-xvii.4.612.
- [59] Kireche, O.,1977. Etude géologique structurale des massifs de la plaine du Chélif (Doui, Rouina, Temoulga).
- [60] Alain Perrodon,1957. Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale.

- [61] Louis Glangeaud, 1932. Étude géologique de la région littorale de la province d'Alger. ISBN : 978-1246570311.
- [62] J. Cuvillier et V. Sacal ,1951. Corrélations Stratigraphiques Par Microfaciès en Aquitaine Occidentale. DOI : 10.1163/9789004627758\_002.
- [63] Guillermo Colom, 1955. Jurassic-Cretaceous Pelagic Sediments of the Western Mediterranean Zone and the Atlantic Area.
- [64] Kireche, O., 1993. Evolution géodynamique de la marge tellienne des Maghrébide d'après l'étude du domaine parautochtone schistosé (massifs du Chélif et d'Oranie, de Blida BouMaad, des Babors et Bibon).