RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Minier

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Minier

---

Conception et analyse du rapport entre forabilité et propriétés géotechniques des calcaires : Application à la carrière SCMI Meftah (Groupe GICA)

Réalisé par :

RAHIM Abderrahmane & BOUKNI Mohamed Amine

Sous la direction de : **Pr. YAHYAOUI Sami (ENP)**

Présenté et soutenu publiquement le : **29/06/2025**

Composition du jury :

Président :	Pr. CHANANE Larouci	(ENP)
Promoteur :	Pr. YAHYAOUI Sami	(ENP)
Examinateur :	Pr. AKKAL Rezki	(ENP)

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département Génie Minier

Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Minier

---

Conception et analyse du rapport entre forabilité et propriétés géotechniques des calcaires : Application à la carrière SCMI Meftah (Groupe GICA)

Réalisé par :

RAHIM Abderrahmane & BOUKNI Mohamed Amine

Sous la direction de : **Pr. YAHYAOUI Sami (ENP)**

Présenté et soutenu publiquement le : **29/06/2025**

Composition du jury :

Président :	Pr. CHANANE Larouci	(ENP)
Promoteur :	Pr. YAHYAOUI Sami	(ENP)
Examinateur :	Pr. AKKAL Rezki	(ENP)

التلخيص

يعالج هذا العمل العلاقة بين الخصائص الجيوميكانيكية للصخور الجيرية وقابليتها للحفر .تم أخذ عينات من ثلاث مناطق مختلفة في مقلع تابع لشركة SCMI (فرع لمجموعة GICA) ، وأجريت عليها اختبارات مخبرية متنوعة ، مثل الكتلة الحجمية، الكثافة، مقاومة الضغط الأحادي، اختبار البرازيل والانضغاط النقطي .تم حساب مؤشر قابلية الحفر لكل منطقة، ثم أُجري تحليل إحصائي لتحديد الترابط بين خصائص الصخور وأداء الحفر .حادث تقني حقيقي أثناء التدريب)انكسار قضيب الحفر (أبرز أهمية هذا البحث .ينقسم العمل إلى خمسة فصول تهدف إلى تقديم منهجية مفيدة للممارسين في مجال الحفر بالمقالع

:الكلمات المفتاحية

GICA، مجموعة SCMI، الصخور الجيرية، الخصائص الجيوميكانيكية، قابلية الحفر، الحفر في المقالع، شركة مقاومة الضغط الأحادي، مقاومة الشد البرازيلي، اختبار التحميل النقطي، الكثافة الحجمية، العلاقة الإحصائية، أداء الحفر، فشل قضيب الحفر، تدريب ميداني، مؤشر قابلية الحفر.

Abstract

This study explores how limestone's geomechanical properties influence its Drillability. Carried out samples from a quarry exploited by SCMI (part of the GICA group), the research focused on three separate zones. Laboratory tests were performed to measure physical and mechanical parameters such as dry/wet density, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and point load strength. Based on these results, a Drillability index was calculated. The statistical analysis aimed to highlight correlations that could help improve drilling strategies. A notable drilling failure observed during a site internship revealed how essential it is to align equipment and rock characteristics. The research work is divided into five chapters, concluding with recommendations to assist future limestone quarry drilling operations.

Keywords:

geomechanical properties, Drillability, quarry drilling, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, statistical correlation, drilling performance, Drillability index.

Résumé

Ce travail traite du lien entre les propriétés géomécaniques des roches calcaires et leur aptitude au forage. Dans le cadre d'une étude appliquée à une carrière exploitée par la SCMI (filiale du groupe GICA), des échantillons ont été prélevés dans trois zones différentes. Plusieurs essais en laboratoire ont été effectués : masse volumique, compression uniaxiale, essai brésilien et essai de compression ponctuelle. À partir de ces données, un indice de forabilité a été déterminé pour chaque zone. L'analyse statistique des résultats vise à établir des corrélations exploitables entre la nature géotechnique des roches et les performances de forage observées. Un incident technique réel, survenu lors d'un stage (rupture d'une tige de forage) a renforcé l'intérêt de ce sujet.

ce mémoire est structuré en cinq chapitres, du contexte géologique aux recommandations pratiques, afin de proposer une démarche utile aux professionnels du secteur.

Mots-clés :

Propriétés géomécaniques, Forage en carrière, Indice de forabilité, Résistance à la compression, Essai brésilien, Analyse statistique, Performance de forage.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour mener ce travail à terme.

Nos plus sincères remerciements vont au professeur YAHYAOUI Sami, notre promoteur, pour son encadrement exceptionnel, ses conseils avisés et son soutien indéfectible tout au long de ce projet. Son expertise et son implication ont été pour nous une source d'ins- pirations et de rigueur scientifique. Nous tenons également à souligner son rôle essentiel, ses efforts immenses et sa contribution significative au rayonnement et à l'évolution du département de Génie Minier.

Nous adressons également notre gratitude aux membres du jury, Monsieur CHANANE Larouci et Monsieur AKKAL Rezki, pour l'honneur qu'ils nous font en prenant le temps de lire et avoir accepté d'évaluer notre travail et de participer à cette étape cruciale de notre parcours académique ; Outre leur rôle d'évaluateurs, ils ont également contribué à notre encadrement en tant qu'enseignants dévoués, ils ont toujours su transmettre leur savoir avec passion et exigence, contribuant à notre formation tant sur le plan théorique que pratique. C'est un privilège de bénéficier de leur expertise, et nous leur exprimons notre sincère et profonde reconnaissance.

nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et notre profonde gratitude à monsieur Amir BOUSTILA, notre enseignant, qui a été pleinement engagée dans ce projet qu'il a tenu à encadrer conjointement avec le Pr YAHYAOUI. Il nous a fourni une documentation de premier ordre et a suivi nos expérimentations, lesquelles sont analysées et débattues pour être validées. Ses remarques pertinentes et ses encouragements tout au long du projet ont grandement enrichi notre réflexion et notre travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement l'ensemble du corps enseignants du Département de Génie Minier, pour la qualité de la formation reçue tout au long de ces années. Leur engagement, leur disponibilité et leur exigence ont été essentiels à notre progression, tant sur le plan académique que professionnel.

Nous remercions chaleureusement toute l'équipe de la carrière SCMI Meftah (Groupe GICA) pour leur accompagnement et pour nous avoir fourni les échantillons de Calcaire sans lesquels cette étude n'aurait pas été possible. En particulier, nous exprimons notre gratitude à Monsieur DERMOUCHE et DRAI pour ses précieuses informations et son aide.

Dédicace

Notre gratitude va également au laboratoire de recherche des mines de l'école d'Annaba, qui nous ont permis l'accès aux installations nécessaires à la réalisation de cette étude. Nous vous remercions sincèrement pour avoir ouvert vos portes et pour votre assistance.

Un grand merci à notre camarade l'ingénieur DJAHOUDI Mohammed pour les es- sais de la microscopie électronique à balayage (MEB) au niveau de notre laboratoire de département.

Enfin, un merci spécial à nos camarades de classe et amis pour leurs encouragements, leurs échanges intellectuels stimulants et pour tous les moments partagés. Votre soutien a été inestimable pour la réussite de ce projet.

RAHIM Abderrahmane et BOUKNI Mohamed Amine.

Dédicace

À mon père, Chaabane, parti trop tôt mais toujours présent en moi. Ton absence est un silence lourd, mais ton souvenir éclaire chacun de mes pas. Ce travail, je l'ai porté avec ton nom en tête, avec ta force dans le cœur.

À ma mère, Samia, pour tout ce que tu es : courage, tendresse, lumière. Tu es celle qui m'a appris à se tenir debout, à viser plus loin, à croire en moi. Ce mémoire, c'est aussi un bout de ton amour transformé en persévérance.

À ma sœur Maria et à mon frère Idir, pour vos sourires, vos mots simples mais puissants, vos silences complices. Merci d'avoir été là, tout simplement.

mon binôme Abderrahmane, pour ta présence fidèle et ton soutien indéfectible tout au long de ce projet de fin d'études. Bien plus qu'un simple partenaire de travail, tu as été un véritable compagnon de route, toujours prêt à donner le meilleur de toi-même. Ta persévérance et ta détermination ont marqué chacune des étapes de ce parcours. Je suis profondément reconnaissant d'avoir partagé ces six années de camaraderie, de défis et de réussites à tes côtés.

Et à mes précieux amis, qui ont su mettre des couleurs dans les moments difficiles, qui ont été soutien, rire, refuge et énergie. Je vous dois bien plus que des remerciements.

Ce mémoire, c'est un chemin que je n'ai jamais parcouru seul. À vous tous, je le dédie, avec tout mon cœur.

BOUKNI Mohamed Amine.

Dédicace

À ma mère et à mon père, pour l'amour infini, la tendresse et le soutien indéfectible de l'une, et pour la sagesse, la patience et les encouragements constants de l'autre. Ensemble, vous m'avez donné des ailes et guidé à chaque étape de ma vie, vous êtes le socle de tout ce que je suis.

À mon frère Mossaab, Dont l'amour et le soutien indéfectible ont été des lumières dans les moments les plus sombres. Tu as toujours été là, trouvant les mots justes et les gestes réconfortants, dissipant les peurs et rappelant l'essentiel. Ta confiance en moi a nourri mon courage, et ta fierté a donné un sens à chacun de mes efforts. Merci d'être ce frère au grand cœur, ce complice et cet allié sans pareil.

À mon binôme Amine, mon partenaire constant et compagnon d'efforts depuis six ans, toujours là pour relever les défis à mes côtés. Merci pour ta fidélité, ton soutien incon-additionnel, et ces heures de travail partagé qui transforment chaque obstacle en victoire commune. Ta présence rend ce voyage plus enrichissant, plus joyeux, et beaucoup moins solitaire.

À mes chers amis, Pour les moments précieux, les fous rires, les défis relevés ensemble et les souvenirs inoubliables. Vous avez été bien plus que des amis, vous avez été une famille avec laquelle j'ai partagé des joies, des peines, et des expériences qui ont forgé qui je suis aujourd'hui. Peu importe où la vie nous mènera, sachez que chacun de vous occupe une place spéciale dans mon cœur.

À nos compagnons de cursus universitaire, dont l'amitié, le soutien indéfectible et les échanges enrichissants ont illuminé ces années d'études. Ensemble, nous avons traversé des défis, partagé des rires et vécu des moments d'apprentissage inoubliables qui resteront gravés à jamais dans ma mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet. Votre soutien, vos encouragements et vos précieux mots de motivation ont été des sources d'inspiration inestimables. Ce travail est le reflet non seulement de nos efforts, mais aussi de votre bienveillance et de votre présence tout au long de ce parcours. Un grand merci à vous toutes et tous pour votre contribution et votre générosité !

RAHIM Abderrahmane.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

1 Présentation du site industriel et du contexte géologique. 21

1.1 Introduction 21

1.2 Présentation générale du site 22

1.3 Description de la carrière et de l'outil de forage utilisé 23

1.3.1 Caractéristiques géologiques et exploitation 24

1.3.2 Production et capacités 24

1.3.3 Engagement environnemental 24

1.3.4 indications 25

1.3.5 Le matériel utilisé pour le forage 25

1.4 Contexte géologique local 26

1.5 Description des zones d'échantillonnage 26

1.5.1 Zone 1 : 26

1.5.2 Zone 2 : 27

1.5.3 Zone 3 : 27

1.6 Analyse Synthétique des Trois Zones de Calcaire 28

1.6.1 Zone 1 : 28

1.6.2 Zone 2 : 29

1.6.3 Zone 3 : 30

1.7 Conclusion 31

2 Étude bibliographique sur le forage et les propriétés géotechniques des roches 32

2.1 Introduction 32

2.2 Le forage 33

2.2.1 Facteurs influençant le forage 33

2.3 forage minier 34

2.4 Les modes de forage 35

2.4.1 Forage percutant 36

2.4.2 Forage rotatif 38

2.4.3 Forage roto-percutant 40

2.5 Les propriétés géotechniques des roches 49

2.5.1 Les propriétés physiques des roches 50

2.5.2 Les propriétés mécaniques des roches 53

2.6 Conclusion 59

3 méthodologie appliquée aux prélèvements et aux essais en laboratoire.. 60

3.1 Introduction 61

3.2 La Vitesse de Pénétration 61

3.2.1 Etape 1 61

3.2.2 Etape 2 61

3.2.2.1 Zone 1 62

3.2.2.2 Zone2 64

3.2.2.3 Zone3 67

3.3 La préparation des échantillons 70

3.3.1 Sélection et préparation de l'échantillon 70

3.3.1.1 Description de l'appareil de carottage 71

3.3.2 Découpe et préparation des échantillons 72

3.3.3 Séchage 73

3.4 Essaie laboratoire : 74

3.4.1 Essaie pour les propriétés physiques 74
3.4.1.1 La masse volumique 75
3.4.1.2 Densité 76
3.4.2 Propriétés mécaniques étudiées 78
3.4.2.1 Résistance à la compression [l'essai Franklin] 78
3.4.2.2 Essai brésilien 80
3.5 Interprétation Géotechnique par Zone 83
3.5.1 a) Zone 1 83
3.5.2 b) Zone 2 83
3.5.3 c) Zone 3 83
3.5.4 Synthèse comparée des trois zones 84
3.5.5 Évaluation de l'Indice de Forabilité (IF) et Classification Df 85
3.6 Conclusion générale du chapitre 87

4 Présentation des résultats expérimentaux 88

4.1 Introduction 88
4.2 Résultats expérimentaux 90
4.3 Analyse des correlation graphiques 91
4.3.1 la vitesse de pénétration en fonction de la résistance à la compression Rc 91
4.3.2 Vitesse de pénétration en fonction de la masse volumique 93
4.3.3 Vitesse de pénétration en fonction de l'indice de forabilité (IF) 95
4.3.4 Analyse de la relation entre PR et la densité relative 97
4.4 Tableau récapitulatif des corrélations entre PR et les propriétés géotechniques… 99
4.5 Conclusion 100

5 Analyse statistique et modélisation de la forabilité 101

5.1 Introduction 102
5.2 Méthodologie d'analyse 103

5.2.1 Objectif de l'analyse 103
5.2.2 Paramètres étudiés 103
5.3 Méthodes statistiques utilisées 104
5.3.1 Corrélation de Pearson 104
5.3.2 Régressions linéaires simples 104
5.3.3 Validation du modèle et limites 105
5.4 Analyse de corrélation 105
5.5 Régressions linéaires simples 105
5.5.1 Vitesse de pénétration en fonction de R_c 105
5.5.2 Vitesse de pénétration en fonction de la masse volumique 105
5.5.3 Vitesse de pénétration en fonction de l'indice de forabilité 106
5.6 Modélisation par régression multiple 107
5.7 Proposition d'Outil Décisionnel et Analyse Économique 108
5.7.1 Matrice de sélection du mode de forage 108
5.7.2 Analyse détaillée des coûts de forage par zone 109
5.7.3 Sensibilité des paramètres géotechniques 109
5.7.4 Explication du graphique de sensibilité 110
5.8 Discussion 110
5.9 Conclusion 111

Bibliographie 113

Liste des tableaux

1.1 Comparaison des caractéristiques microstructurales et chimiques des échantillons de calcaire issu des trois zones

2.1 Variables d'exploitation du forage et leurs effets sur les différentes méthodes

2.2 Choix du mode de forage selon dureté et diamètre des trous

2.3 Classification de Df des roches

2.4 Classification qualitative de la vitesse de forage en fonction de l'indice Df

2.5 Classification du degré de forabilité des roches en fonction de l'indice If

2.6 Tableau de l'échelle de Mohs : dureté des minéraux de 1 (talc) à 10 (diamant)

2.7 .D'après Wilbur, 1982.Classification texturale et comportement au forage

2.8 Durée de vie des taillants de forage en fonction de l'abrasivité des roches

2.9 Évaluation qualitative de la nature des roches en fonction de leur vitesse de forage Classification des roches en fonction de leur résistance à la compression (Rc)

3.1 Données expérimentales de pénétrabilité (v = D/T) mesurée à différentes profondeurs (1 m, 3 m, 5 m) dans la Zone 1

3.2 illustratif réel sur la vitesse de pénétration dans bien zone3

3.3 Mesures de masse dans les trois zones

3.4 Tableau des Volumes par Zone

3.5 Les Masses Volumiques mesurées dans les différentes zones d'échantillonnage

3.6 Densités apparente, humide et sèche des échantillons de calcaire par zone

3.7 Résistance à la compression uniaxiale R_c par zone

3.8 Résistance à la traction indirecte (R_t) par zone

3.9 Synthèse comparée des propriétés mécaniques et de l'évaluation géotechnique des trois zones d'étude

3.10 Résultats de l'indice de forabilité (IF) et classification Df des trois zones calcaires

4.1 Paramètres physiques, mécaniques et opératoires mesurés et calculés pour les trois zones d'étude

4.2 Corrélations entre la vitesse de pénétration (PR) et divers paramètres géo-mécaniques

5.1 Synthèse des propriétés mécaniques, indice de forabilité et paramètres de forage

5.2 Corrélation entre la vitesse de pénétration, la résistance à la compression et l'efficacité économique du forage

Table des figures

1.1 Localisation géographique de l'usine SCMI Meftah Blida

1.2 Foreuse Power ROC D55 sur le terrain

1.3 Affleurement calcaire de la zone 1

1.4 Paroi inclinée avec discontinuité visible dans la zone 2

1.5 Massif calcaire observé dans la zone 3

1.6 Image SEM représentative de la zone 1

1.7 Image SEM représentative de la zone 2

1.8 Image SEM représentative de la zone 3

2.1 Schéma de forage percutant

2.2 Schéma représentatif du forage rotatif

2.3 Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant

2.4 Diagramme du domaine d'application des différents types de forage

2.5 Schéma du principe de l'essai de compression uniaxiale

2.6 Principe de l'essai de traction directe

2.7 Classification des roches selon la résistance à la traction (RT)

2.8 Schéma de l'essai brésilien (traction indirecte)

3.1 accrochage dans une fracture étroite de la zone 2

3.2 Appareil de carottage

3.3 Machine à Scier

3.4 Échantillons valides et non valides

3.5 Etuve pour séchage des échantillons

3.6 .Évolution de la masse volumique en fonction de l'état d'humidité du calcaire.

3.7 .Appareil d'essai Franklin pour la détermination de la résistance à la compression sur échantillon cylindrique

3.8 Échantillon placé pour l'essai brésilien (Laboratoire Mines et Métallurgie - ENSMM Annaba)

3.9 type valide et non valides des échantillons

4.1 Relation entre la vitesse de pénétration PR et la résistance à la compression R_c

4.2 Graphique représentant la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et l'indice de forabilité (IF)

4.3 Relation entre la vitesse de pénétration (PR) et la densité relative des roches calcaires

5.1 Influence des paramètres géotechniques sur la vitesse de pénétration (PR) — Analyse *corrélationnelle*

Liste des acronymes

SCMI	Société des Ciments de MEFTAH
GICA	Groupe Industriel des Ciments d'Algérie
UCS	Uniaxial Compressive Strength
BTS	Brazilian Tensile Strength
PLS	Point Load Strength
DRI	Drillability Index
IF	Indice de forabilité
PR	Vitesse de pénétration
Rc	Résistance à la compression
Rt	Résistance à la traction

Introduction Générale

Dans les projets de construction et d'exploitation des ressources naturelles, le comportement des roches constitue un facteur déterminant pour garantir la sécurité, la stabilité et l'efficacité des ouvrages. Que ce soit dans le cadre de la réalisation de fondations profondes, de tunnels ou d'excavations industrielles, une connaissance approfondie des propriétés physiques et mécaniques des matériaux rocheux s'avère essentielle.

Parmi ces propriétés, la forabilité – c'est-à-dire la capacité d'un matériau rocheux à être traversé par un outil de forage – représente un critère technique clé dans la planifica- tion des travaux en carrière. Cette aptitude est fortement influencée par des paramètres internes à la roche, tels que sa densité, sa porosité, sa cohésion, ainsi que sa résistance à la compression et à la traction.

Dans un contexte où la fiabilité des opérations et la maîtrise des coûts sont primordiales, mais aussi d'éviter des incidents techniques coûteux établir une relation claire entre ces propriétés géotechniques et la forabilité permettrait non seulement de mieux anticiper les comportements en situation réelle.

Le présent mémoire vise à explorer le lien entre la forabilité de certaines roches calcaires et leurs propriétés géomécaniques mesurées en laboratoire. Cette analyse repose sur des prélèvements réalisés dans trois zones distinctes d'une carrière exploitée par la SCMI (filiale du groupe GICA), ainsi que sur une série d'essais physiques et mécaniques menés au sein du laboratoire de géotechnique de l'ENSMM.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Évaluer les caractéristiques physiques des échantillons prélevés (masse volumique, densité) dans leur état naturel, humide et sec.
- Déterminer la résistance mécanique des roches par des essais de compression uniaxiale, de traction indirecte (essai brésilien) et de compression ponctuelle (Franklin).
- Calculer un indice représentatif de la forabilité pour chaque zone étudiée.
- Analyser les corrélations statistiques entre cet indice et les autres paramètres mesurés.

Lors du stage technique mené au sein de la cimenterie SCMI Meftah, un événement marquant est survenu : la rupture d'une tige de forage en pleine opération. Cette panne brutale a non seulement entraîné une interruption du chantier, mais a également soulevé des interrogations sur l'adéquation entre les paramètres de forage appliqués et la nature des roches rencontrées. Cette expérience de terrain a mis en évidence l'importance d'une connaissance préalable des caractéristiques géotechniques des roches afin de prévenir de tels incidents.

Dans quelle mesure les propriétés géomécaniques des roches calcaires influencent-elles leur forabilité, et comment les variations entre les zones d'échantillonnage (Z1, Z2, Z3) peuvent-elles être exploitées pour ajuster les paramètres de forage ?

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres principaux. Le chapitre 1 est consacré à la présentation du site industriel étudié ainsi qu'à son contexte géologique. Le chapitre 2 propose une revue bibliographique détaillée sur les techniques de forage et les propriétés géotechniques des roches, permettant d'ancrer l'étude dans un cadre théorique solide. Le chapitre 3 décrit la méthodologie adoptée, en particulier les modalités de prélèvement et les différents essais réalisés en laboratoire. Le chapitre 4 rassemble les résultats expérimentaux obtenus et les observations effectuées sur le terrain. Enfin, le chapitre 5 se penche sur l'analyse statistique des données, mettant en évidence les corrélations entre les propriétés géotechniques et les performances de forage. Une synthèse finale viendra clore le travail en résumant les principaux enseignements tirés de l'étude et en proposant des pistes concrètes d'amélioration pour les futures campagnes de forage en milieu calcaire.

Chapitre 1

Présentation du site industriel et du contexte géologique.

Chapitre 1

Présentation du site industriel et du contexte géologique.

1.1 Introduction

L'analyse de la forabilité des roches calcaires dans un contexte industriel ne peut être dissociée de la compréhension globale du site d'exploitation. En effet, les performances de forage, la stabilité des talus, la qualité des matériaux extraits ainsi que les choix technologiques adoptés dépendent directement des caractéristiques géologiques et géotechniques du site concerné.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent chapitre, qui vise à dresser un panorama détaillé de la carrière exploitée par la Société des Ciments de Meftah (**SCMI**), filiale du Groupe **GICA**, localisée dans la wilaya de Blida.

Ce chapitre introduit successivement :

— la présentation générale du site industriel,

— les caractéristiques physiques et techniques de la carrière,

— le matériel de forage utilisé,

— ainsi que le contexte géologique local.

1.2 Présentation générale du site

Le présent travail a été réalisé dans le cadre d'un stage technique au sein de la So- ciété des Ciments de Meftah (SCMI), filiale du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA). Implantée dans la commune de Meftah (wilaya de Blida), la SCMI exploite une carrière de calcaire destinée à la production de ciment. Créée en 1975 avec une capacité annuelle de 1 million de tonnes, l'entreprise occupe une superficie de plus de 43 hectares et emploie près de 490 personnes. [1]

La production repose principalement sur l'extraction de calcaire et d'argile provenant des gisements locaux. Les matières premières sont ensuite transformées à travers diffé- rentes étapes de concassage, broyage, cuisson et homogénéisation. La cimenterie dispose d'un système intégré respectant les normes ISO 9001, 14001 et 45001, assurant un haut niveau de qualité, de sécurité et de respect environnemental.[1]

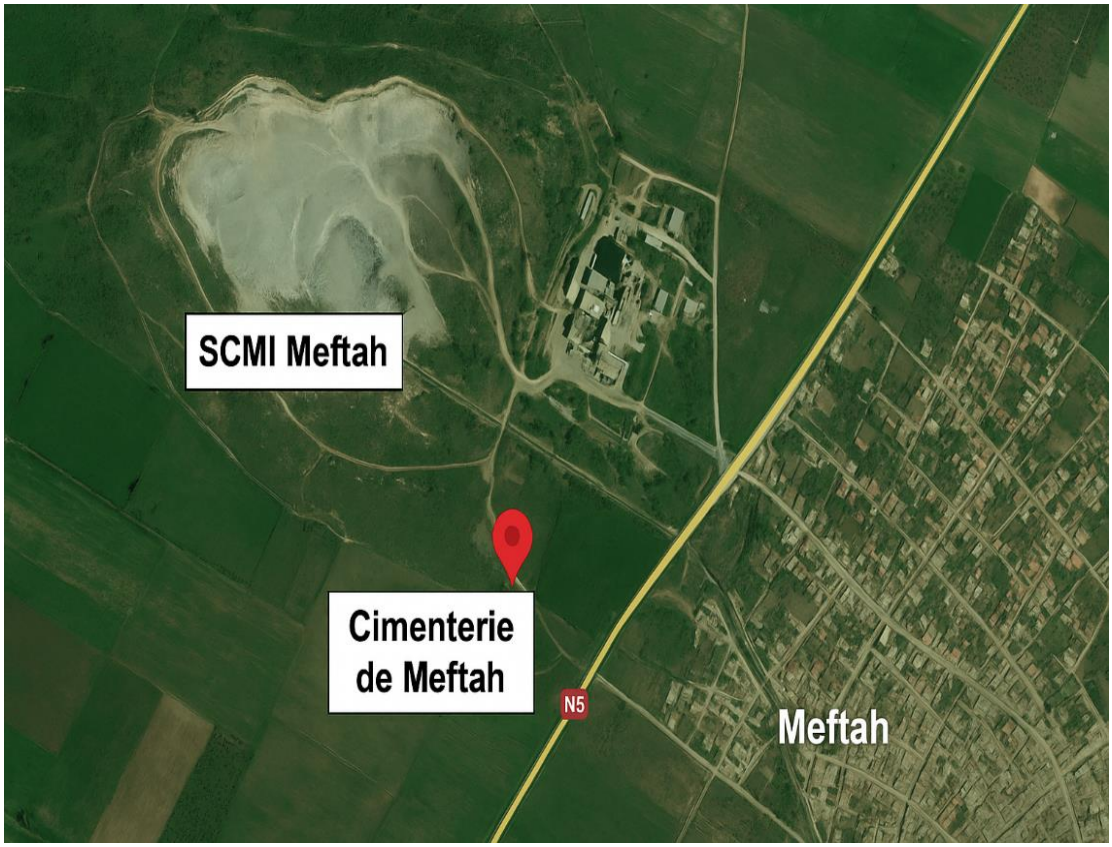

FIGURE 1.1 – Localisation géographique de l'usine SCMI Meftah Blida

google Earth

1.3 Description de la carrière et de l'outil de forage utilisé

la carrière de la Société des Ciments de la Mitidja (SCMI) à Meftah, située dans la wilaya de Blida, est une composante essentielle de la cimenterie de Meftah. Cette carrière est exploitée pour fournir le calcaire nécessaire à la production de ciment.[1]

1.3.1 Caractéristiques géologiques et exploitation

La carrière de Meftah est exploitée à ciel ouvert, principalement pour l'extraction de calcaire. Le gisement présente une stratification composée de trois couches principales :

- Couche 3A : Calcaire franc avec une cohésion de 218 kPa et un angle de frottement interne de 23°, indiquant une résistance mécanique modérée face au glissement
- Couche 3B : Calcaire gréseux avec une cohésion de 163 kPa et un angle de frottement interne de 21°
- Couche 3C : Calcaire gréseux avec une cohésion de 183 kPa et un angle de frottement interne de 22°.

Ces valeurs géomécaniques influencent la stabilité des talus, la méthode d'abattage, et la facilité de fragmentation du matériau. L'exploitation se fait par gradins, avec des hauteurs variant de 10 à 20 mètres selon les niveaux. L'abattage est réalisé à l'explosif, suivi par le chargement et le transport du calcaire vers la cimenterie.[2]

1.3.2 Production et capacités

La carrière de Meftah constitue une source stratégique d'approvisionnement en calcaire pour la cimenterie attenante. Elle assure une production annuelle moyenne estimée à 850 000 tonnes, ce qui permet de répondre aux besoins constants en matière première de l'industrie cimentière locale.[1]

Selon les données d'exploitation disponibles , la durée de vie résiduelle de la carrière est estimée à environ 18 ans, en tenant compte des taux d'extraction actuels et des volumes exploitables identifiés dans le plan de développement minier.[1]

1.3.3 Engagement environnemental

La SCMI adopte une démarche environnementale durable en intégrant des pratiques écoresponsables dans ses processus de production. Son engagement est reconnu par la certification ISO 14001 :2015, qui atteste de la mise en place d'un système de management environnemental visant à réduire ses impacts, respecter la réglementation, et améliorer ses performances écologiques de façon continue .[3]

1.3.4 indication

— **ISO** = International Organization for Standardization
— **14001** = Référence spécifique à la norme de management environnemental
— **2015** = Année de la version actuelle (publiée en septembre 2015)

Les entreprises peuvent obtenir une certification ISO 14001 :2015 après audit, ce qui prouve qu'elles ont mis en place un Système de Management Environnemental (SME) conforme.[3]

1.3.5 Le matériel utilisé pour le forage

L'entreprise utilise une foreuse Epiroc PowerROC D55, équipée d'un marteau fond de trou (DTH), capable d'atteindre des profondeurs de 30 mètres avec un diamètre de perçage variant de 90 mm à 152 mm. Cette machine, robuste et mobile, est adaptée aux terrains accidentés et assure un haut rendement même dans des roches dures.[4]

FIGURE 1.2 – Foreuse Power ROC D55 sur le terrain

1.4 Contexte géologique local

Le massif rocheux exploité dans la région de Meftah est composé de formations calcaires compactes, typiques des terrains sédimentaires d'origine marine. Ces calcaires, durs et peu altérés, présentent une structure homogène dans la majorité des fronts d'exploitation, ce qui en fait une matière première de choix pour l'industrie cimentière.

L'analyse stratigraphique locale met en évidence une dominance calcaire nette, avec une faible intercalation de couches marneuses ou argileuses. Cette particularité géologique confère au massif une bonne aptitude à l'extraction, notamment en termes de résistance mécanique et de stabilité des parois. Toutefois, la présence ponctuelle de terres fines plastiques (marnes ou argiles) peut engendrer des zones de faiblesse localisées, susceptibles de favoriser l'altération ou les infiltrations hydriques. [5]

Par ailleurs, des discontinuités géologiques ont été relevées dans certaines zones du gisement, notamment sous forme de failles, diaclases ou fractures ouvertes.

Ces discontinuités peuvent :

- affecter la cohésion locale du massif,
- altérer la stabilité des gradins d'exploitation,
- influer sur les performances de forage.[5]

1.5 Description des zones d'échantillonnage

Trois zones distinctes ont été délimitées sur le site d'exploitation afin d'y réaliser les prélèvements d'échantillons et les essais géotechniques associés :

1.5.1 Zone 1

Ce secteur se caractérise par un calcaire massif, homogène et faiblement stratifié, probablement liée aux effets de l'exposition prolongée aux conditions atmosphériques. Aucune fracture apparente ni discontinuité visible n'a été observée à l'œil nu, ce qui laisse présumer une bonne continuité du massif rocheux et une structure géomécanique favorable à l'exploitation.

FIGURE 1.3 – Affleurement calcaire de la zone 1

1.5.2 Zone 2

Caractérisée par une paroi rocheuse inclinée avec présence des failles. Une discontinuité latérale visible dans le massif.

Ce type de configuration est souvent source de contraintes techniques, comme en témoigne la casse d'une tige de forage survenue lors d'une opération dans cette zone.

FIGURE 1.4 – Paroi inclinée avec discontinuité latérale visible dans la zone 2

1.5.3 Zone 3

Le massif observé dans cette zone est essentiellement constitué de calcaire clair, dont la teinte varie du blanc châtre au beige. La roche présente une texture grenue à compacte, indiquant une cimentation relativement homogène. La surface est sèche et peu altérée, ce qui est caractéristique des milieux peu végétalisés et à faible humidité. Aucune anomalie géologique majeure (telles que des failles, plis ou poches d'altération) n'a été relevée, ce qui suggère un sous-sol stable et cohérent, favorable à l'exploitation et aux essais géotechniques.

FIGURE 1.5 – Massif calcaire observé dans la zone 3

1.6 Analyse Synthétique des Trois Zones de Calcaire

Cette partie propose une synthèse comparative des échantillons de calcaire prélevés dans trois zones géologiques distinctes du site. Les résultats présentés sont issus d'analyses SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy), réalisées dans des conditions expérimentales identiques, avec une tension d'accélération SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy)de 15,00 kV.[6]

L'analyse met en évidence les éléments chimiques majoritaires, les caractéristiques morphologiques ainsi que les structures microscopiques observées dans chaque zone.

Cette approche permet de comparer les différences minéralogiques et structurales entre les échantillons, en vue d'une meilleure compréhension des variations géotechniques

potentielles au sein du gisement.[6]

1.6.1 Zone 1

L'échantillon de la Zone 1 présente une structure relativement homogène avec une prédominance de calcium observée dans les images SEM. Les conditions de mesure indiquent un grossissement de x100 avec un champ de vision de 1.272 x 0.953 mm. Les taux de comptage avoisinent 8321 CPS avec un temps mort de 6 Pour-cent , ce qui reflète une qualité de signal correcte.

Cette zone semble correspondre à un calcaire dense et pur avec peu de porosité observable.

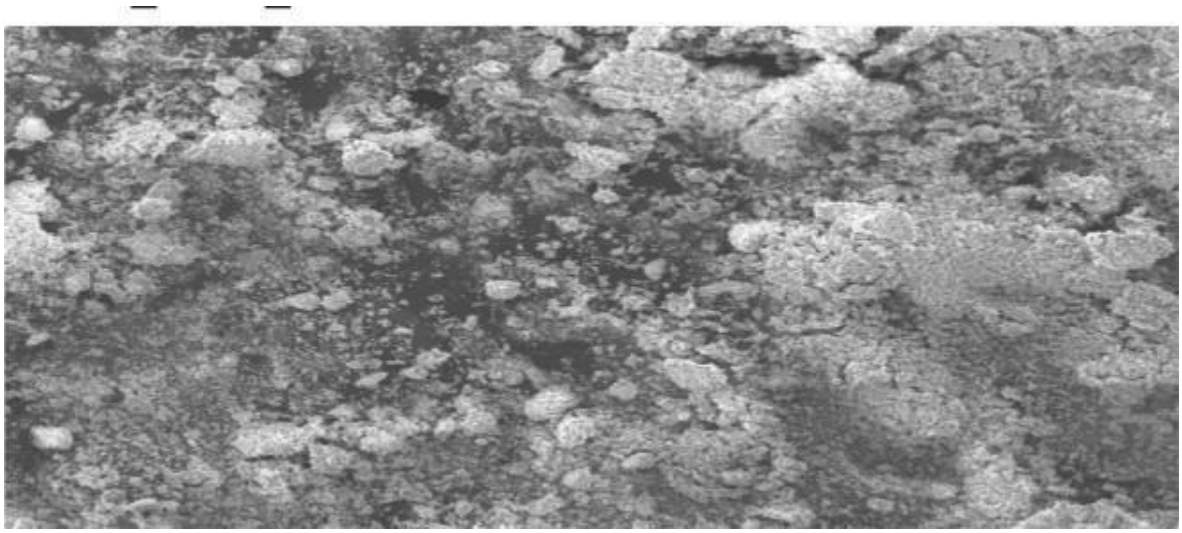

FIGURE 1.6 – Image SEM représentative dun échantillon prélevé de la zone 1

1.6.2 Zone 2

L'échantillon de la Zone 2 révèle une composition chimique dominée par la chaux CaO, Le grossissement utilisé était de x60 avec un FOV de 2.120 x 1.588 mm, ce qui a permis une vue d'ensemble plus large mais moins détaillée. Le taux de comptage est élevé à 8570 CPS. Des éléments traces comme le magnésium sont également détectés.

L'échantillon présente une texture plus poreuse par rapport à la Zone 1.

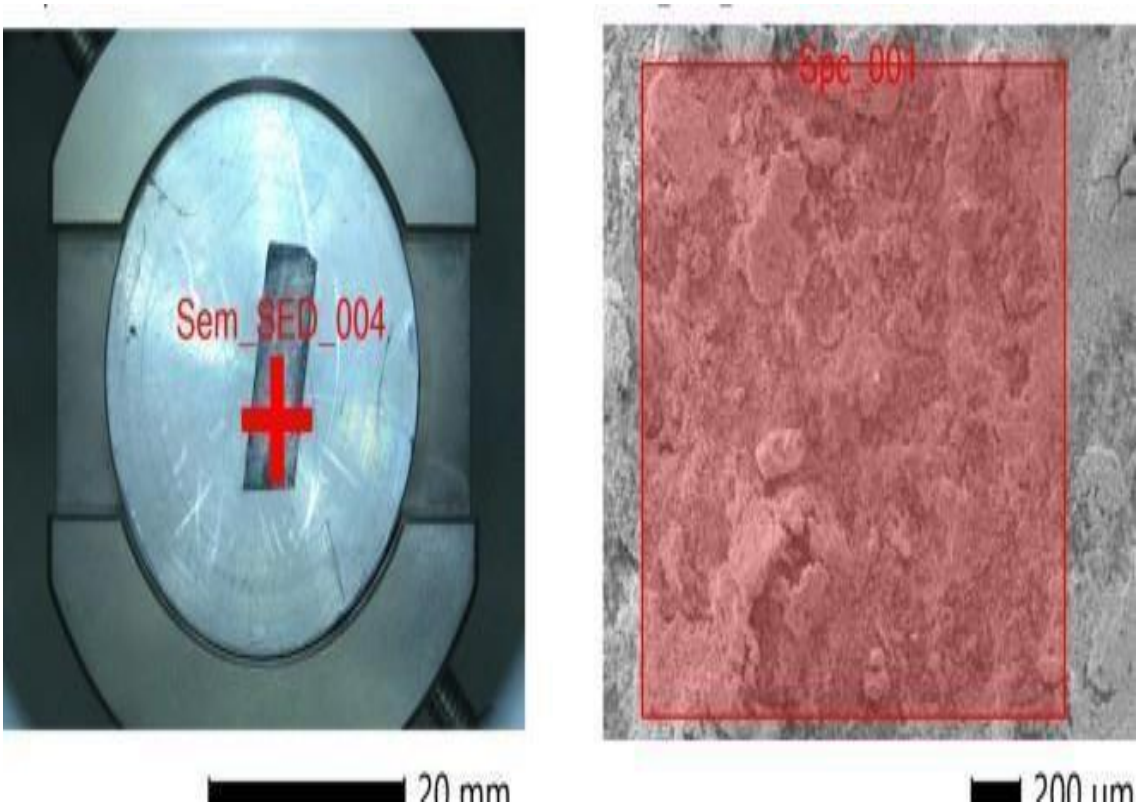

FIGURE 1.7 – Image SEM représentative dun échantillon prélevé de la zone 2

1.6.3 Zone 3

L'analyse de la Zone 3 met en évidence la chaux qui est exceptionnellement élevé (84.38 pour-cent) accompagné de faibles teneurs en oxygène et en silicium. Cela suggère un calcaire très pur, potentiellement plus cristallisé. Le grossissement x1000 donne accès à une structure fine où les cristaux sont bien distincts. Le taux de comptage est plus faible (2929 CPS), ce qui peut être dû à une compacité plus importante de l'échantillon ou à une rugosité plus faible.

Ce type de calcaire pourrait présenter de meilleures propriétés mécaniques mais une forabilité plus difficile.

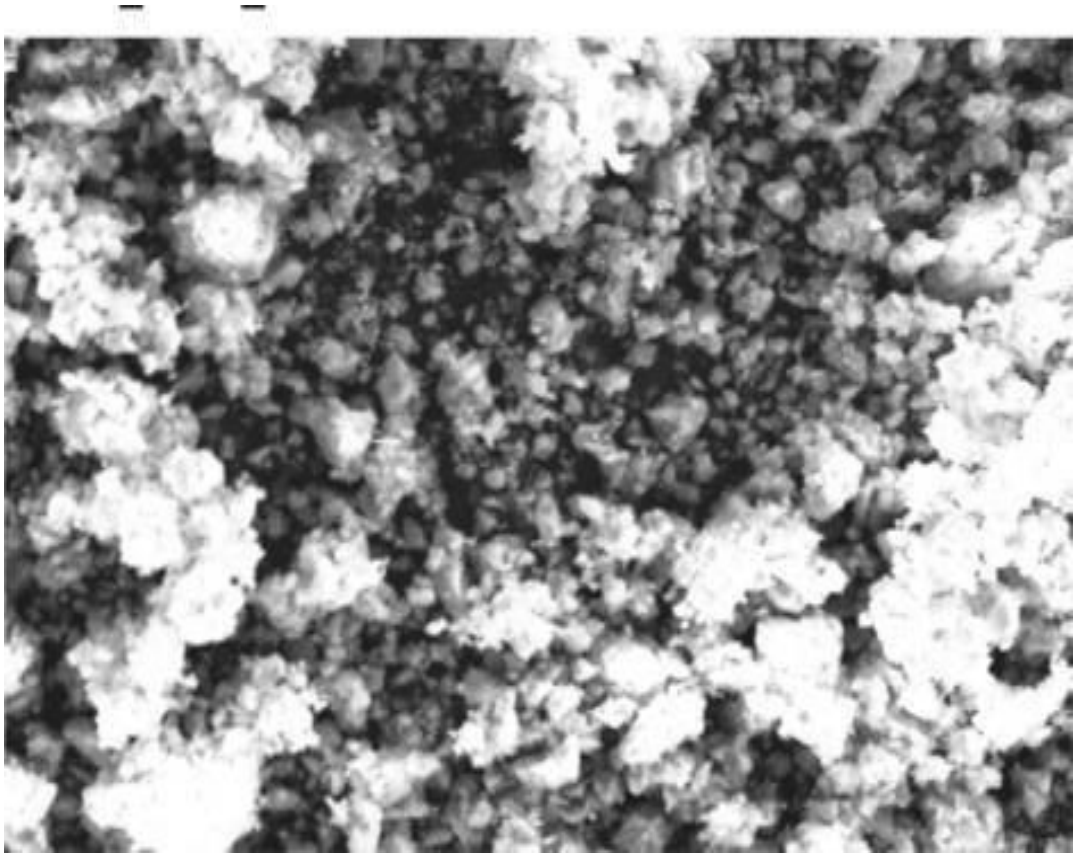

FIGURE 1.8 – Image SEM représentative dun échantillons prélevé de la zone 3

synthèse

La synthèse comparative présentée ci-dessous regroupe les principaux résultats des analyses SEM-EDS effectuées sur les échantillons prélevés dans les trois zones distinctes du site.

le tableau ci-dessous met en évidence les variations de structure, de composition chimique et de porosité, permettant d'interpréter l'influence de ces paramètres sur la forabilité et le comportement mécanique des roches calcaires. [6]

TABLEAU 1.1 – Comparaison des caractéristiques microstructurales et chimiques des échan- tillons de calcaire issu des trois zones

Paramètre	Zone 1	Zone 2	Zone 3
Structure observée	Homogène, dense	Plus poreuse	Très cristalline, compacte
Éléments dominants (EDS)	Calcium majori-taire	Oxygène(46,42 %),CaO(51,80 %)	Calcium très élevé (84,38 %)
Éléments traces	Non précisés	Présence de ma-gnésium	Faibles teneurs
Porosité apparente	Faible	Moyenne à éle-vée	Très faible
Interprétation pétrographique	Calcaire homo-gène, dense et pur	Calcaire avec porosité élevé	Calcaire pur et cristallisé
Impact potentiel sur la forabilité	Bonne forabilité attendue	Forabilité modé-rée à bonne	Forabilité plus difficile (roche plus dure)

1.7 Conclusion

L'analyse SEM-EDS menée sur les échantillons issus des trois zones met en évidence des variations notables en termes de composition chimique, de texture et de structure cristalline.

La Zone 3 se distingue par sa teneur très élevée en calcium et sa structure cristalline fine, ce qui suggère un calcaire pur et potentiellement plus dur, pouvant offrir de meilleures performances mécaniques, mais avec une forabilité plus complexe.

À l'inverse, la Zone 2, plus poreuse et moins cristallisée, présente une meilleure aptitude à la fragmentation, ce qui pourrait faciliter le forage, au détriment d'une résistance mécanique plus faible.

La Zone 1 offre un compromis intéressant entre homogénéité, densité laissant à envisager un comportement équilibré entre forabilité et résistance.

Ces différences microstructurales et chimiques doivent être prises en compte dans les choix techniques d'exploitation, notamment en ce qui concerne les paramètres de foration, d'abattage et d'optimisation des coûts de production.

Chapitre 2

Étude bibliographique sur le forage et les propriétés géotechniques des roches

Chapitre 2

Étude bibliographique sur le forage et les propriétés géotechniques des roches

2.1 Introduction

Dans le domaine des travaux géotechniques, le forage des roches constitue une opération incontournable, que ce soit pour la reconnaissance des sols, la mise en place de fondations profondes ou l'exploitation de matériaux. La réussite de ces travaux repose en grande partie sur la compréhension des caractéristiques des formations traversées, en particulier lorsque le projet concerne des massifs rocheux.

La forabilité, c'est-à-dire la capacité d'une roche à être perforée, varie considérablement selon sa nature et son état. Elle influence directement la durée d'exécution, l'usure des équipements, ainsi que le coût global du chantier. Il devient alors essentiel d'évaluer à l'avance les conditions du terrain afin de choisir des méthodes de forage adaptées et d'éviter les imprévus techniques.

Pour ce faire, l'étude des propriétés géotechniques des roches s'avère primordiale. Celles-ci englobent à la fois des propriétés physiques — telles que la densité, la porosité et des propriétés mécaniques notamment la résistance à la compression et à la traction. Ces paramètres permettent d'anticiper le comportement des matériaux lors des travaux, d'évaluer leur stabilité et d'estimer la difficulté du forage.

Dans ce chapitre, l'analyse se divise en deux grandes parties complémentaires :

- La première partie est consacrée aux principes généraux du forage, aux méthodes utilisées ainsi qu'à la notion d'indice de forabilité (If).
- La seconde partie aborde les propriétés géotechniques des roches, en mettant l'accent sur les paramètres physiques et mécaniques les plus influents dans le contexte du forage.

Cette double approche permettra d'établir une corrélation objective entre la nature des roches et leur comportement en phase de perforation, contribuant ainsi à une meilleure planification et à une exécution plus efficace des travaux.

2.2 Le forage

le forage constitue une phase initiale fondamentale dans le processus d'exploitation des roches en carrière, précédant les étapes du tir, du chargement et du transport. Il s'agit d'une opération mécanique visant à créer un orifice cylindrique au sein du massif rocheux par destruction locale de la matière. Cette destruction est obtenue grâce à des outils spécifiques agissant par cisaillement, coupe ou abrasion.[7]

D'un point de vue technique, on parle de forage lorsque le diamètre du trou ne dépasse pas 75 mm. Au-delà de cette limite, on utilise généralement le terme de sondage, bien que la forme reste cylindrique dans les deux cas.[8]

2.2.1 Facteurs influençant le forage

La performance d'un système de forage dépend d'un ensemble complexe de facteurs qui interviennent soit dans la pénétration de la roche, soit dans l'évacuation des déblais.

Ces facteurs peuvent être regroupés en six grandes familles : • Caractéristiques de la machine de forage

- Nature et géométrie des tiges
- Type d'outil de coupe
- Propriétés du fluide de circulation
- Configuration du trou de forage
- Propriétés de la roche

Ces éléments interagissent entre eux, mais leur effet global est fortement conditionné par les propriétés géomécaniques du massif rocheux. Les éléments des catégories 1 à 4 représentent les composantes du système de forage, que l'on désigne comme des variables d'opération. Ces paramètres, bien que souvent interdépendants, peuvent être ajustés dans certaines limites. Ils doivent être sélectionnés en fonction des conditions environnementales, notamment celles définies par la nature de la roche (catégorie 6).[9]

Ces variables opérationnelles sont essentielles et varient selon le type de système de forage utilisé. Elles sont répertoriées dans le Tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 – Variables d'exploitation du forage et leurs effets sur les différentes méthodes

Paramètre	**Percussion**	**Rotative**	**Roto-percutants**
Machine de forage : Puissance de forage	X	X	X
Poussée de forage	X	X	X
Couple de forage		X	X
Vitesse de forage		X	X
Énergie de coup			X
Fréquence de coup			X
Tige : Dimensions de tige	X	X	X
Géométrie de tige	X	X	X
Propriétés de matériels	X	X	X
Taillant : Diamètre de taillant	X	X	X
Géométrie de taillant	X	X	X
Propriétés de matériels	X	X	X
Fluide de circulation : Débit de fluide	X	X	X
Propriétés de matériels	X	X	X

Ce tableau compare l'influence des variables opérationnelles (machine, tige, taillant, fluide) sur les trois grands types de forage : percussion, rotatif et roto-percutant.

Il permet de visualiser rapidement quels paramètres sont critiques pour chaque méthode, facilitant le choix d'un système adapté selon les caractéristiques du terrain.[9]

Les facteurs de la roche (catégorie 6) sont des variables indépendantes, issues de l'environnement naturel qui influencent directement le processus de forage.

Ils se répartissent en trois sous-groupes :

- Propriétés physiques de la roche : résistance à la pénétration, porosité, teneur en eau, densité, dureté , résistance à la compression, coefficient de résistance, etc...
- Conditions géologiques : nature pétrographique, structure des couches, fracturation ,fissuration.
- État de contraintes : pression in situ et pression de pores.

En parallèle, un autre ensemble de facteurs, appelé facteur de service ou de chantier, bien qu'extérieurs au mécanisme de forage, peuvent grandement influencer ses performances. Ils incluent :

- l'organisation du travail.
- la qualité de la supervision.
- les conditions du site.
- l'échelle des opérations.
- la disponibilité énergétique.
- ainsi que les conditions météorologiques.[9]

2.3 forage minier

Le principe du forage minier repose sur le creusement de trous de dimensions précises (diamètre et profondeur), définies par un schéma de tir. L'outil de forage est appliqué contre la roche à l'aide d'une pression, combinée à un mouvement de rotation, ce qui permet sa pénétration. Les débris générés sont ensuite évacués vers la surface grâce à un flux d'air comprimé, assurant ainsi le nettoyage du trou. Pour améliorer l'efficacité du forage, les machines modernes intègrent une force de percussion en plus de la rotation. Cette technique est connue sous le nom de forage roto-percutant.[10]

Les mouvements de rotation, de descente et le soufflage d'air sont transmis par un train de tiges ou de tubes, qui entraîne un outil de forage (taillant, tricône ou outil de coupe) placé à la base du trou.[10]

En roto-percussion, un marteau (frappeur) est utilisé pour fournir des impacts supplémentaires. Il peut être positionné :

- En surface (hors du trou),
- Ou au fond du trou, entre le taillant et les tiges.

À partir de cela, on distingue quatre principales techniques de foration :

- Roto-percussion avec marteau hors du trou
- Roto-percussion avec marteau fond de trou
- Foration rotative avec outil à lames
- Foration rotative avec outil tricône.[10]

2.4 Les modes de forage

2.4.1 Forage percutant

il figure parmi les méthodes de creusement les plus anciennes, notamment par les civilisations chinoises pour la prospection d'eau souterraine. Son principe repose sur une technique simple mais efficace : un outil lourd, appelé trépan, est successivement soulevé puis relâché en chute libre afin de frapper et désagréger la roche.

La hauteur de chute et la fréquence des impacts sont ajustées en fonction de la dureté du sol.

Dans les versions modernes de cette technique, le mouvement de va-et-vient est assuré par un mécanisme articulé (bielle-manivelle) entraînant un balancier. Des dispositifs d'amortissement, tels que des ressorts placés sous la poulie de tête, permettent d'absorber les chocs et de prolonger la durée de vie des équipements. Ce mouvement vertical est parfois accompagné d'une légère rotation du trépan, ce qui permet à sa partie tranchante de couvrir uniformément toute la surface du forage. [11]

L'évacuation des débris rocheux est réalisée de manière intermittente à l'aide d'outils tels qu'une cuillère, une soupape ou une curette. Dans les terrains instables ou peu cohérents, l'utilisation d'un tubage à l'avancement est indispensable pour stabiliser les parois du trou, éviter les blocages de l'outil, et garantir la qualité des prélèvements. Avec l'évolution technologique, cette méthode a connu des améliorations significatives. Les équipements de forage percutant intègrent désormais des capteurs intelligents et des systèmes de surveillance en temps réel. [11]

Ces dispositifs permettent de suivre des variables critiques telles que la vitesse de chute du trépan, la fréquence des impacts ou encore la résistance de la roche rencontrée.

Cette digitalisation contribue à optimiser les performances, à améliorer la sécurité des opérations, à anticiper l'usure du matériel et à adapter automatiquement les réglages selon la nature du terrain (Kennedy, 1990).[10]

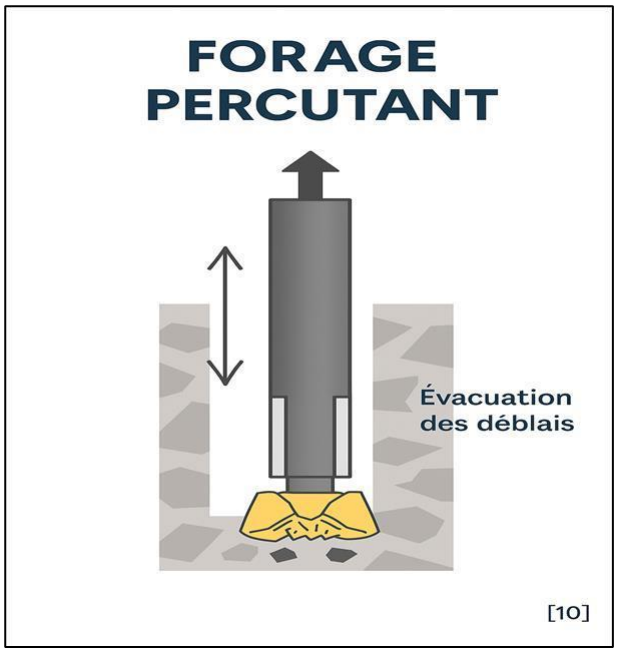

FIGURE 2.1 – Schéma de forage percutant

Cette figure illustre le fonctionnement de la méthode de forage percutant, dans laquelle un trépan est successivement levé puis relâché pour frapper la roche. Le schéma met en évidence les éléments mécaniques essentiels : système bielle-manivelle, mouvement vertical, et dispositif de récupération des déblais. Cette technique est particulièrement adaptée aux terrains durs et a été modernisée avec des capteurs de surveillance en temps réel.[10]

2.4.2 Forage rotatif

Dans certaines opérations de forage minier, notamment dans des formations dures ou sèches, la boue de forage est remplacée par de l'air comprimé. Cette méthode est souvent utilisée en forage rotatif ou roto-percussif pour améliorer la vitesse de pénétration et éviter les problèmes liés aux fluides (pertes de boue, gonflement d'argile, etc.).

Principe de fonctionnement

- Un compresseur injecte de l'air comprimé à haute pression dans le train de tiges.
- L'air circule à travers les tiges jusqu'à la tête de forage, puis sort par des orifices situés à la base du trépan.
- À la sortie, l'air soulève et entraîne les cuttings (déblais de forage) générés par la rotation ou la percussion de l'outil.

Ces particules sont remontées en surface à travers l'espace annulaire entre les tiges et la paroi du trou. Le foreur peut agir sur trois paramètres essentiels qui influencent directement la progression de l'outil dans le sol :

- La vitesse de rotation,
- Le poids appliqué sur l'outil,
- Le débit du fluide de circulation (boue ou air comprimé). [10]

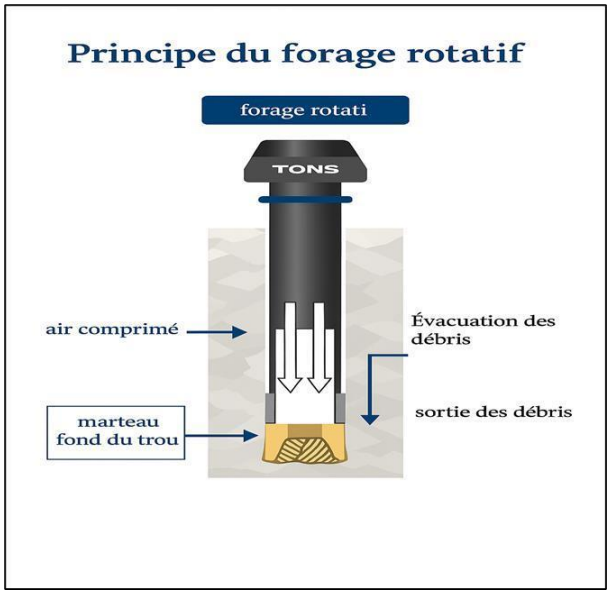

FIGURE 2.2 – Schéma représentatif du forage rotatif.[11]

Ce schéma présente la méthode de forage rotatif, utilisée dans les formations rocheuses sèches ou dures. Il montre l'injection d'air comprimé par un compresseur, la montée des déblais à travers l'espace annulaire, ainsi que les principaux réglages disponibles pour le foreur (vitesse de rotation, poids appliqué, débit du fluide).

Cette méthode est rapide, propre, et limite les problèmes liés aux fluides de forage [11]

2.4.3 Forage roto-percutant

Le forage roto-percutant est une méthode utilisée principalement dans les terrains durs et stables.

Elle repose sur un marteau pneumatique situé au fond du trou, activé par de l'air comprimé provenant d'un compresseur. Ce marteau génère un mouvement rapide de va-et-vient vertical, frappant directement l'outil de coupe, qui reste en contact avec la roche.

L'outil, généralement muni de pointes en carbure de tungstène, est fixé à un train de tiges creuses. L'air comprimé circule à l'intérieur de ces tiges, actionne le marteau, puis remonte en surface par l'espace entre les tiges et les parois du trou, évacuant les déblais.[10]

Ce type de forage combine trois actions principales :

- Une poussée axiale vers le bas,
- Un couple de rotation pour faire tourner l'outil,
- Une percussion directe sur la roche via le marteau.

Cette technique est donc un mélange de forage rotatif percutant offrant une grande efficacité dans les roches dures. [10]

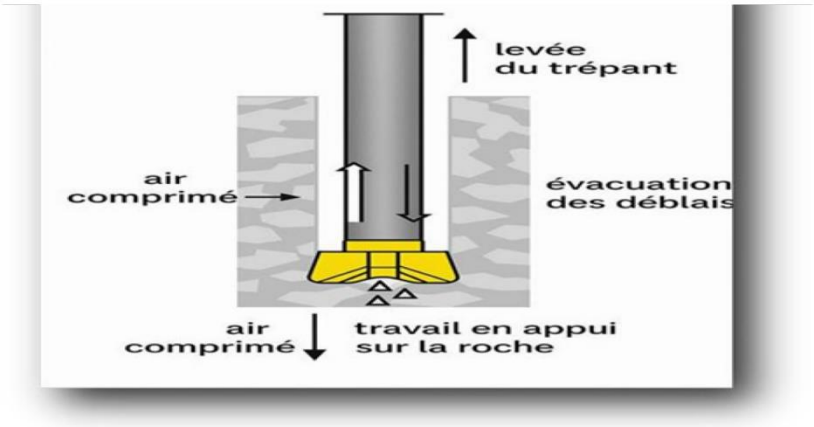

FIGURE 2.3 – Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant.
[11]

cette figure illustre le forage roto-percutant, une technique combinant rotation, percussion et poussée axiale.

L'énergie est transmise via un marteau pneumatique placé au fond du trou. Le schéma met en avant l'utilisation du carbure de tungstène sur le taillant, et le rôle de l'air comprimé dans l'évacuation des déblais. Cette méthode est idéale pour les roches dures et compactes. [11]

Synthèse

le tableau ci-dessous montre l'emploi des différents modes de forage dans les mines selon les propriétés des roches forer. [12]

TABLEAU 2.2 – Choix du mode de forage selon dureté et diamètre des trous.

Mode de forage	Machine de forage	Dureté (Mohs)	Ø trous (mm)	Profondeur (m)
Rotatif	Sondeuse rotative à outil coupant	≤ 6	110–160	30
	Sondeuse à molette	6–20	160–320	40
Percutant	Équipement avec perforateurs	6–20	40–85	20
	Sondeuse à battage	6–20	150–300	40
Roto-percutant	Sondeuse à percuteur pneumatique au fond du trou	10–20	85–200	30
	Sondeuse à percuteur hors trou	8–20	50–125	30
	Sondeuse à percuteur à rotation indépendante	6–20	40–100	30

Ce tableau synthétise les critères de sélection du mode de forage en fonction de la dureté des roches, du diamètre et de la profondeur des trous. Il met en relation les ma- chines utilisées (à molette, à lames, perforateurs) avec les caractéristiques géotechniques, et permet d'orienter l'ingénieur vers le procédé le plus rentable et performant en carrière. [12]

1. Paramètres d'optimisation du rendement en forage

Malgré l'apparition de méthodes d'évaluation plus sophistiquées, certains critères de base restent incontournables pour mesurer l'efficacité d'un système de forage ou pour comparer plusieurs technologies entre elles.

Parmi ces critères fondamentaux figurent :

- la consommation d'énergie et la puissance mobilisée,
- le taux de pénétration,
- l'usure ou la fréquence de remplacement du taillant,
- et le coût global de l'opération.

Selon les particularités du chantier, l'un ou l'autre de ces paramètres peut devenir déterminant. Par exemple, dans les opérations à ciel ouvert, la maîtrise de la consommation énergétique prend une importance majeure.

Toutefois, ces éléments sont fortement interdépendants : une énergie mal maîtrisée peut réduire la vitesse de forage, et une usure excessive du taillant peut entraîner des interruptions fréquentes, ralentissant ainsi la progression du chantier.[13]

En pratique, deux indicateurs se distinguent par leur usage courant : le taux de pénétration, qui correspond à la vitesse d'avancement de l'outil, et la durabilité du taillant, mesurée par sa durée de vie ou le nombre de remplacements nécessaires. Ce dernier paramètre devient crucial dans les forages profonds où chaque arrêt technique a un impact significatif sur les délais et les coûts.[9]

Néanmoins, c'est le coût global qui reste le critère de référence, puisqu'il regroupe l'ensemble des autres variables. Un système peut se révéler performant, innovant et respectueux de l'environnement, mais s'il ne respecte pas les contraintes budgétaires, il perd en pertinence opérationnelle. Enfin, il est essentiel de souligner que l'efficacité du forage ne peut être dissociée du processus d'exploitation dans son ensemble.

Elle doit être analysée en lien avec les étapes du tir et du concassage, dans une logique de réduction globale du coût de rupture de la roche .[13]

2. Indice de forabilité (DF ou IF)

L'indice de forabilité, noté Df (Drillability Factor), est un paramètre synthétique permettant de quantifier la facilité avec laquelle une roche peut être forée, en prenant en compte ses propriétés mécaniques et physiques.

Il est couramment utilisé dans l'industrie extractive pour prédire la vitesse de forage

et optimiser le choix des outils en fonction des caractéristiques du matériau.

Le Df est influencé par plusieurs facteurs :

- La résistance mécanique (notamment la résistance à la compression et au cisaillement),
- La dureté et la texture de la roche,
- L'abrasivité du matériau (usure des outils),
- Et, sur le terrain, la densité des discontinuités naturelles (fissures, joints, failles, etc.).[9]

3. Drilling Rate Index (DRI)

Pour évaluer la forabilité en laboratoire, une méthode de référence est le Drilling Rate Index (DRI), largement utilisé dans les pays anglo-saxons. Le DRI est un indice normalisé qui combine les résultats de plusieurs tests expérimentaux :

- Friabilité : mesure de la facilité avec laquelle la roche se désagrège,
- Résistance aux chocs : capacité à absorber l'énergie d'impact,
- Abrasivité : déterminée par un test d'arrachement à l'aide d'une lame standardisée.

Bien que le DRI soit très informatif, il nécessite des équipements spécialisés.

Pour cette raison, une formulation empirique du Df est souvent utilisée comme alternative pratique en contexte de carrière.[14]

4. Formule de calcul de l'indice de forabilité (If ou Df)

$$\boldsymbol{If = 0,007 \times (\delta_c + \tau) + 0,7 \times \gamma} \tag{2.1}$$

Avec :

- δ_c : Résistance à la compression uniaxiale de la roche (en kgf/cm2),

$$f = \frac{\sigma_c}{100} \quad \Rightarrow \quad \sigma_c = f \cdot 100 \ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

- τ : Résistance au cisaillement, généralement estimée entre 16 % et 33 % de la résistance à la compression, soit : $\tau = (0{,}16 \div 0{,}33) \times \delta_c$
- γ : Densité apparente de la roche.

Cette relation, issue de travaux empiriques permet d'intégrer de manière simplifiée les principales caractéristiques géomécaniques de la roche.

Elle constitue un outil d'aide à la décision dans le dimensionnement des équipements de forage et l'estimation des rendements d'exploitation en carrière.[9]

le tableau ci-dessous classe différentes roches selon leur indice de forabilité (Df). Plus cet indice est élevé, plus la roche est facile à forer.

TABLEAU 2.3 – Classification de Df des roches

Indice Df	Nature de la roche	Df
0.5–0.7	Basalte, diorites, silex, quartz, quartzite dure	30–40
0.7–0.9	Trapp, granit dur, gneiss, ryolithe, gabbros, quartzite	40–50
0.9–1.1	Porphyre, granit, taconite, grès, hématite, cornéenne	50–60
1.1–1.3	Diorite, marbre, calcaire dur, phyllades, andalousite	60–70
1.3–1.7	Calcaire, schistes, gypse, bauxite, marne dure, latérite	70–80
1.7–2.2	Calcaire marneux, marnes, craie, argile, talc	80–90

Les roches comme le quartzite ou le basalte ont des Df faibles (donc difficiles à forer), tandis que des roches comme la marne ou l'argile ont des Df élevés (forabilité facile).

Ce classement est fondamental pour anticiper les performances de forage et adapter le matériel.[15]

TABLEAU 2.4 – Classification qualitative de la vitesse de forage en fonction de l'indice Df

Df	Catégories
≥ 93	Extrêmement rapide
70–82	Très rapide
58–69	Rapide
43–57	Moyenne
33–42	Lente
26–32	Très lente
≤ 25	Extrêmement lente

le tableau ci-dessous établit une classification qualitative (extrêmement rapide, rapide, moyen, lent, etc.) en fonction de l'indice Df. Il complète le tableau précédent en traduisant les valeurs numériques en termes opérationnels, ce qui aide à décider de l'équipement requis.

TABLEAU 2.5 – Classification du degré de forabilité des roches en fonction de l'indice If [9]

Degré de forabilité des roches	If	Classe	Catégorie
Forabilité facile	< 5	1	1, 2, 3, 4, 5
Forabilité moyenne	5.1 – 10	2	6, 7, 8, 9, 10
Forabilité difficile	10.1 – 15	3	11, 12, 13, 14, 15
Forabilité très difficile	15.1 – 20	4	16, 17, 18, 19, 20
Forabilité extrêmement difficile	20.1 – 25	5	21, 22, 23, 24, 25

ce tableau regroupe les roches selon leur indice de forabilité (If) calculé avec la formule :

$$If = 0,007 \times (\delta_c + \tau) + 0,7 \times \rho \qquad (2.2)$$

Il permet de définir le degré de difficulté de forage (facile, moyen, difficile, très difficile, extrêmement difficile) en fonction de classes et catégories. Il sert à anticiper les efforts nécessaires, les coûts et les temps de forage selon les types de roches analysés en laboratoire[9]

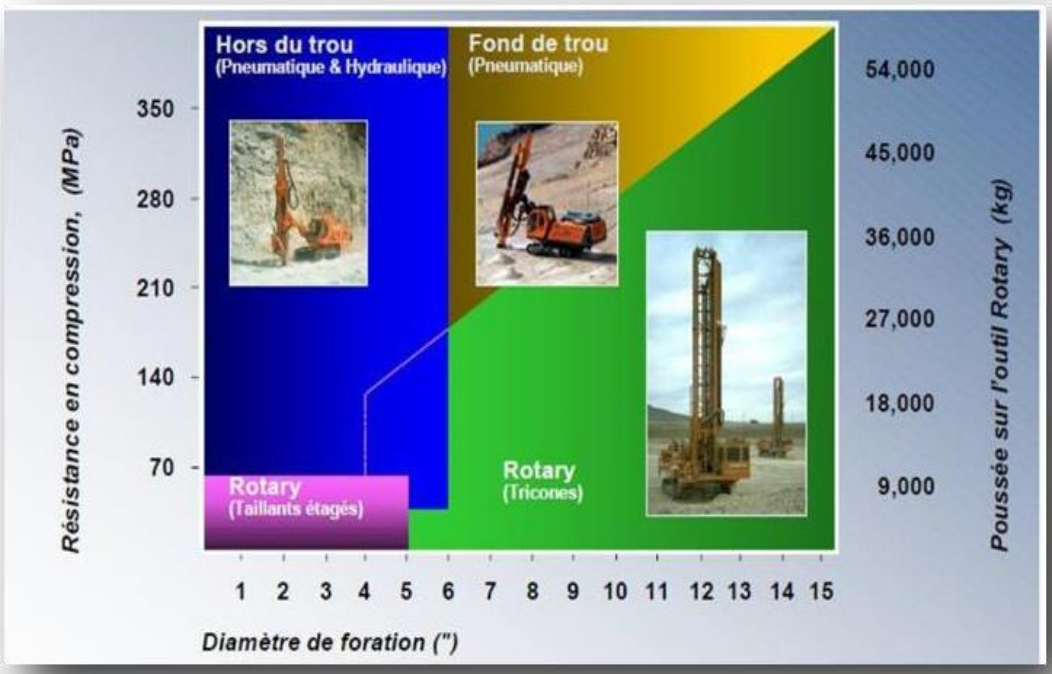

FIGURE 2.4 – Diagramme du domaine d'application des différents types de forage

cette figure en couleur présente un diagramme tridimensionnel montrant les plages d'application des différents systèmes de forage en fonction de trois variables :

- Résistance en compression de la roche (MPa) (axe vertical à gauche),
- Diamètre de forage (en pouces) (axe horizontal en bas),
- Poussée nécessaire (kg) (axe vertical à droite, en bleu).

Elle distingue trois grandes familles de techniques :

1. Rotary à taillants étagés → pour petits diamètres (< 6"), et roches tendres à mo- dérément dures.
2. Roto-percussion hors trou → pour résistances intermédiaires (100–250 MPa), avec diamètre moyen.
3. Roto-percussion fond de trou (DTH) → pour résistances > 250 MPa, et grands diamètres (jusqu'à 15").[16]

2.5 Les propriétés géotechniques des roches

il se devise en 2 catégories les propriétés physiques et mécaniques

2.5.1 Les propriétés physiques des roches

1. Masse volumique

Elle représente la masse contenue dans une unité de volume de roche, généralement exprimée en g/cm3. Selon l'état du matériau, plusieurs types de masse volumique peuvent être distingués :

- ρ_s : masse volumique du solide
- ρ_n : masse volumique naturelle
- ρ_d : masse volumique sèche
- ρ_{sat} : masse volumique à saturation

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

$$\rho_n = \frac{M_s}{V_t}$$

$$\rho_d = \frac{M_h}{V_t}$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{V_t}$$

Ces grandeurs sont définies à partir des paramètres suivants :

- M-s : masse du matériau sec (en grammes)
- V-s : volume des grains solides (en cm3), mesuré après broyage
- V-t : volume total de l'échantillon (en cm3)
- M-n : masse de l'échantillon à l'état naturel (en grammes)
- M-sat : masse de l'échantillon à l'état saturé (en grammes)

La masse volumique sèche (ρ_d) dépend du taux de porosité de la roche, alors que la masse volumique absolue (ρ_s) est exclusivement liée à la composition minéralogique du matériau. [17]

2. Dureté

La dureté d'un minéral dépend de l'agencement de ses atomes au sein de sa structure cristalline. Plus les liaisons atomiques sont solides et cohésives, plus le minéral présente une résistance élevée aux rayures, ce qui se traduit par une plus grande dureté. Cette propriété est intrinsèque au minéral et constitue un critère fiable pour son identification, contrairement à d'autres caractéristiques comme la couleur, qui peuvent varier sans altérer la dureté.

La dureté est donc un indicateur fondamental utilisé en minéralogie pour différencier les espèces minérales. À ce titre, le minéralogiste Friedrich Mohs a proposé une échelle de classification fondée sur la capacité d'un minéral à rayer un autre. Il a sélectionné dix minéraux de référence, ordonnés de 1 (le plus tendre) à 10 (le plus dur), constituant ce que l'on appelle aujourd'hui l'échelle de Mohs.[18]

TABLE 2.6 – Tableau de l'échelle de Mohs : dureté des minéraux de 1 (talc) à 10 (diamant) [7]

Indice Mohs	Minéral	Indice Mohs	Minéral
1	Talc	7	Feldspath
2	Gypse	7	Quartz
3	Calcite	8	Topaze
4	Fluorine	9	Corindon
5	Apatite		
	Diamant		

Lorsqu'un minéral parvient à rayer un autre, cela signifie nécessairement qu'il possède une dureté supérieure. Pour faciliter cette évaluation sur le terrain, des pointes métalliques numérotées, reproduisant les niveaux de l'échelle de Mohs, sont utilisées. Ces outils sont particulièrement utiles lors des campagnes d'exploration géologique, car ils permettent une estimation rapide et pratique de la dureté des minéraux.[7]

Cette méthode est principalement appliquée aux pierres calcaires. Elle consiste à mesurer la largeur de la rayure obtenue sur la surface polie d'un échantillon rocheux. Cette largeur constitue une valeur chiffrée représentative de la dureté du matériau.[7]

L'intérêt de cette approche réside dans la possibilité d'établir des corrélations entre la dureté ainsi mesurée et d'autres propriétés physiques et mécaniques de la roche. En effet, la dureté influence directement la facilité de taille du matériau ainsi que l'usure des outils utilisés.[17]

3. Texture

la texture d'une roche représente l'agencement, la taille et l'uniformité de ses grains ou cristaux visibles. Elle est généralement évaluée par observation visuelle directe ou à l'aide d'une loupe de terrain. Cette caractéristique joue un rôle déterminant dans le comportement de la roche lors du forage, notamment en influençant la vitesse de pénétration, l'usure des outils et la stabilité du trou.

Selon Wilbur (1982), la classification texturale peut être associée à des indications sur la performance attendue lors du forage.[7]

Le tableau 2 suivant présente cette classification :

TABLEAU 2.7 – .D'après Wilbur, 1982.Classification texturale et comportement au forage

Texture de la roche	Description	Impact sur le forage
Grossière	Grains visibles > 5 mm	Forage plus difficile, vibration
Moyennement grenue	Grains de 1 à 5 mm	Forage modéré
Fins grains	Grains < 1 mm, surface homogène	Bon rendement de forage
Très fins grains (microscopique)	Impossible à distinguer à l'œil nu	Très bonne réponse au forage
Vitreuse / Amorphe	Aspect lisse, sans grains (ex. obsidienne)	Forage rapide mais attention au colmatage
Porphyrique	Grains grossiers inclus dans une pâte fine	Réponse variable, usure irrégulière

4. L'abrasivité

L'abrasivité désigne la capacité d'une roche à user les outils mécaniques utilisés pour son extraction, tels que les pièces de concasseur, les têtes de forage, les molettes ou encore les pics de machines de creusement. Il s'agit d'un paramètre essentiel dans les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, que ce soit en milieu souterrain ou à ciel ouvert.

Cette propriété dépend principalement de deux facteurs :

- la présence de minéraux durs dans la roche, notamment le quartz,
- la cohésion entre les grains, c'est-à-dire la solidité de leur assemblage.

Pour évaluer l'abrasivité, l'un des instruments les plus couramment utilisés est l'abrasimètre du LCPC. Cet appareil est constitué d'un récipient métallique rempli de granulats calibrés (de 4 à 6,3 mm), dans lequel une palette métallique tourne à grande vitesse. Après 5 minutes de fonctionnement, la perte de masse de la palette, exprimée en milligrammes d'acier, est mesurée. Cette perte est ensuite rapportée à la masse (en kg) des granulats utilisés, afin de calculer l'indice d'abrasivité (indice ABR). [19]

En pratique, un indice ABR supérieur à 1 500 indique un matériau très abrasif, susceptible d'entraîner une usure rapide des outils.[19]

le tableau ci-dessous permet à titre illustratif de mettre en relation la durée de vie des taillants de forage avec l'abrasivité des roches.

TABLEAU 2.8 – Durée de vie des taillants de forage en fonction de l'abrasivité des roches

Type de roche	Indice ABR (mg/kg)	Durée de vie du taillant (m)
Calcaire tendre	600	1500
Grès	1200	900
Quartzite	1800	500
Granite	2200	350
Basalte	2700	200

Détermination de la forabilité d'une masse rocheuse

Mesure de la forabilité la forabilité d'une roche peut être définie comme sa facilité à être pénétrée par un outil de forage, en fonction de ses propriétés mécaniques, texturales et structurales. Elle est fréquemment exprimée par la vitesse de forage, généralement mesurée en centimètres par minute (cm/min), ce qui représente la vitesse de pénétration du trépan dans la formation rocheuse.[20]

Afin d'évaluer objectivement cette aptitude au forage, plusieurs travaux de recherche ont conduit à l'élaboration d'un facteur de forabilité. Ce dernier a été établi à partir de données expérimentales issues d'essais en laboratoire et de mesures en conditions réelles sur le terrain. Il permet de lier directement les caractéristiques du matériau foré à une vitesse de forage théorique estimée, facilitant ainsi les prévisions de rendement lors de campagnes de sondage.[20]

Une fois la catégorie de roche ou la condition de forage identifiée (par exemple via l'indice Df ou la classification Wilbur), il est possible de déterminer la vitesse de pénétration attendue grâce au tableau de correspondance suivant :

TABLEAU 2.9 – Évaluation qualitative de la nature des roches en fonction de leur vitesse de forage

Nature de roche	Rapide	Rapide	Rapide Moyenne	Moyenne	Lent
Dureté	8	4	3	2	1
Texture	8	4	3	2	1
Formation	8	4	3	2	1
Total	**32**	**16**	**12**	**8**	**4**

2.5.2 Les propriétés mécaniques des roches

Résistance à la compression R_c

La résistance à la compression d'une roche est déterminée à l'aide de l'essai de compression uniaxiale. Celui-ci s'effectue sur un échantillon cylindrique (souvent appelé « carotte »), dont le rapport d'élancement L/D — rapport entre la hauteur L et le diamètre D — se situe généralement entre 2 et 2,5.

Les deux extrémités de l'éprouvette doivent être planes, parallèles et parfaitement polies, ce qui est obtenu par une rectification soignée afin d'assurer une répartition uniforme des contraintes pendant l'essai.

Lors du test, l'échantillon est positionné entre les plateaux d'une presse hydraulique, et une charge axiale croissante est appliquée jusqu'à la rupture. La résistance à la compression uniaxiale, notée R_c, correspond à la contrainte maximale que la roche peut supporter juste avant de céder.[21]

Elle est calculée à partir de la charge maximale F enregistrée au moment de la rupture, divisée par la surface S de la section transversale de l'éprouvette :

où :

$$R_c = \frac{F}{S} \tag{2.4}$$

— L'unité de R_c est exprimée en kgf/cm²*ou MPa*

— F est la force maximale appliquée (en kgf ou N)

— S est la surface de la section circulaire de l'éprouvette :

$$S = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

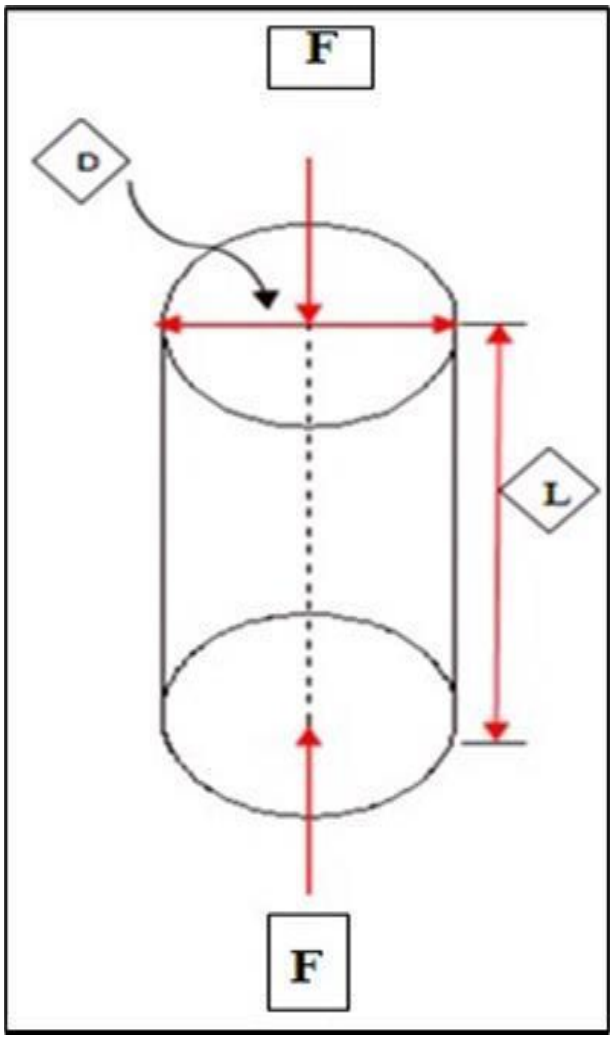

FIGURE 2.5 – Schéma du principe de l'essai de compression uniaxiale.

Ce tableau ci-dessous donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la com- pression proposée par la société internationale de mécanique des roches.

TABLEAU 2.10 – Classification des roches en fonction de leur résistance à la compression (Rc)

Roches	**Faiblement résistantes**	**Moyennes**	**Résistantes**	**Très résistantes**
Rc (MPa)	< 5	20	60	> 60

Résistance à la traction directe:

En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uniaxiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohésion des échantillons des roches massives[22]

où :

$$R_t = \frac{P_{max}}{A} \tag{2.5}$$

- R_t : résistance à la traction (en Pa ,MPa ou N/mm2)
- P_{max} : charge maximale appliquée avant rupture (en N)
- A : surface initiale de la section transversale de l'éprouvette (en mm2 ou m2).

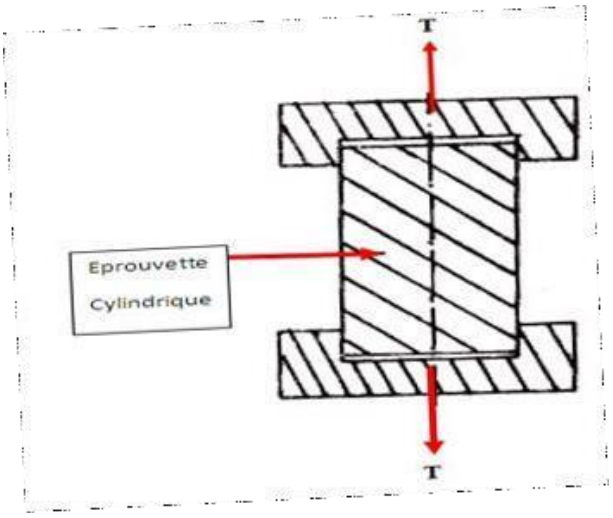

FIGURE 2.6 – Principe de l'essai de traction directe

Traction indirecte (Essai Brésilien) :

L'essai de résistance à la traction indirecte, appelé aussi *essai brésilien*, est réalisé en comprimant une éprouvette cylindrique entre les plateaux d'une presse le long de deux génératrices opposées (voir figure (traction indirecte)). La rupture est provoquée par un effort de traction au centre de l'éprouvette.

Cette méthode présente l'avantage d'éviter les difficultés liées au collage des têtes, habituellement nécessaires dans les essais de traction directe. [23]

Si F est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture, D le diamètre de l'éprouvette, et L sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par la formule :

avec :

$$R_c = \frac{2 \times F_{\max}}{\pi \times D \times L} \quad [\text{kgf/cm}^2] \tag{2.6}$$

- R_c : résistance à la traction indirecte (kgf/cm2),
- $F_{\max}$: charge maximale appliquée avant la rupture (kgf),
- D : diamètre de l'éprouvette (cm),
- L : hauteur (ou longueur) de l'éprouvette (cm),
- $\pi \approx 3{,}1416$: constante mathématique.

Cette formule est utilisée lorsque la surface de rupture n'est pas directement mesurée, mais estimée à partir des dimensions géométriques du cylindre. Elle permet une évaluation fiable de la résistance mécanique du matériau, essentielle pour les études de stabilité et la conception d'ouvrages en génie civil.[23]

La résistance à la traction indirecte (Rt) se calcule à l'aide de la formule :

$$Rt = \frac{2F_{max}}{\pi DL} \tag{2.7}$$

— Fmax représente la charge maximale appliquée à la rupture, Cette charge est obtenue à partir de la résistance à la compression indirecte Rc mesurée lors de l'essai brésilien,

— D est le diamètre de l'éprouvette,

— L est la hauteur (ou longueur) de l'éprouvette, Les dimensions D et L doivent être exprimées dans des unités cohérentes (souvent en millimètres).

Fmax doit être exprimée en newtons pour obtenir un résultat en MPa.

Cette méthode permet d'estimer la résistance mécanique du matériau même sans mesurer directement la surface de rupture. Le résultat obtenu peut ensuite être comparé à une classification standard pour évaluer la qualité de la roche :

— faiblement résistante (< 0,40 MPA)
— moyennement résistante(0,40 à 1,50 MPA)
— résistante (1,50 à 4,00 MPA)
— très résistante (> 20 MPA). [24]

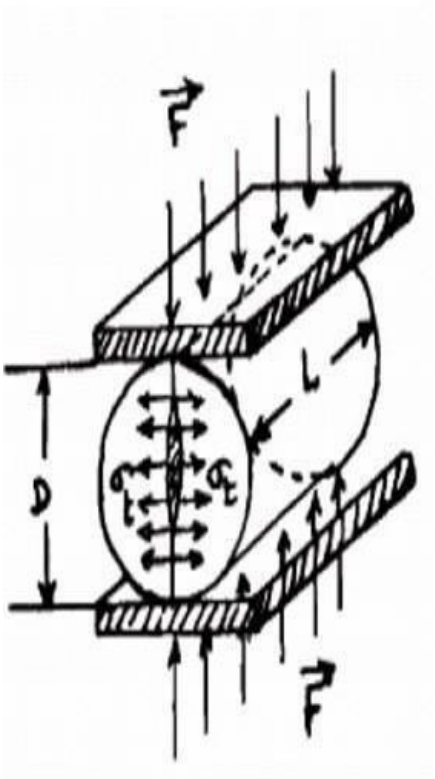

FIGURE 2.7 – Schéma de l'essai brésilien (traction indirecte).

Ce tableau donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction proposée par la société internationale de mécanique des roches . [24]

Catégorie de roche	Faiblement résistante	Moyenne	Résistante	Très résistante
RT (MPa)	0,40	1,50	4,00	> 20

2.6 Conclusion

Ce second chapitre a permis d'établir une base théorique solide sur les mécanismes du forage et sur les paramètres géomécaniques des roches, essentiels pour comprendre les conditions d'extraction en carrière. L'analyse a mis en évidence l'influence des techniques de forage (rotatif, percutant, roto-percutant) et des facteurs opérationnels sur la performance du creusement dans les milieux rocheux.

L'étude approfondie des propriétés physiques (masse volumique, porosité, humidité, dureté) et mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) a montré leur impact direct sur la pénétrabilité des roches, la sélection des équipements, ainsi que sur l'usure des outils. Ces paramètres conditionnent le rendement global et la faisabilité des travaux de forage.

L'introduction de l'indice de forabilité (If) permet de quantifier la difficulté de forage en prenant en compte à la fois la résistance et la densité du matériau. Cet indicateur, couplé aux données texturales et structurales, fournit une estimation préalable fiable de la vitesse de progression attendue, contribuant ainsi à une planification plus précise des opérations sur site.

Les connaissances synthétisées dans ce chapitre serviront de référentiel pour l'interprétation des essais expérimentaux et des mesures réalisées sur les roches de la carrière de Meftah. Elles fourniront les éléments nécessaires à l'évaluation de la forabilité selon les critères observés sur le terrain et en laboratoire.

Chapitre 3

méthodologie appliquée aux prélèvements et aux essais en laboratoire.

Chapitre 3

méthodologie appliquée aux prélèvements et aux essais en laboratoire.

3.1 Introduction

Le présent chapitre est ainsi consacré à une analyse approfondie de la forabilité, reposant sur une double approche : expérimentale in situ et analytique en laboratoire. D'une part, des mesures de la vitesse de pénétration ont été réalisées sur le terrain dans trois zones géologiques distinctes, afin d'évaluer directement la réponse du matériau lors du forage. D'autre part, des essais mécaniques classiques ont été conduits au laboratoire, portant sur des paramètres fondamentaux tels que la masse volumique, la densité, la résistance à la compression uniaxiale (Rc) et la résistance à la traction indirecte (Rt).

Ces deux volets sont étroitement liés, car ils permettent de confronter la performance pratique observée lors du forage aux caractéristiques physico-mécaniques mesurées selon des protocoles normalisés.

Cette approche méthodologique vise à mettre en évidence les spécificités propres à chaque zone, en tenant compte des variations lithologiques, de la présence éventuelle de discontinuités structurales (telles que les failles ou les fissurations), ainsi que des effets de l'altération.

L'analyse des résultats s'efforce également de mettre en lumière les causes possibles des différences de forabilité constatées, qu'elles soient liées à la nature même de la roche, à sa structure interne, ou encore aux conditions opératoires rencontrées lors de l'exécution des essais.

Enfin, ce chapitre constitue le socle technique sur lequel reposera l'analyse corrélative du chapitre suivant. Il fournit les éléments nécessaires pour une compréhension fine du comportement des roches à l'échelle microscopique (via les essais de laboratoire) et macroscopique (via les performances de forage), en vue d'identifier des relations fiables entre les propriétés intrinsèques des matériaux et leur aptitude à être forés efficacement.

3.2 La Vitesse de Pénétration

Pour évaluer la pénétration d'une foreuse dans la roche en conditions réelles, il est nécessaire de suivre une méthodologie rigoureuse combinant à la fois des mesures directes sur le terrain et des calculs basés sur les propriétés géotechniques du massif rocheux.

Le présent guide fournit une démarche détaillée permettant de réaliser ces calculs de manière fiable, en tenant compte des conditions opératoires et des caractéristiques mécaniques et physiques du matériau à forer.

Le Calcul de la Vitesse de Pénétration se fait par la Formule :

$$PR = D/t$$

- PR= Vitesse de pénétration (m/h ou m/min)
- D= Profondeur forée (mètres)
- t= Temps de forage (heures ou minutes)

Cette mesure s'effectue en deux étapes :

3.2.1 Etape 1

- **Démarrez la Foreuse** : s'assurer que la foreuse fonctionne à une vitesse et une pression constante.
- **Mesurez le Temps** : Utilisez un chronomètre pour mesurer le temps nécessaire pour forer une certaine profondeur (ex : 1 mètre).

3.2.2 Etape 2

- **La Répétition des Mesures**

- Répétez la mesure plusieurs fois pour obtenir une moyenne et réduire les erreurs.
- Notez les variations de vitesse en fonction des changements de type de roche ou de conditions de forage.

Dans cette étude, trois zones bien distinctes de la carrière ont été sélectionnées afin d'y effectuer les mesures nécessaires. L'objectif principal est de comparer les vitesses de pénétration relevées dans chaque zone, d'analyser leur lien avec les propriétés géotechniques des roches.

3.2.2.1 Zone 1

Le massif calcaire de la zone 1 présente une structure massive à stratification peu marquée. Sa teinte brun-beige à ocre indique une altération superficielle probable. La roche, essentiellement calcaire, est compacte et homogène, avec des variations minérales légères visibles.

Les données fournies présentent les profondeurs forées, le temps de forage (T), et la pénétrabilité (v = D/T) pour trois profondeurs distinctes (1 m, 3 m et 5 m)

TABLEAU 3.1 – Données expérimentales de pénétrabilité (v = D/T) mesurée à différentes profondeurs (1 m, 3 m, 5 m) dans la Zone 1

Profondeur (m)	**Temps T (s)**	**Pénétrabilité $v = \frac{D}{T}$ (m/s)**
1	3,54	0,282
1	3,49	0,287
1	2,09	0,478
1	2,02	0,495
1	2,00	0,500
1	2,15	0,465
1	2,20	0,455
1	2,30	0,435
1	2,45	0,408
1	2,55	0,392
1	2,35	0,426
1	2,50	0,400
3	**7,30**	**0,411**
3	**6,54**	**0,459**
3	**6,00**	**0,500**

Profondeur (m)	**Temps T (s)**	**Pénétrabilité** $v = \frac{D}{T}$ **(m/s)**
3	**5,50**	**0,545**
3	**5,35**	**0,561**
3	**5,45**	**0,550**
3	**5,35**	**0,561**
3	**5,42**	**0,554**
3	**5,40**	**0,556**
3	**5,55**	**0,541**
3	**5,40**	**0,556**
5	*9,00*	*0,556*
5	*8,45*	*0,592*
5	*8,00*	*0,625*
5	*7,50*	*0,667*
5	*7,55*	*0,662*
5	*7,45*	*0,671*
5	*8,05*	*0,621*
5	*8,20*	*0,610*
5	*8,00*	*0,625*
5	*7,58*	*0,660*
5	*7,45*	*0,671*
5	*7,35*	*0,680*

Voici une analyse des tendances observées :

Pénétrabilité en fonction de la profondeur

Pour 1 m de profondeur :

— La pénétrabilité varie entre 0,28 et 0,40, avec des temps de forage relativement courts (2 à 3,54 minutes).

— On observe une dispersion significative des valeurs, ce qui peut indiquer une hété-

érogénéité de la roche ou des variations dans les conditions de forage.

Pour 3 m de profondeur :

— La pénétrabilité est globalement plus élevée (entre 0,41 et 0,56),
— Le temps de forage augmente logiquement (5,35 à 7,3 minutes).

Pour 5 m de profondeur:

— La pénétrabilité reste élevée (0,55 à 0,68), avec des temps de forage plus longs (7,35 à 9 minutes).
— La cohérence des données suggère un comportement plus stable du sol à cette profondeur.

Relations et observations

Effet de la profondeur :

Plus la profondeur augmente, plus le temps de forage est élevé, mais la pénétrabilité ne diminue pas systématiquement. Cela pourrait indiquer que le sol devient plus facile à forer avec la profondeur (par exemple, passage d'une couche dure en surface à une couche plus meuble).

3.2.2.2 Zone2

une zone géologique où l'on peut observer une grande paroi rocheuse inclinée, typique d'un environnement de type falaise. Cette formation semble faire partie d'un massif.

une discontinuité géologique visible vers le centre-gauche de la paroi, inclinée vers la droite. Voici quelques indices indiquant une possible faille :

— Changement d'inclinaison : Les strates ou couches du matériau semblent avoir une orientation différente dans cette zone.
— Fracturation et décalage : Il y a des marques visibles de fracturation, et le matériau semble déplacé de manière verticale ou oblique.
— Accumulation de débris à la base : Cela peut être lié à une instabilité structurale causée par une faille.

La ligne rouge indique l'emplacement probable de la faille. On y observe une discontinuité dans la texture et l'inclinaison du matériau, ce qui suggère un déplacement tectonique ou un glissement dans cette zone. Cela pourrait indiquer une faille normale ou une zone de cisaillement selon le contexte géologique local.

— Le foreur a rencontré une résistance anormalement élevée lors du forage, chaque trou demandant 30 à 45 minutes, ce qui est très long pour un sol standard.
— Lors du 5e trou, la tige de forage s'est coincée dans le sol et s'est cassé lors de la tentative de retrait.

Il s'agit probablement d'un calcaire très compact à dur, voire fracturé localement, ce qui explique :

— La très faible pénétrabilité.
— Un temps de forage très élevé, de l'ordre de 30 à 45 minutes par trou.

Lors du forage du cinquième trou :

— La tige a été bloquée dans une zone de calcaire plus dur ou à proximité d'une discontinuité géologique (faille) .

Le blocage peut être dû à :

— Un effondrement de débris rocheux dans le trou.
— Un accrochage dans une fracture étroite.
— Un manque de lubrification / nettoyage insuffisant du trou

le Cassage de la tige

La tentative de retrait a entraîné :

— Une traction excessive.
— Éventuellement une torsion mécanique.
— Ce qui a provoqué la rupture de la tige, probablement à une zone de faiblesse structurelle ou de fatigue du métal.

Voici un schéma qui peut préciser ce qu'il s'était passé :

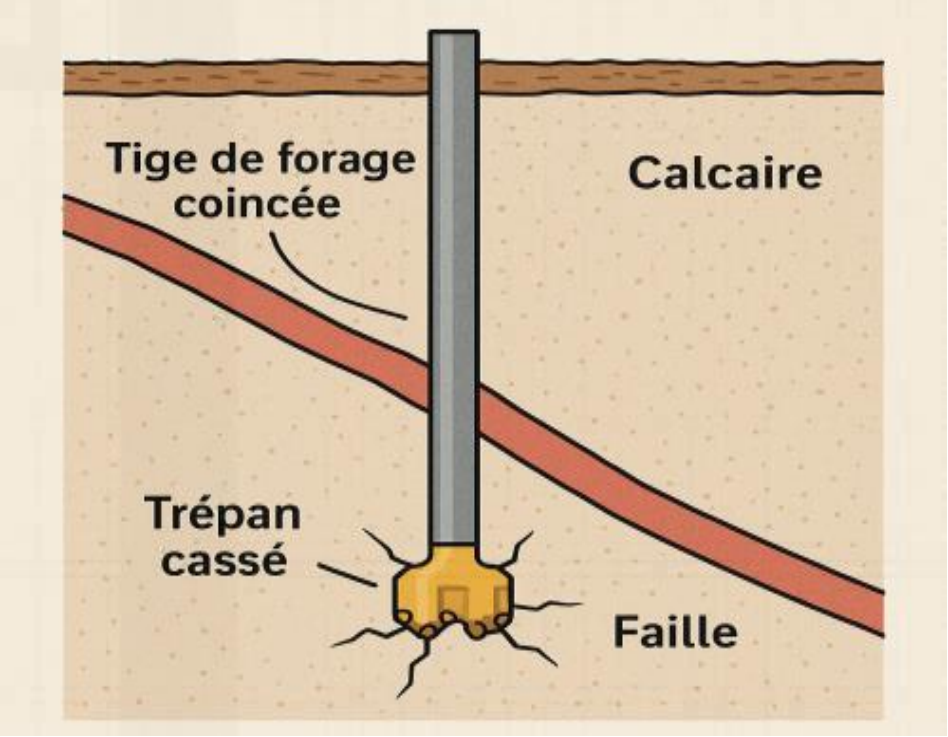

FIGURE 3.1 – accrochage dans une fracture étroite de la zone 2

Remarque :

Le calcaire compact rencontré sur le site présente une très faible forabilité, conduisant à des temps de perçage très longs. Lors du cinquième forage, une zone particulièrement dure ou fissurée a provoqué le coincement de la tige, qui a finalement cédé sous l'effort mécanique de retrait. La situation est typique des terrains calcaires durs, surtout en présence de structures géologiques comme les failles.

3.2.2.3 Zone 3

— Une composition dominante de roches calcaires, reconnaissables à leur couleur claire (blanc cassé à beige) et leur texture grenue ou parfois compacte.

— Une surface globalement sèche, typique des environnements calcaires non végétalisés

TABLEAU 3.2 – illustratif réel sur la vitesse de pénétration dans bien zone3.

Profondeur (m)	**Temps T (s)**	**Pénétrabilité** $v = \frac{D}{T}$ **(m/s)**
1	1,50	0,667
1	1,42	0,704
1	1,65	0,606
1	1,44	0,694
1	1,54	0,649
1	1,60	0,625
1	1,55	0,645
1	1,43	0,699
1	1,55	0,645
1	1,49	0,671
1	1,61	0,621
1	1,58	0,633
3	**3,70**	**0,811**
3	**3,50**	**0,857**
3	**3,59**	**0,836**
3	**3,45**	**0,870**

3.2. La Vitesse de Pénétration

Profondeur (m)	**Temps T (s)**	**Pénétrabilité** $v = \frac{D}{T}$ **(m/s)**
3	**3,40**	**0,882**
3	**3,65**	**0,822**
3	**3,54**	**0,847**
3	**3,49**	**0,860**
3	**3,58**	**0,838**
3	**3,50**	**0,857**
3	**3,65**	**0,822**
5	5,28	0,947
5	5,50	0,909
5	5,40	0,926
5	5,35	0,935
5	5,45	0,917
5	5,25	0,952
5	5,37	0,931
5	5,40	0,926
5	5,25	0,952
5	5,33	0,938
5	5,39	0,928
5	5,40	0,926

Les données montrent une tendance claire : la pénétrabilité augmente avec la profondeur. En moyenne :

— Pour D = 1 m, la pénétrabilité est autour de 0,66 m/min, ce qui indique un rendement plus faible.

— Pour D = 3 m, elle passe à environ 0,85 m/min, une amélioration notable.

— Pour D = 5 m, la pénétrabilité atteint environ 0,93 m/min, suggérant un rendement encore meilleur.

Cette évolution peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

— Une meilleure stabilité de l'outil à plus grande profondeur.
— Une optimisation progressive du processus de forage (moins de pertes de temps).
— Possiblement des caractéristiques géotechniques du sol plus favorables à ces profondeurs.

Cependant, la pénétrabilité n'est pas parfaitement constante à chaque niveau de profondeur. On observe des variations mineures dues probablement à :

— Des hétérogénéités de la roche.
— Des écarts dans les conditions opératoires.

Note :

Les données montrent que la pénétrabilité s'améliore avec la profondeur, atteignant des valeurs plus élevées à 3 m et 5 m par rapport à 1 m. Cette tendance pourrait être liée à une gestion plus efficace du processus de forage et à des conditions de la roche plus favorables à ces profondeurs. Cependant, des variations ponctuelles sont observées, suggérant l'impact de facteurs externes ou de diversités géotechniques. Une analyse plus détaillée des conditions de terrain et des opérations est nécessaire pour mieux comprendre ces variations.

3.3 La préparation des échantillons

Échantillon : Partie d'un ensemble choisi pour représenter une ou plusieurs propriétés caractéristiques de cet ensemble.[25]

Avant toute analyse ou essai en laboratoire, la préparation de l'échantillon représente une étape cruciale. Elle conditionne directement la fiabilité, la reproductibilité et la représentatives des résultats analytiques. Une préparation inadaptée peut entraîner des conséquences notables, telles que :

— des résultats non représentatifs de l'échantillon réel,
— une digestion incomplète ou une perte partielle d'éléments cibles,
— une perte de temps liée à des analyses à reprendre ou des délais prolongés.

Pour choisir une méthode de préparation réellement adaptée aux besoins du laboratoire, plusieurs paramètres doivent être rigoureusement pris en compte, notamment :

— la technique analytique utilisée (ex. : SEM, EDS, ICP, etc.),
— la nature et la composition des échantillons,
— les éléments recherchés ainsi que leurs concentrations attendues,
— et le volume quotidien d'analyses à traiter.

Une bonne préparation conditionne donc non seulement la qualité des résultats, mais aussi l'efficacité globale du processus analytique. [25]

Une préparation rigoureuse est essentielle pour garantir la fiabilité des mesures physiques et mécaniques.

3.3.1 Sélection et préparation de l'échantillon

Un bloc de roche représentatif est sélectionné avec soin en veillant à ce qu'il soit adapté aux essais prévus. Sa surface est ensuite nettoyée, et une vérification visuelle est réalisée afin de s'assurer de l'absence de fissures majeures susceptibles d'influencer les résultats.

Fixation de l'échantillon dans la cuve de la carotteuse : Le bloc de roche sélectionné est fixé de manière rigide dans la cuve de la carotteuse afin d'assurer une stabilité optimale durant l'opération de carottage.

3.3.1.1 Description de l'appareil de carottage

Structure principale : L'ensemble du dispositif est monté sur une base métallique stable, assurant une fixation sécurisée de l'appareil pendant le forage. Le socle, muni de fentes, permet l'évacuation continue de l'eau et des boues générées.

Cuve métallique : Une cuve en acier inoxydable accueille l'échantillon de roche ainsi que l'eau nécessaire au refroidissement de l'outil de forage et à l'élimination des poussières et résidus de coupe.

Système de forage : Le système est constitué d'une carotteuse électrique montée sur un bras métallique guidé par deux roulements. L'outil de coupe utilisé est un foret creux — généralement une couronne diamantée ou un trépan — permettant un forage vertical précis et uniforme.

Échantillon de roche : Le bloc de roche est placé directement sous le foret et subit le processus de carottage.

Utilisation de l'eau : L'eau présente dans la cuve joue un rôle crucial dans le

refroidissement de l'outil de coupe et la réduction des émissions de poussières au cours du perçage (Epiroc, 2020)

FIGURE 3.2 – Appareil de carottage

3.3.2 Découpe et préparation des échantillons

Une fois les carottes extraites, celles-ci sont placées dans le système de fixation de la machine à scier. Cette étape vise à préparer des éprouvettes normalisées en coupant les extrémités irrégulières, puis en arasant les faces afin de les rendre planes et parallèles.

Description de la machine à scier et araser les éprouvettes

Conforme à la norme ASTM D4543, cette machine est spécialement conçue pour usiner des éprouvettes cylindriques, prismatiques ou cubiques à partir de blocs ou de carottes de roche. Elle peut traiter des carottes jusqu'à 75 mm de diamètre et 140 mm de longueur.

Elle est équipée de :

— Un système de fixation pour maintenir les blocs ou carottes,
— Une lame diamantée ou un disque abrasif,
— Un circuit d'arrosage intégré pour refroidir l'outil de coupe et limiter la production de poussières.

Accessoires disponibles :

— Lame diamantée Ø 230 mm,
— Disque abrasif Ø 230 mm,
— Pompe d'arrosage (230 V, 50 Hz) (ASTM D4543, 2015)

FIGURE 3.3 – Machine à Scier

Résultat :

Des échantillons cylindriques valides, aux extrémités planes, conformes aux normes pour notre cas l'échantillons valide est supérieur ou égal à 108cm.

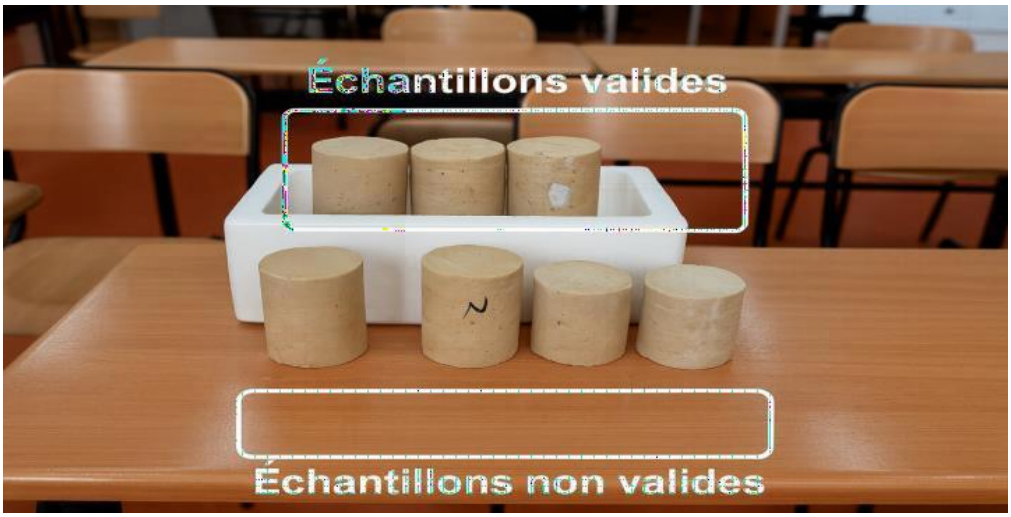

FIGURE 3.4 – Échantillons valides et non valides.

3.3.3 Séchage

Objectif :Éliminer l'humidité pour obtenir des mesures précises.

Procédure : Placez l'échantillon dans une etuve à 106°C pendant 24h.

FIGURE 3.5 – Etuve pour séchage des échantillons

3.4 Essaie laboratoire :

Afin de compléter l'analyse in situ de la forabilité des roches, une série d'essais en laboratoire a été réalisée sur des échantillons prélevés par carottage. Ces essais ont pour objectif de déterminer plusieurs propriétés physiques et mécaniques fondamentales des matériaux, indispensables pour comprendre leur comportement en contexte de forage et pour interpréter de manière rigoureuse les résultats de terrain.

Les essais physiques, tout d'abord, permettent de caractériser la roche à travers la masse volumique et la densité. Ces paramètres fournissent des informations essentielles sur la structure interne du matériau, sa compacité, ainsi que la présence éventuelle de porosité ou de discontinuités. La mesure de la masse volumique dans différents états (à l'air libre, humidifié, séché) permet également d'évaluer l'absorption d'eau et les variations de comportement en fonction des conditions environnementales. Les essais mécaniques, quant à eux, visent à évaluer la résistance du matériau aux sollicitations mécaniques. Deux types d'essais ont été menés :

— L'essai de compression uniaxiale, qui permet de mesurer la résistance maximale d'un échantillon soumis à une charge axiale croissante jusqu'à sa rupture.
— L'essai brésilien, qui permet d'estimer la résistance à la traction indirecte à partir d'un chargement diamétral sur un disque rocheux.

L'ensemble de ces essais fournit une base solide pour interpréter la qualité mécanique des roches extraites dans les différentes zones étudiées, et permettra dans le chapitre suivant d'établir des corrélations quantitatives entre ces propriétés et l'indice de forabilité calculé.

3.4.1 Essaie pour les propriétés physiques

3.4.1.1 La masse volumique

Mesure de la masse de chaque échantillon

Peser chaque échantillon (choisir judicieusement le nombre de morceaux permettant une précision suffisante) à l'aide de la balance fournie pour :

État à l'air libre :

L'état à l'air libre correspond à la masse de l'échantillon pesé directement sans traite-

ment particulier, tel qu'il est après prélèvement et avant immersion ou séchage.

État humide : Pour obtenir l'état humide des carottes, les carottes sont plongées dans un bidon rempli d'eau afin qu'elles soient complètement imbibées d'humidité.

Cette immersion permet de conserver leur teneur en eau.

État sec : Pour obtenir l'état sec des carottes, une étuve a été utilisé afin de les sécher. Ce procédé permet d'éliminer l'eau contenue dans les carottes, ce qui modifie leur structure en la rendant plus sèche

TABLEAU 3.3 – Mesures de masse dans les trois zones

Mesure	**ZONE 1**	**ZONE 2**	**ZONE 3**
Masse à air libre (g)	423,3	572,2	576,1
Masse humide m_{humide} (g)	373,1	614,9	611,5
Masse sèche $m_{\text{sèche}}$ (g)	320,9	429,1	443,3

Mesure du volume de chaque échantillon

Première méthode

— Mettre un volume V d'eau dans l'éprouvette graduée à l'aide d'un bécher
— Ajouter l'échantillon de roche
— Noter le volume V'
— Le volume de l'échantillon de roche est V'-V

Deuxième méthode

— Remplir à l'aide du bécher le vase à trop plein de Boudreau jusqu'à débordement dans un autre bécher.
— Lorsque le débordement est terminé, vider le bécher et le placer sous le bec du vase.
— Immerger délicatement l'échantillon de roche dans le vase.
— Laisser l'eau s'écouler puis la transvaser dans l'éprouvette graduée.
— Lire la graduation pour déduire le volume de la roche.

Troisième méthode

- Calculer directement le volume car on a utilisé des carottes de forme
- Les volumes sont mesurés selon trois états : à l'air libre, humide (vh) et sec (vs)

TABLEAU 3.4 – Tableau des Volumes par Zone

3.4. Essaie laboratoire :

Mesure	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3
Volume à air libre (cm³)	176,3	240,47	240,47
Volume humide v_h (cm³)	676,80	1 052,79	1 043,39
Volume sec v_s (cm³)	611,00	789,59	798,99

Ainsi :

Calcul de la Masse Volumique

TABLEAU 3.5 – Les Masses Volumiques mesurées dans les différentes zones d'échantillonnage

Zone	ρ_{air} (g/cm³)	ρ_{humide} (g/cm³)	ρ_{sec} (g/cm³)
Z1	2,40	0,55	0,53
Z2	2,38	0,58	0,54
Z3	2,40	0,59	0,55

3.4.1.2 Densité

La densité est le rapport entre la masse volumique de l'échantillon et celle de l'eau (1 g/cm3), ou bien le marteau Schmidt pour mesure de densité.[26]

TABLEAU 3.6 – Densités apparente, humide et sèche des échantillons de calcaire par zone

Zone	Densité (d_{air})	Densité (d_{humide})	Densité (d_{sec})
Z1	2,40	0,55	0,53
Z2	2,38	0,58	0,54
Z3	2,40	0,59	0,55

Interprétation des résultats

l'analyse des carottes de calcaire a révélé une masse volumique moyenne de 2,4 g/cm3 à l'air libre, ce qui correspond à un calcaire relativement compact. Cependant, les mesures réalisées à l'état humide et sec indiquent une baisse marquée de la masse volumique (entre 0,53 et 0,59 g/cm3), révélant une porosité interne significative. Cette baisse peut être attribuée à la présence de pores intergranulaires qui se vident ou se remplissent selon l'état de saturation de l'échantillon.

Cette porosité exerce une influence directe sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression, fragilité) et hydrauliques (perméabilité) du matériau. Ces résultats sont essentiels pour évaluer la stabilité, la durabilité et l'adaptabilité des formations calcaires dans des contextes géotechniques ou de génie civil, notamment pour les fondations, soutènements ou projets souterrains.

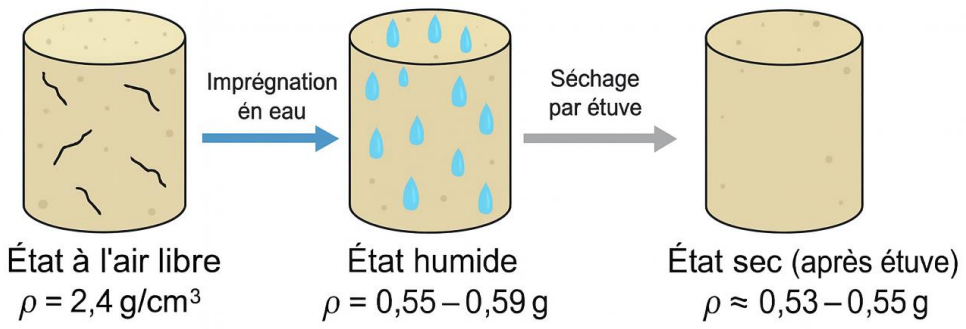

Tableau des Masses par Zone

FIGURE 3.6 – .Évolution de la masse volumique en fonction de l'état d'humidité du calcaire.

3.4.2 Propriétés mécaniques étudiées

3.4.2.1 Résistance à la compression [l'essai Franklin] :

Objectif de l'essai

Déterminer la résistance à la compression ponctuelle d'un échantillon de roche, généralement extrait par carottage. Cet essai est utilisé pour estimer la résistance mécanique des roches, même avec de petits échantillons.[28]

Principe de l'essai :

- Une éprouvette rocheuse est placée entre deux pointes tronconiques alignées.
- On mesure la distance H entre les pointes lorsqu'elles touchent l'échantillon.
- Une force F est appliquée progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon.
- On observe la forme de la rupture pour valider l'essai.
- Mesure de la force maximale (Fmax) et de la distance H entre les pointes.
- Dispositif rigide assurant une compression axiale.

3.4. Essaie laboratoire :

FIGURE 3.7 – .Appareil d'essai Franklin pour la détermination de la résistance à la compression sur échantillon cylindrique

Résultat :

TABLEAU 3.7 – Résistance à la compression uniaxiale R_c par zone

Zone	R_c **(MPa)**
Zone 1	7,6
Zone 2	11,89
Zone 3	7,0

3.4.2.2 Essai brésilien

La résistance à la traction des roches, difficile à mesurer directement en raison de la fragilité du matériau, est généralement déterminée par un essai indirect appelé essai brésilien. Cet essai est simple à mettre en œuvre sur le terrain ou en laboratoire et fournit une estimation fiable de Rt.

Principe de l'essai

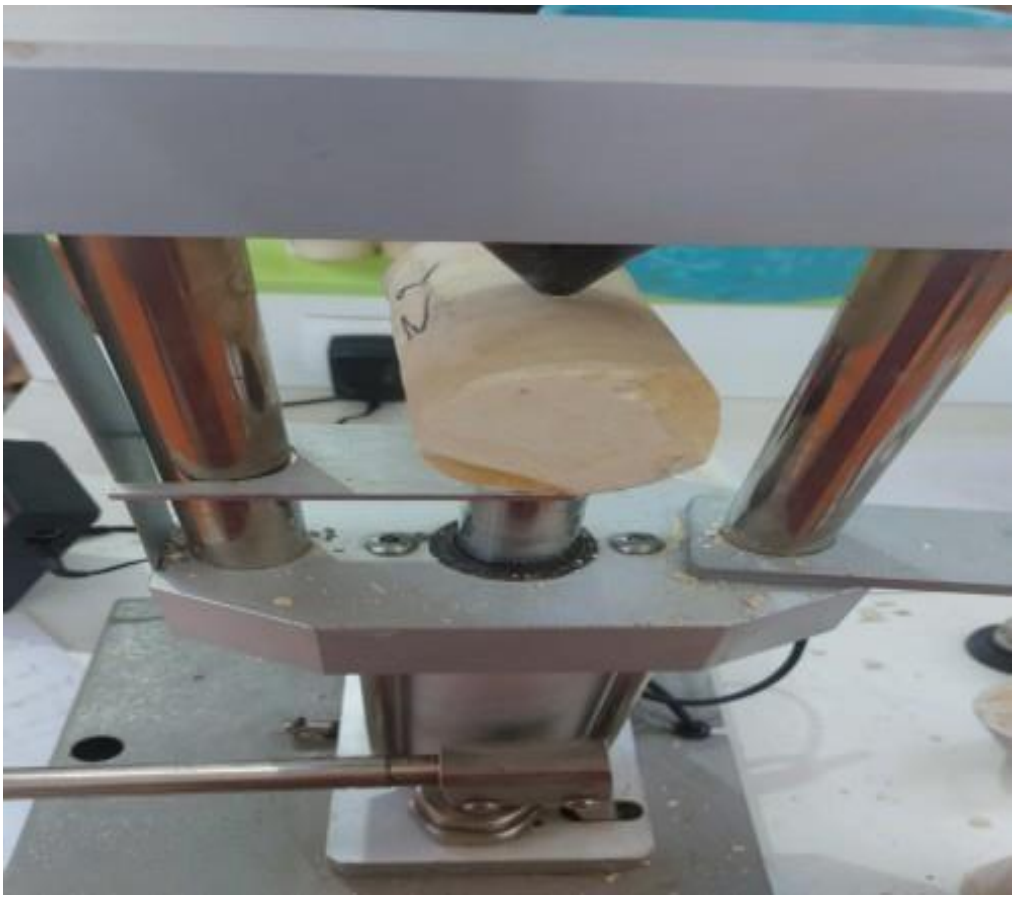

FIGURE 3.8 – Échantillon placé pour l'essai brésilien (Laboratoire Mines et Métallurgie - ENSMM Annaba).

3.4. Essaie laboratoire :

Un échantillon cylindrique de roche, généralement de 50 mm de diamètre et de 25 mm d'épaisseur, est placé horizontalement entre les mâchoires d'une presse de compression. La force est appliquée selon un plan diamétral, jusqu'à ce que l'échantillon se rompe par traction perpendiculairement à l'axe de l'effort.

Calcul de Rt

La résistance à la traction indirecte est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$R_t = \frac{2F_{\max}}{\pi DL} \tag{3.1}$$

— R_t : Résistance à la traction (MPa)

— F : Force maximale appliquée à la rupture (N)
— D : Diamètre de l'éprouvette (mm)
— L : Longueur (ou hauteur) de l'éprouvette (mm)
— $\pi \approx 3{,}1416$: constante mathématique

Conditions d'essai

- L'éprouvette doit avoir des faces planes et parfaitement parallèles.
- L'alignement dans la presse doit être précis pour éviter une rupture en compression.
- L'essai est répété plusieurs fois pour obtenir une valeur moyenne représentative.

Cette méthode permet de simuler les contraintes de traction qui peuvent exister dans les massifs rocheux, notamment autour des vides, galeries ou fondations profondes.

Types de rupture :

Essai valide : rupture axiale nette.
— Essai non valide : rupture trop localisée ou irrégulière.

3.4. Essaie laboratoire :

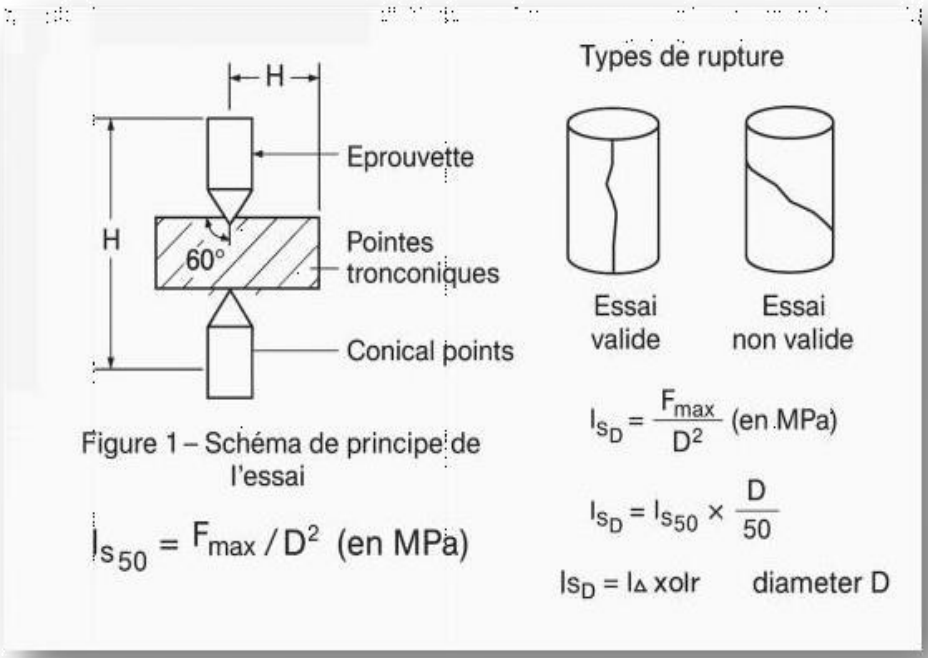

FIGURE 3.9 – type valide et non valides des échantillons

Résultat :

Tableau 3.8 – Résistance à la traction indirecte (R_t) par zone

Zone	R_t **(MPa)**
Zone 1	0,8
Zone 2	1,3
Zone 3	0,8

3.5 Interprétation Géotechnique par Zone

3.5.1 a) Zone 1

Calcaire compact, homogène

Rc = 7,6 MPa ; Rt = 0,8 MPa ; Densité = 2 400 kg/m3

- Roche homogène, légèrement stratifiée, avec une résistance modérée.
- Les propriétés mécaniques sont stables, ce qui facilite les opérations de forage.
- Adaptée à des travaux classiques en génie civil tels que les fondations ou les soutènements.

Conclusion : Zone exploitable facilement, sans contraintes majeures.

3.5.2 b) Zone 2

Calcaire massif, faillé

Rc corrigée = 11,89 MPa ; Rt estimée = 1,0 à 1,3 MPa ; Densité = 2 380 kg/m3

- Roche plus dure que celle de la zone 1, avec une faille géologique visible.
- Cassure de tige lors du forage – témoigne de zones localement instables ou d'un durcissement ponctuel.
- Les conditions requièrent un équipement de forage renforcé .

Conclusion : Zone techniquement plus exigeante, à traiter avec précaution.

3.5.3 c) Zone 3

Calcaire granuleux, bonne pénétrabilité

$R_c \approx 7,0$ MPa ; $R_t = 0,8$ MPa ; densité = 2400 kg/m³.

- Roche à structure granuleuse, plus poreuse, mais à très bonne pénétrabilité.
- Permet un forage rapide malgré une résistance mécanique légèrement inférieure.
- À surveiller pour des applications à grande profondeur ou sollicitations importantes.

Conclusion : Zone favorable pour forages rapides et peu profonds.

3.5.4 Synthèse comparée des trois zones

Afin de résumer les caractéristiques géomécaniques principales des trois zones étudiées, le tableau suivant présente une comparaison synthétique des résultats obtenus en laboratoire pour la résistance à la compression uniaxiale (Rc), la résistance à la traction indirecte (Rt) et la densité. Cette synthèse est complétée par une évaluation géo- technique qualitative pour chaque zone, basée sur l'ensemble des observations et mesures effectuées.

TABLEAU 3.9 – Synthèse comparée des propriétés géomécaniques et de l'évaluation géotechnique des trois zones d'étude

Zone	R_c **(MPa)**	R_t **(MPa)**	**Densité (kg/m³)**	**Évaluation géotechnique**
Zone 1	7,6	0,8	2400	Bonne homogénéité, zone exploitable
Zone 2	11,89	1,3	2380	Dure et faillée, équipements renforcés requis
Zone 3	7,0	0,8	2400	Bonne pénétrabilité, à surveiller en Profondeur

3.5.5 Évaluation de l'Indice de Forabilité (IF) et Classification Df

L'indice de forabilité (IF) est déterminé selon la formule suivante :

$$IF = 0{,}007 \times (\delta_c + \tau) + 0{,}7 \times \gamma \qquad (3.2)$$

où :

— δ_c : Résistance à la compression uniaxiale (kgf/cm²)

— τ : Résistance au cisaillement ($\tau = 0{,}25 \times \delta_c$)

— ρ : Densité de la roche

Résultats et classification Df :

L'indice de forabilité (*IF*) constitue une variable synthétique permettant de classer les formations rocheuses en fonction de leur aptitude au forage. Il est calculé en combinant la résistance à la compression (exprimée en kgf/cm²), la résistance au cisaillement (τ) et la densité de la roche (ρ), selon une formule empirique adaptée aux roches sédimentaires.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs corrigées de ces paramètres pour chaque zone étudiée, ainsi que la classification Df correspondante, utilisée pour l'interprétation géotechnique.

TABLEAU 3.10 – Résultats de l'indice de forabilité (IF) et classification Df des trois zones calcaires

Zone	*f (Protodyakonov)*	*σc (kgf/cm²)*	τ (kgf/cm^2)	Densité	IF brut	IF (Df)
Zone 1	3	300	75	2400	1680,68	1,68
Zone 2	3	300	75	2380	1667,06	1,67
Zone 3	3	300	75	2400	1680,62	1,68

Interprétation

Les valeurs de l'indice de forabilité (*IF*) obtenues pour les trois zones sont relativement proches les unes des autres, oscillant entre 1667 et 1681, ce qui, une fois ramenées à l'échelle Df (par division par 1000), correspond à des indices Df compris entre 1,67 et 1,68. Selon les classifications géotechniques standardisées, ces valeurs situent les matériaux dans la classe Df des roches dures de type calcaire ou marne compacte, avec une aptitude modérée à difficile au forage.

Malgré cette classification globalement homogène, de légères différences sont à noter :

— **Zone 1** présente un IF (Df) de 1,68, correspondant à un calcaire modérément dur mais homogène, ce qui explique la bonne pénétrabilité observée sur le terrain. Le rapport entre la résistance à la compression (R_c) et la densité confirme un équilibre favorable pour un forage régulier, sans contraintes techniques majeures.

— **Zone 2**, bien qu'affichant la plus forte résistance à la compression (11,89 MPa), se distingue par un IF légèrement plus bas (1,67). Ce résultat peut paraître paradoxal mais s'explique par une densité légèrement inférieure et une résistance au cisaillement plus élevée, révélant une structure plus dense mais potentiellement fissurée, typique des zones faillées. En pratique, cela se traduit par une forabilité plus difficile et des risques mécaniques accrus (casse de tige, vibrations).

— **Zone 3** affiche une résistance plus faible mais un IF équivalent à celui de la Zone 1 (1,68), soulignant la bonne pénétrabilité observée sur le terrain malgré une résistance mécanique inférieure. Cela peut être attribué à une porosité légèrement plus développée ou à une microstructure granuleuse facilitant la rupture sous l'action de l'outil de forage.

L'analyse croisée des valeurs de R_c, τ , et ρ montre que l'indice IF ne dépend pas uniquement de la résistance mécanique brute, mais bien d'un équilibre entre la cohésion interne de la roche, sa compacité, et son comportement sous contrainte.

Ces résultats confirment ainsi l'utilité de l'indice IF comme indicateur synthétique fiable pour classer les formations calcaires en contexte de forage.

Enfin, cette homogénéité relative entre les valeurs de Df masque en réalité des variabilités locales importantes mises en évidence par les essais de terrain, notamment en zone 2. Cela souligne la nécessité de coupler les mesures de laboratoire avec des observations pratiques pour une interprétation géotechnique complète.

3.6 Conclusion générale du chapitre

Ce chapitre a été consacré à l'analyse approfondie de la forabilité de trois types de roches calcaires, en combinant les résultats des essais *in situ* et des expérimentations en laboratoire. À travers l'étude de la vitesse de pénétration, des propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression uniaxiale (Rc) et la résistance à la traction indirecte (Rt), ainsi que le calcul de l'indice de forabilité (IF), nous avons pu dresser un profil géotechnique détaillé de chaque zone étudiée.

La zone 1, constituée d'un calcaire homogène et légèrement stratifié, a démontré une pénétrabilité stable et des propriétés mécaniques modérées, la rendant globalement favorable aux travaux de forage classiques. En revanche, la zone 2, affectée par des discontinuités géologiques et une structure plus compacte, s'est révélée difficile à forer, avec des temps d'exécution plus longs et des contraintes techniques plus importantes. Cette zone exige des équipements renforcés et une planification minutieuse des opérations. Enfin, la zone 3, composée d'un calcaire granuleux, a présenté la meilleure pénétrabilité, bien que sa résistance mécanique soit légèrement inférieure. Cela la rend idéale pour les forages rapides à faible profondeur.

L'ensemble des résultats obtenus confirme l'influence directe des caractéristiques géologiques et mécaniques des roches sur la performance des opérations de forage. La mise en relation des données de terrain et des résultats de laboratoire a permis de valider les tendances observées, tout en fournissant des éléments d'aide à la décision pour les futures campagnes de forage. De plus, l'indice de forabilité calculé pour chaque zone renforce la pertinence de l'approche méthodologique adoptée.

Ces résultats préliminaires posent ainsi les bases de l'analyse corrélative qui sera développée dans le chapitre suivant. Cette dernière étape visera à établir des relations quantitatives entre les propriétés géomécaniques des roches et leur forabilité, dans l'objectif d'améliorer la prédictibilité des comportements en phase de chantier et de contribuer à une meilleure gestion des ressources et des coûts.

Chapitre 4

Présentation des résultats expérimentaux

Chapitre 4

Présentation des résultats expérimentaux

4.1 Introduction

Ce chapitre constitue le cœur de l'analyse expérimentale notre étude. Il vise à présenter de manière structurée les résultats obtenus à la suite des campagnes d'essais réalisées à la fois sur le terrain (in situ) et en laboratoire. Ces essais ont permis de caractériser les roches calcaires extraites de trois zones géologiques distinctes du site d'exploitation de la SCMI Meftah (Zone 1, Zone 2 et Zone 3), afin d'en évaluer la forabilité, c'est-à-dire leur aptitude à être traversées par un outil de forage. Les données récoltées concernent d'une part les propriétés physiques et mécaniques des roches, mesurées à partir d'échantillons prélevés par carottage.

Ces propriétés incluent :

— la masse volumique (dans ses états sec, naturel et humide).

— la densité relative des matériaux.

— la résistance à la compression uniaxiale (Rc), obtenue via des essais normalisés.

— et la résistance à la traction indirecte (Rt), déterminée par l'essai brésilien.

D'autre part, des mesures directes de vitesse de pénétration (PR) ont été effectuées in situ, en utilisant la foreuse Epiroc PowerROC D55, dans des conditions contrôlées. Ces données permettent de quantifier la performance du forage sur chaque zone étudiée. À partir de l'ensemble de ces résultats, l'indice de forabilité (IF) est calculé selon une formule empirique prenant en compte la résistance du matériau. L'IF permet ensuite une classification normalisée des roches selon leur difficulté de forage, en se référant aux échelles géotechniques internationales (Df).

L'objectif de ce chapitre est triple :

— Présenter les résultats bruts et calculés, sous forme de tableaux et de figures explicatives.

— Visualiser les relations entre les différents paramètres mesurés, notamment à travers des nuages de points illustrant les corrélations entre PR et les propriétés géotechniques (R_c, ρ, IF. . .).

— Proposer une première interprétation analytique des comportements observés, en comparant les zones entre elles et en identifiant les facteurs déterminants de la forabilité.

L'ensemble de ces analyses servira de base pour le chapitre suivant, consacré aux corrélations statistiques, aux tests de dépendance, ainsi qu'à une tentative de modélisation prédictive du comportement de forage selon les caractéristiques des roches. Ce travail expérimental permettra ainsi de contribuer à une meilleure optimisation des opérations de forage en contexte calcaire.

4.2 Résultats expérimentaux

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des données physiques, mécaniques et opérationnelles mesurées ou calculées pour les trois zones d'échantillonnage (Z1, Z2 et Z3). Il présente les paramètres géotechniques fondamentaux des roches (masse volumique, densité, résistance à la compression R_c, résistance à la traction R_t), la vitesse moyenne de pénétration (PR) observée *in situ*, ainsi que les valeurs de cisaillement estimé (τ) et de l'indice de forabilité (IF) obtenu à partir de la formule empirique combinant R_c, τ et ρ. Ces valeurs permettent de comparer de manière intégrée le comportement au forage des différentes zones et de justifier les différences de performances observées sur le terrain.

TABLEAU 4.1 – Paramètres physiques, mécaniques et opératoires mesurés et calculés pour les trois zones d'étude.

Zone	ρ_{air} (g/cm3)	ρ_{humide} (g/cm3)	ρ_{sec} (g/cm3)	Densité	R_c (MPa)	R_t (MPa)	PR (m/min)	τ (MPa)	IF
1	2.40	0.55	0.53	2.40	7.60	1.30	0.52	1.90	1.6801
2	2.38	0.58	0.54	2.38	11.89	1.60	0.30	2.97	1.6661
3	2.40	0.59	0.55	2.40	7.00	1.20	0.84	1.75	1.6801

4.3 Analyse des correlation graphiques

4.3.1 la vitesse de pénétration en fonction de la résistance à la compression Rc

Le graphique ci-dessous illustre la relation entre la résistance à la compression uniaxiale des roches (Rc) et la vitesse de pénétration mesurée sur le terrain. Il permet de vérifier l'existence d'une corrélation entre ces deux paramètres et de déterminer si Rc peut être considéré comme un indicateur pertinent de la forabilité.

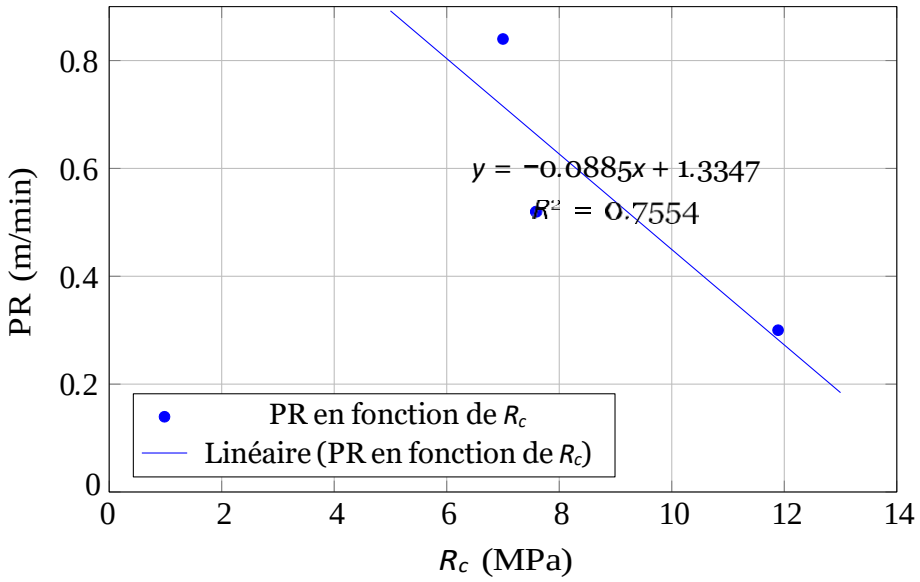

FIGURE 4.1 – Relation entre la vitesse de pénétration PR et la résistance à la compression R_c

Ce graphique met en relation la vitesse de pénétration (PR, exprimée en m/min) avec la résistance à la compression uniaxiale (R_c) des roches mesurées en MPa. On observe une tendance générale décroissante : plus la résistance R_c augmente, plus la vitesse de forage diminue. Cette relation négative est conforme aux attentes géomécaniques, puisque les matériaux plus résistants opposent davantage de résistance à la pénétration de l'outil de forage.

Une relation de corrélation a été établie entre la résistance à la compression uniaxiale (R_c) des roches calcaires et la vitesse de pénétration (PR) observée lors des opérations de forage.

4.3. Analyse des correlation graphiques

Les données expérimentales ont permis de tracer une droite de régression linéaire négative exprimée par l'équation suivante :

$$\mathbf{PR} = -0,0885 \cdot R_c + 1,3347$$

avec un degrés de confiance $R^2 = 0,7554$. Cette équation indique que la vitesse de pénétration diminue à mesure que la résistance mécanique de la roche augmente. Autrement dit, plus la roche est résistante à la compression, plus le forage est ralenti, ce qui s'explique par l'augmentation des efforts nécessaires à la rupture du matériau. Cette tendance est cohérente avec les résultats trouvés dans la littérature, notamment *Singh et Goel (1999)* qui soulignent que la résistance mécanique est l'un des principaux facteurs influençant la forabilité d'une roche, aux côtés de paramètres tels que l'abrasivité ou la fissuration.

Le modèle obtenu présente un bon ajustement statistique ($R^2 > 0,75$), ce qui renforce sa validité dans le cadre d'une première estimation. Toutefois, il convient de noter que ce modèle a été construit à partir d'un échantillon limité (trois points), ce qui constitue une limite méthodologique. Pour améliorer la fiabilité de la modélisation, un élargissement du nombre d'échantillons et une analyse multiparamétrique intégrant d'autres caractéristiques géotechniques (porosité, densité, indice de Schmidt) seraient recommandés. Malgré cette limite, la relation R_c–PR permet déjà d'orienter les choix techniques en carrière, notamment en matière de sélection d'outils et d'optimisation des séquences de forage [29, 30].

La relation inverse R_c–PR observée dans cette étude confirme les résultats obtenus aussi par *Kahraman (2003)* et *Goktan (1991)*, qui ont également mis en évidence une tendance linéaire décroissante entre la résistance à la compression des roches et leur vitesse de pénétration. Ce type de corrélation, bien documenté dans la littérature, reflète l'effet direct de la dureté du matériau sur la performance des outils de forage rotatif.

4.3.2 Vitesse de pénétration en fonction de la masse volumique

Le graphique suivant permet d'analyser l'effet de la masse volumique des roches (ρ), mesurée à l'air libre , sur la vitesse de pénétration moyenne (PR). Cette variable physique, bien qu'indirecte, peut refléter des différences de compacité ou de porosité entre les échantillons, susceptibles d'influencer la facilité de forage. En représentant ces deux paramètres sur un même plan, on cherche à identifier une tendance générale et à évaluer si ρ peut jouer un rôle déterminant dans la variation des performances de pénétration.

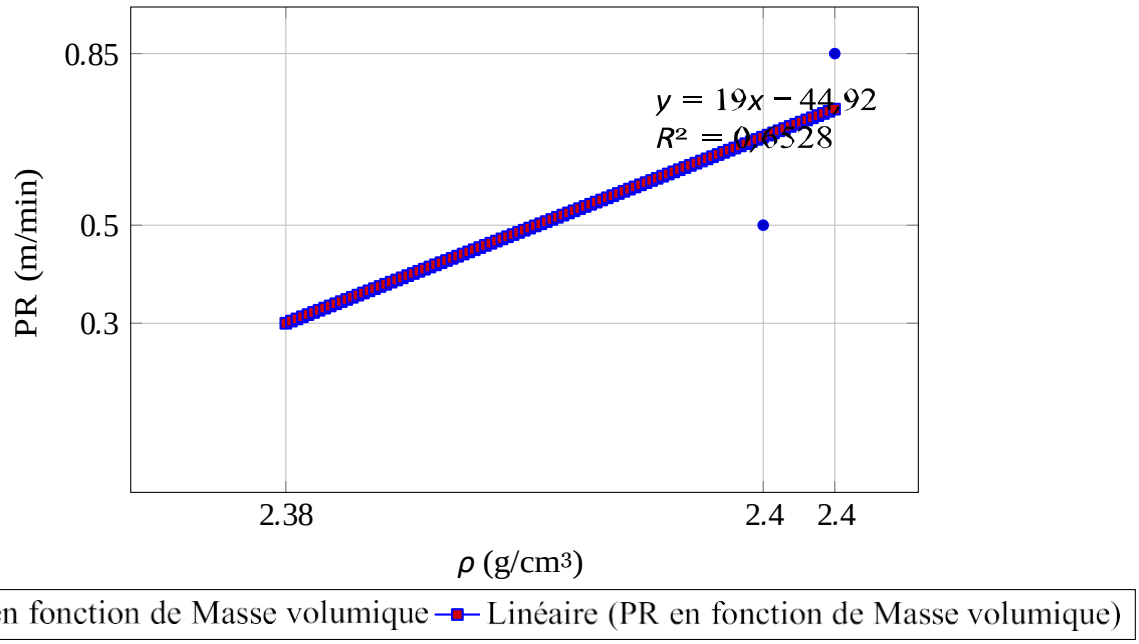

FIGURE 4.2 – Graphique représentant la vitesse de pénétration (PR) en fonction de la masse volumique (ρ) à l'air libre.

L'analyse de la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et la masse volumique à l'air libre (ρ) des roches analysées met en évidence une tendance relativement peu marquée. En effet, contrairement à la résistance à la compression (R_c), la masse volumique ne semble pas exercer une influence directe et significative sur les performances de forage.

Par exemple, les roches issues des zones **Z1** et **Z3** présentent des masses volumiques similaires (environ 2.40 g/cm3, mais affichent des vitesses de pénétration très différentes. À l'inverse, la zone **Z2**, légèrement plus dense (environ 2.38 g/cm3), est associée à la vitesse de forage la plus faible.

La droite de régression obtenue montre une pente croissante et un degré de confiance

(R^2) modeste, ce qui indique une faible corrélation linéaire entre ρ et PR.

Ces résultats suggèrent que la masse volumique ne constitue pas, à elle seule, un facteur explicatif suffisant des variations de la vitesse de forage. Elle peut cependant jouer un rôle indirect en influençant d'autres paramètres mécaniques, tels que l'usure des outils de forage ou le mode de rupture de la roche.

Cette conclusion est corroborée par les travaux de HOSEINIE ET AL. (2014), qui ont observé une corrélation modérée entre la masse volumique et la vitesse de forage, avec un degré de confiance $R^2 = 0{,}51$.

Ainsi, bien que la densité apparente soit un indicateur utile dans l'évaluation géotechnique globale, elle doit être considérée comme un paramètre complémentaire plutôt qu'un déterminant principal des performances de pénétration.[31]

4.3.3 Vitesse de pénétration en fonction de l'indice de forabilité (IF)

Le troisième graphique analyse la corrélation entre l'indice de forabilité (IF) et la vitesse moyenne de pénétration (PR). L'**IF** est une grandeur synthétique calculée à partir de la résistance à la compression (R_c), du cisaillement estimé (τ) et de la masse volumique (ρ), selon une formule empirique. Ce paramètre est censé représenter globalement la difficulté de forage d'un matériau rocheux.

Ce graphique permet donc de vérifier si cet indice intégré reflète fidèlement les performances observées sur le terrain et s'il peut être utilisé comme critère fiable de classification géotechnique.

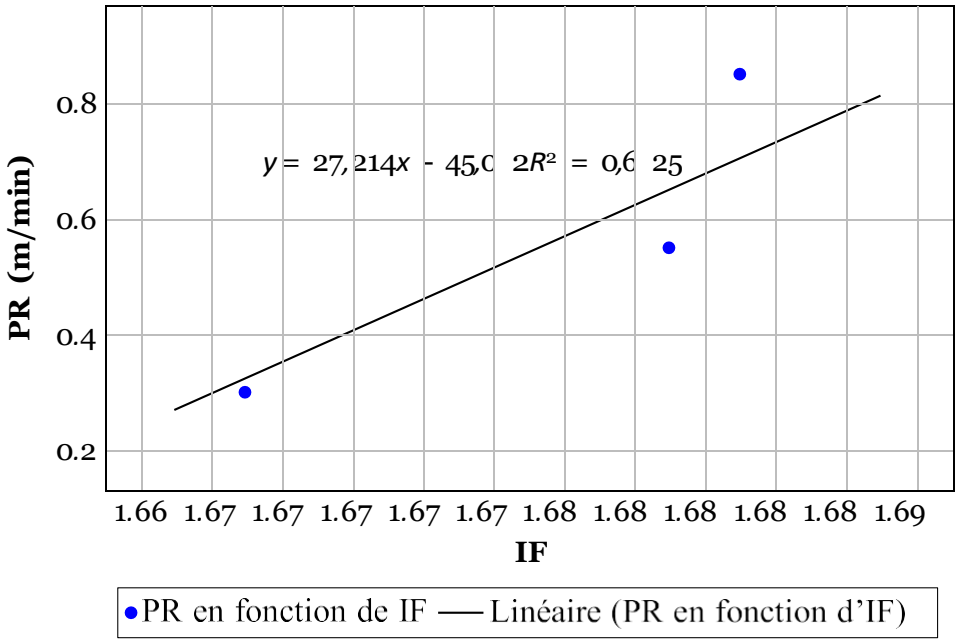

FIGURE 4.3 – Graphique représentant la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et l'indice de forabilité (IF).

Le graphique ci-dessus explore la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et l'indice de forabilité (IF), une grandeur composite intégrant plusieurs paramètres géomécaniques fondamentaux tels que la résistance à la compression uniaxiale, la résistance au cisaillement estimée, et la densité apparente de la roche. Contrairement aux corrélations précédemment établies avec des paramètres isolés (R_c ou ρ), la tendance ici observée est nettement linéaire et croissante. L'équation de la droite de régression, $y = 27{,}214x - 45{,}042$, associée à un coefficient de détermination $R^2 = 0{,}6525$, suggère une corrélation modérée à forte entre l'IF et la vitesse de forage.

Cette relation confirme la pertinence de l'IF en tant qu'indicateur global de la forabi-

lité, en permettant de capter de manière synthétique l'influence simultanée de plusieurs propriétés physico-mécaniques de la roche. Plus l'IF est élevé, plus la roche est considérée comme « forable », traduisant une facilité accrue de pénétration. Cette approche multidimensionnelle dépasse la lecture simpliste fondée uniquement sur la résistance ou la masse volumique, en intégrant leur effet cumulé de manière pondérée. Cela justifie pleinement l'usage de l'IF dans les contextes industriels, que ce soit pour la planification des forages, le choix des équipements ou l'optimisation du rendement opérationnel.

Par ailleurs, cette conclusion est renforcée par les travaux de KAHRAMAN *et al.* (2003), qui ont proposé et validé un indice de forabilité basé sur des corrélations multiples avec les propriétés mécaniques des roches, et par ceux de SAHOO & CHOUDHARY (2017), qui ont démontré l'efficacité prédictive de l'IF dans différents environnements géologiques. Ces études soulignent que l'IF constitue un excellent outil de classification géoméca- nique et d'aide à la décision dans l'industrie extractive, notamment dans les carrières de calcaire.[32]

4.3.4 Analyse de la relation entre PR et la densité relative

Le graphique ci-dessous étudie la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et la densité relative des roches calcaires échantillonnées sur le site de la SCMI Meftah. Contrairement à l'indice de forabilité ou à la résistance à la compression, la densité relative semble exercer une influence très limitée sur la vitesse de forage.

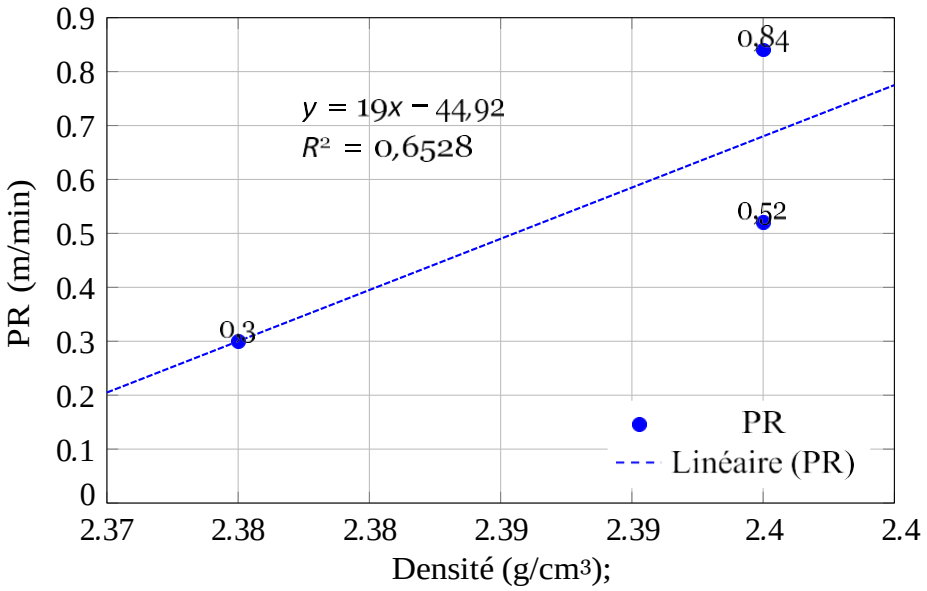

FIGURE 4.4 – Relation entre la vitesse de pénétration (PR) et la densité relative des roches calcaires

L'analyse de la relation entre la vitesse de pénétration (PR) et la densité relative des roches calcaires révèle une corrélation modérée, mais insuffisamment significative pour en faire un indicateur fiable de la forabilité à lui seul. La régression linéaire appliquée aux données expérimentales issues des trois zones étudiées donne l'équation suivante :

$$\mathbf{PR = 19{,}000 \times Densité - 44{,}920 \quad avec \quad R^2 = 0{,}6528}$$

Ce coefficient de détermination, inférieur à 0,70, suggère que seulement 65,28 % de la variance de la vitesse de forage peut être expliquée par la variation de la densité relative. Cela signifie que, malgré une apparente tendance croissante, la densité n'est pas le facteur dominant expliquant les différences de performance de forage observées sur le terrain.

La densité relative — exprimée comme le rapport entre la masse volumique de la roche et celle de l'eau (soit sans unité) — est un paramètre physique qui traduit la compacité du matériau. Théoriquement, une roche plus dense devrait résister davantage

à la pénétration, rendant le forage plus difficile. Toutefois, les résultats expérimentaux montrent que deux zones présentant une densité équivalente (Z1 et Z3 avec 2,40) peuvent présenter des vitesses de forage très différentes (0,52 et 0,84 m/min respectivement). À l'inverse, la zone Z2, légèrement moins dense (2,38), présente la vitesse de forage la plus faible (0,30 m/min).

Ce décalage indique que la densité, en tant que grandeur macroscopique, n'intègre pas d'autres facteurs structuraux cruciaux comme :

— la porosité interne.
— le degré de fissuration ou de stratification.
— la composition minéralogique.
— ou encore l'état d'altération du matériau.

Ainsi, la densité peut influencer indirectement la performance de forage, mais son impact réel est conditionné par des interactions complexes avec d'autres propriétés géo-mécaniques. C'est pour cette raison qu'elle est souvent intégrée à des indices composites, comme l'indice de forabilité (IF), qui permet une appréciation plus complète en combinant plusieurs variables (R_c, τ , ρ. . .).

Cette conclusion rejoint les résultats de Hoseinie et al. (2014), qui ont constaté une corrélation faible à modérée entre densité et performance de forage dans un contexte de roche dure, avec un coefficient R2 autour de 0,51. Leur étude souligne également l'importance d'adopter une approche multiparamétrique pour mieux prédire la réponse au forage en contexte industriel.[31]

4.4 Tableau récapitulatif des corrélations entre PR et les propriétés géotechniques

Ce tableau récapitule l'ensemble des équations de régression linéaire obtenues entre la vitesse de pénétration (PR) et les différentes propriétés géotechniques mesurées. Il permet d'identifier les paramètres les plus influents sur la forabilité des roches calcaires, en se basant sur les coefficients de détermination (R2).

TABLEAU 4.2 – Corrélations entre la vitesse de pénétration (PR) et divers paramètres géo- mécaniques

Paramètre	**Équation de régression**	**R²**	**Corrélation**
R_c (MPa)	PR = $-0{,}0885 \times R_c + 1{,}3347$	0,7554	Corrélation Négative forte
ρ (g/cm³)	PR = $19{,}000 \times \rho - 44{,}920$	0,6528	Corrélation Modérée
Densité relative	PR = 19,000× Densité −44,920	0,6528	Corrélation Modérée
Indice de forabilité IF	PR = 27,214× IF −45,042	0,6525	Corrélation Modérée

Le tableau met en évidence la force des corrélations établies entre la vitesse de pénétration (PR) et différentes propriétés géotechniques des roches calcaires. Il en ressort que la résistance à la compression uniaxiale (R_c) est le paramètre qui présente la meilleure corrélation linéaire avec PR, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0{,}7554$, traduisant une influence directe et significative sur la forabilité. Ce résultat confirme le rôle central de la résistance mécanique dans les phénomènes de rupture sous l'action de l'outil de forage.

Les paramètres masse volumique et densité relative présentent des corrélations modérées ($R^2 \approx 0{,}65$), indiquant qu'ils influencent la forabilité mais ne peuvent, à eux seuls, prédire de manière fiable les performances de pénétration. Ces paramètres reflètent plutôt des caractéristiques physiques globales (compacité, porosité), qui interagissent avec d'autres propriétés mécaniques.

Enfin, l'indice de forabilité (IF), en tant que paramètre composite intégrant R_c, τ et ρ, offre également une corrélation modérée ($R^2 = 0{,}6525$), confirmant sa pertinence comme outil prédictif synthétique. Son principal avantage réside dans sa capacité à agréger plusieurs dimensions de la géomécanique des roches, rendant son usage pertinent pour les analyses de terrain à visée opérationnelle.

En résumé, ce tableau permet de hiérarchiser les paramètres en fonction de leur influence sur la performance de forage et de justifier l'adoption d'une approche multivariée

dans la modélisation prédictive à venir (chapitre 5).

4.5 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de mettre en évidence l'impact des propriétés géotechniques des roches calcaires sur leur forabilité. En croisant les mesures de masse volumique, de densité, de résistances à la compression et à la traction avec les vitesses de pénétration relevées sur le terrain, plusieurs corrélations ont été établies. Parmi l'ensemble des paramètres étudiés, la résistance à la compression (Rc) et l'indice de forabilité (IF) se distinguent par leur forte influence sur la performance de forage, comme en témoignent les coefficients de détermination élevés obtenus à partir des modèles linéaires. À l'inverse, des paramètres comme la masse volumique présentent une corrélation plus faible, soulignant leur rôle secondaire, voire indirect. Ces résultats confirment que la forabilité ne dépend pas d'un seul paramètre isolé, mais d'un ensemble de caractéristiques mécaniques qui interagissent. L'IF, en tant qu'indice composite, se révèle particulièrement pertinent pour prédire les performances de forage dans un cadre opérationnel. Cette première phase d'analyse ouvre la voie à une modélisation statistique plus poussée. Le chapitre suivant approfondira cette démarche en validant les tendances par des outils d'analyse statistique et en élaborant des équations prédictives de la forabilité à partir des données expérimentales. Cette approche vise à proposer un outil d'aide à la décision fiable pour optimiser les opérations de forage en milieu calcaire.

Chapitre 5
Analyse statistique et modélisation de la forabilité

Chapitre 5

Analyse statistique et modélisation de la forabilité

5.1 Introduction

Ce chapitre vise à approfondir l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus en menant une analyse statistique des relations entre la vitesse de pénétration (PR) et plusieurs paramètres géotechniques des roches. L'objectif est de quantifier la force des corrélations observées au chapitre précédent, d'en vérifier la signification statistique, et de proposer une modélisation mathématique prédictive de la forabilité. Cette démarche permet de renforcer la validité des conclusions pratiques et de construire un outil d'aide à la décision pour les opérations de forage.

5.2 Méthodologie d'analyse

Les traitements statistiques ont été réalisés à partir des données issues des trois zones d'échantillonnage (Z1 à Z3), comprenant les mesures de la résistance à la compression (Rc), la masse volumique (ρ air), la résistance à la traction (Rt), et l'indice de forabilité (IF). L'analyse de corrélation s'est appuyée sur le coefficient de Pearson pour mesurer la linéarité des relations entre variables. Des régressions linéaires simples ont été appliquées pour modéliser séparément l'influence de chaque paramètre sur la vitesse de pénétration. Enfin, une régression multiple a été réalisée pour modéliser de manière conjointe l'impact combiné de plusieurs variables sur la forabilité.

5.2.1 Objectif de l'analyse

L'objectif de cette analyse est d'étudier comment la vitesse de pénétration (**PR**) lors du forage dans les roches calcaires est influencée par différents paramètres géotechniques : la résistance à la compression (R_c), la résistance à la traction (R_t) et la masse volumique à l'air libre (ρ_{air}). Ces relations sont établies à l'aide d'outils statistiques standard, notamment la corrélation de Pearson et la régression linéaire simple et multiple.

5.2.2 Paramètres étudiés

Les données utilisées dans cette étude proviennent d'essais réalisés en laboratoire et sur le terrain, et comprennent :

— R_c : résistance à la compression uniaxiale (MPa), mesurée selon les normes **ISRM**.
— R_t : résistance à la traction indirecte (MPa), déterminée par l'essai brésilien.
— ρ_{air} : masse volumique à l'air libre (g/cm³).
— PR : vitesse de pénétration moyenne (m/min), mesurée in situ à l'aide d'une foreuse Epiroc PowerROC D55.

5.3 Méthodes statistiques utilisées

5.3.1 Corrélation de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson (r) mesure la relation linéaire entre deux variables continues. Il est défini par la formule :

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Interprétation :

— $r > 1$: relation positive.
— $r < 0$: relation négative.
— $|r|$ proche de 1 : relation forte.

Exemples obtenus :

— PR et R_c : $r = -0.87$ (relation négative forte).
— PR et ρ_{air} : $r = +0.81$ (relation positive forte).
— PR et IF : $r = +0.81$ (relation positive forte) [29].

5.3.2 Régressions linéaires simples

Une régression linéaire simple consiste à ajuster une droite à un nuage de points entre PR et une seule variable (ex. R_c). L'équation générale est :

$$PR = a \times X + b$$

Où :

— X est le paramètre géotechnique,
— a est la pente (effet de X sur PR),
— b est l'ordonnée à l'origine (valeur de PR quand $X = 0$).

5.3.3 Régression multiple

La régression linéaire multiple combine plusieurs variables indépendantes pour expliquer une variable dépendante. L'équation obtenue dans l'étude est :

$$PR = 0.7894 + 0.3104 \times R_c + 1.6469 \times \rho_{\text{air}} - 5.0625 \times R_t$$

Interprétation :

— R_c et ρ_{air} ont un effet positif.
— R_t a un effet négatif.

Le coefficient de détermination $R^2 = 1.000$ signifie que le modèle explique 100 % de la variance. Ce résultat est à nuancer en raison du faible nombre de données (3 zones seulement) [33].

5.3.4 Validation du modèle et limites

Le modèle présente une forte cohérence interne mais souffre de limitations méthodologiques :

— Taille réduite de l'échantillon ($n = 3$).
— Risque de surajustement (overfitting).
— Hypothèses de linéarité non toujours vérifiées dans des matériaux hétérogènes.
— Possibles corrélations entre les variables explicatives (multicolinéarité)[29, 33].

5.4 Analyse de corrélation

Le tableau suivant présente les coefficients de corrélation linéaire de Pearson entre la vitesse de pénétration (PR) et les paramètres étudiés :

- **PR et R_c : $r = -0.87$ (corrélation négative forte)**
- **PR et ρ_{air} : $r = +0.81$ (corrélation positive forte)**
- **PR et IF : $r = +0.81$ (corrélation positive forte)**

Ces valeurs indiquent que la résistance à la compression est inversement corrélée à la vitesse de forage, tandis que la masse volumique et l'indice de forabilité présentent une corrélation directe. Ces résultats confirment les tendances observées graphiquement au chapitre précédent[29, 33].

5.5 Régressions linéaires simples

5.5.1 Vitesse de pénétration en fonction de R_c

Équation :

$$\mathbf{PR} = -0.0885 \times R_c + 1.3347$$

R2 = 0.755 Cette valeur indique que 75,5 % de la variation de la vitesse de pénétration est expliquée par la résistance à la compression.

La pente négative confirme qu'une roche plus résistante ralentit le forage.

5.5.2 Vitesse de pénétration en fonction de la masse volumique

Équation :

$$\mathbf{PR} = 19.0000 \times \rho_{air} - 44.9200$$

R2 = 0.653 La relation est positive mais modérée.

Cela indique une influence modérée de la masse volumique sur la performance de forage.

5.5.3 Vitesse de pénétration en fonction de l'indice de forabilité

Équation :

$$\mathbf{PR} = 27.2145 \times IF - 45.0421$$

R2 = 0.652 L'indice de forabilité présente une relation linéaire modérée avec la vitesse de pénétration,

ce qui confirme sa pertinence comme paramètre synthétique.

5.6 Modélisation par régression multiple

Afin d'intégrer simultanément l'effet de plusieurs paramètres géotechniques sur la vitesse de pénétration (**PR**), une régression linéaire multiple a été réalisée. Cette méthode permet d'évaluer l'influence combinée de la résistance à la compression (R_c), de la masse volumique à l'air libre (ρ_{air}) et de la résistance à la traction indirecte (R_t) sur la forabilité[29, 33] .

5.1 Proposition d'Outil Décisionnel et Analyse Économique

5.1.1 Matrice de sélection du mode de forage

Le tableau suivant présente une synthèse des propriétés géotechniques mesurées dans les trois zones étudiées, avec une proposition de méthode de forage adaptée en fonction de la résistance à la compression (Rc) et du diamètre (D) du forage. Une estimation approximative du coût de forage par mètre linéaire est également fournie[34].

TABLEAU 5.1 – Synthèse des propriétés mécaniques, indice de forabilité et paramètres de forage

Zone	R_c (MPa)	ρ_{air} (g/cm3)	R_t (MPa)	PR (m/min)	IF	D (mm)	Méthode
Z1	7.6	2.40	1.3	0.52	1.6801	90	Roto-percutant (hors trou)
Z2	11.89	2.38	1.6	0.30	1.6661	127	Roto-percutant (fond de trou)
Z3	7.0	2.40	1.2	0.84	1.6800	200	Roto-percutant (fond de trou)

5.1.2 Analyse détaillée des coûts de forage par zone

Le coût estimé par mètre foré est basé sur l'inverse de la vitesse de pénétration (PR), selon la formule :

$$\text{Coût (DA/m)} = \frac{1}{\text{PR}} \times 5000 \tag{5.1}$$

Cette estimation permet de comparer l'efficacité économique entre les différentes zones analysées[34, 35] .

Zone 1 – Coût estimé : 9 615 DA/m

- PR : 0,52 m/min
- R_c = 7,6 MPa (roche modérément résistante)
- **Analyse :** Coût modéré, compromis acceptable entre résistance et rendement. Zone exploitable avec optimisation.

Zone 2 – Coût estimé : 16 667 DA/m

- PR : 0,30 m/min
- R_c = 11,89 MPa (roche très compacte et résistante)
- **Analyse :** Coût le plus élevé, difficultés opérationnelles confirmées (tige cassée, blocage). Zone peu rentable sans renfort technique.

Zone 3 – Coût estimé : 5 952 DA/m

- PR : 0,84 m/min
- R_c = 7,0 MPa (roche plus favorable)
- **Analyse :** Meilleure rentabilité. Roche homogène, facile à forer. Zone prioritaire pour exploitation.

TABLEAU 5.2 – Corrélation entre la vitesse de pénétration, la résistance à la compression et l'efficacité économique du forage

Zone	PR (m/min)	R_c (MPa)	Coût estimé (DA/m)	Efficacité
Z3	0.84	7.0	5 952	Très rentable
Z1	0.52	7.6	9 615	Acceptable
Z2	0.30	11.89	16 667	Non rentable

5.1.3 Sensibilité des paramètres géotechniques

Le graphique suivant illustre l'effet des différentes propriétés géotechniques sur la vi- tesse de forage. Les corrélations linéaires (coefficients de Pearson) montrent les variables les plus influentes sur la performance du forage[34, 29]

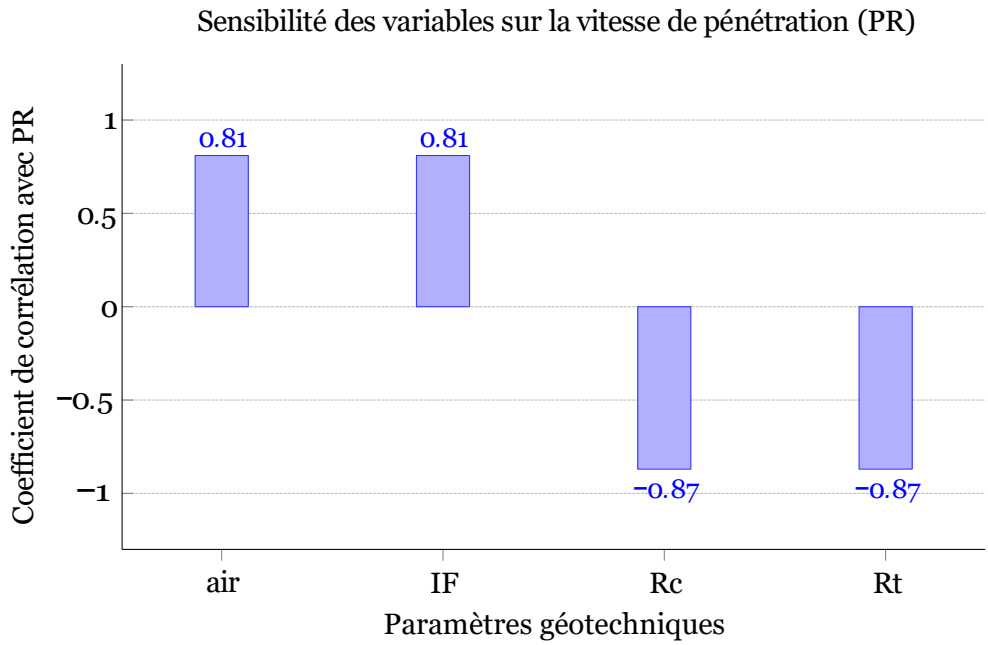

FIGURE 5.1 – **Influence des paramètres géotechniques sur la vitesse de pénétration (PR)** — Analyse *corrélationnelle*.

5.1.4 Explication du graphique de sensibilité

Ce graphique montre l'influence de chaque variable géotechnique sur la vitesse de pénétration (PR), exprimée par le coefficient de corrélation de Pearson :

— ρ_{air} **(masse volumique à l'air)** et **IF (indice de forabilité)** présentent une **corrélation positive forte avec PR (+0,81)**.

→ Plus ces valeurs augmentent, plus la vitesse de forage tend à être rapide.

— R_c **(résistance à la compression)** et R_t **(résistance à la traction)** présentent une **corrélation négative forte avec PR (-0,87)**.

→ Plus ces résistances sont élevées, plus la vitesse de pénétration diminue.

Ainsi, les roches plus denses (ρ) et à forabilité élevée (IF) favorisent un forage rapide, tandis que des roches mécaniquement résistantes ralentissent nettement la progression[34].

5.2 Discussion

Les résultats montrent que la résistance à la compression est le paramètre le plus déterminant de la forabilité, comme l'indique sa forte corrélation négative. L'indice de forabilité, qui combine plusieurs propriétés géotechniques, confirme sa pertinence par une corrélation positive forte avec PR. En revanche, la masse volumique montre une influence modérée. La modélisation multiple permet d'intégrer ces variables dans une équation unique, mais nécessite des validations complémentaires sur des échantillons plus nombreux.

5.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de valider statistiquement les liens entre les paramètres géotech- niques des roches calcaires et leur comportement en phase de forage. En particulier, la **résistance à la compression uniaxiale (Rc)** et l'**indice de forabilité (IF)** ont dé- montré une corrélation significative avec la **vitesse de pénétration (PR)**, confirmant leur rôle déterminant dans l'évaluation de la difficulté d'attaque des massifs rocheux.

L'analyse de corrélation a mis en évidence des relations linéaires claires, notamment :

— Une **corrélation négative forte entre R_c et PR**, traduisant une diminution de la vitesse de forage dans les roches plus résistantes.

— Une **corrélation positive entre IF et PR**, validant l'intérêt de cet indicateur synthétique pour représenter la forabilité.

L'approche a été approfondie par la mise en œuvre de régressions linéaires simples, puis d'une régression multiple intégrant simultanément R_c, ρ_{air} et R_t. L'équation obtenue présente un **ajustement parfait (R^2 = 1,000)**, indiquant une forte cohérence interne du modèle. Toutefois, la taille réduite de l'échantillon (trois zones) limite la portée prédictive du modèle. Ce constat souligne la nécessité d'élargir la base de données expérimentale afin de valider la robustesse de l'outil proposé.

En dépit de ces limites, cette modélisation fournit une base opérationnelle précieuse pour les ingénieurs praticiens. Elle ouvre la voie à une optimisation future des campagnes de forage à partir de mesures géotechniques accessibles, permettant ainsi une meilleure planification technique et économique des interventions.

Ce chapitre suivant proposera une **synthèse globale du travail**, mettant en évidence les apports scientifiques et techniques de l'étude, tout en formulant des perspectives concrètes d'amélioration et d'exploitation des résultats.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a permis d'explorer de manière approfondie les relations entre certaines propriétés géomécaniques des roches calcaires et leur comportement lors des opérations de forage. Menée dans le cadre d'un stage technique au sein de la SCMI Meftah, cette recherche s'est appuyée à la fois sur des mesures de terrain et des essais réalisés en laboratoire.

Le premier chapitre a dressé un portrait détaillé du site industriel et de son environnement géologique. Trois zones distinctes ont été étudiées, chacune présentant des caractéristiques propres ayant influencé les performances de forage observées.

Le second chapitre a permis de situer théoriquement l'étude, en revenant sur les principes du forage et sur les paramètres géotechniques clés comme la densité, la résistance à la compression ou encore la dureté. Ces éléments ont été mis en lien avec l'indice de forabilité, un outil d'aide à la décision largement utilisé dans le domaine.

Le troisième chapitre a exposé la méthodologie expérimentale mise en œuvre. Les vitesses de pénétration ont été mesurées sur site, tandis que des carottes de roche ont été soumises à divers tests de laboratoire pour en déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques. L'ensemble a fourni une base de données cohérente pour comparer les zones étudiées.

Dans le quatrième chapitre, les résultats ont été synthétisés et analysés. La zone 2 s'est distinguée par une faible pénétrabilité, ce qui est cohérent avec une résistance à la compression plus élevée et une structure interne plus compacte. À l'inverse, la zone 3 a montré un comportement plus favorable au forage.

Le cinquième et dernier chapitre a approfondi cette analyse en s'appuyant sur des outils statistiques. Des corrélations nettes ont été identifiées entre les propriétés mesurées et la vitesse de pénétration. Une équation de régression multiple a été proposée, intégrant les variables les plus influentes, bien que sa validité doit être testée sur un échantillon plus large.

En conclusion, cette étude a mis en lumière l'intérêt d'une approche intégrée, combinant observations de terrain et analyses en laboratoire, pour anticiper les performances de forage dans des environnements rocheux. Les résultats obtenus constituent une base solide pour améliorer les pratiques en carrière et orienter les choix techniques dès la phase de planification.

Pour approfondir cette démarche, il serait souhaitable d'élargir les échantillons géologiques étudié, d'intégrer des données liées aux conditions de chantier, et d'explorer des méthodes de modélisation plus sophistiquées. Une telle évolution permettrait d'aboutir à des pré- dictions plus robustes et adaptées à la réalité complexe du terrain.

Bibliographie

[1] Groupe GICA. Présentation des cimenteries du groupe gica, 2020. Disponible en ligne.

[2] A. Belkacem and B. K. Étude géotechnique et géomécanique des formations calcaires dans la région de blida (algérie). *Revue des Sciences de la Terre*, 39(2) :75–89, 2018.

[3] Iso 14001 :2015 environmental management systems – requirements with guidance for use, 2015.

[4] Epiroc. *PowerROC D55 Surface drill rig – Technical specification*, 2024. Documentation technique officielle.

[5] M. Bouhoun and A. C. Gestion durable des carrières de calcaire en algérie : cas de la carrière de meftah. *Revue Algérienne des Sciences Appliquées*, 6(1) :45–56, 2017.

[6] Laboratoire des Mines. Microscopie Électronique à balayage au sein du laboratoire des mines, alger el harrache, 2025. École Nationale Polytechnique (ENP), Alger.

[7] D. C. Wyllie and C. W. Mah. *Rock slope engineering : Civil and mining*. Spon Press, 4 edition, 2004.

[8] Jean-Paul Benzécri. *Mécanique des sols et géotechnique*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

[9] Mohamed Fredj. Étude du régime de forage dans les conditions de la carrière de calcaire. Master's thesis, Chouf-Amar M'Sila, 2011.

[10] B. A. Kennedy. *Surface Mining*. Baltimore, 2 edition, 1990.

[11] Jean-Paul Nguyen. *Techniques d'exploitation pétrolière*. Institut Français du Pétrole, Rueil-Malmaison, 1993.

[12] C. J. Jimeno, E. L. Jimeno, and F. J. A. Carcedo. *Drilling and Blasting of Rocks*. Balkema, Rotterdam, 1995.

[13] Advances in mechanical engineering. (n.d.).

[14] S. Tamrock. The drilling rate index (dri) – a new tool for characterizing rock drillability. Technical report, Sandvik Mining and Construction, 1999.

[15] H. L. Hartman. The effectiveness of indexing in percussion and rotary drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 3 :265–278.

[16] A. Bruland. *Hard Rock Tunnel Boring Machines*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2000.

[17] G. Degoutte and P. Royet. *Aide-mémoire de mécanique des sols*. 2005. Réédition, 99 pages.

[18] P. Delage and Y. Cui. Comportement mécaniques des sols non saturés. *Technique de l'Ingénieur, traité construction*, 1999.

[19] B. Djebrou. Traitement du sol par colonnes ballastées dans la région de blida. Master's thesis, Université Saâd Dahlab Blida, 2007.

[20] D. Petrouchkine. Revue scientifique n°3.

[21] J. A. Hudson and J. P. Harrison. *Engineering Rock Mechanics : An Introduction to the Principles*. Elsevier, 1997.

[22] R. D. Lama and V. V. S. Vutukuri. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, volume 1. Trans Tech Publications.

[23] Suggested methods for determining tensile strength of rock materials.

[24] M. Lavasseur. *Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa "glissement de terrain" : Exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec*. PhD thesis, Ville de La Baie, Québec, 2003.

[25] Pierre Gy. *Sampling of Particulate Materials : Theory and Practice*. Elsevier, Amsterdam, 1979.

[26] Samir Soukehal. Laboratoire mine et métallurgie annaba. Directeur du laboratoire, Annaba, Algérie.

[27] Astm d3967-08 : Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, 2008.

[28] E. Hoek and J. W. Bray. *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 3rd edition, 1981.

[29] S. Kahraman and B. N. Fowell. Dominant rock properties affecting the penetra- tion rate of percussive drills. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5) :711–723, 2003.

[30] B. Singh and R. K. Goel. *Rock Mass Classification : A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier, Oxford, 1999.

[31] S. Hoseinie, H. Ghasemi, M. Ataei, and M. KhaloKakaie. A laboratory study of rock properties affecting the penetration rate of top hammer drills. *Journal of Mining & Environment*, 5(1) :25–35, 2014.

[32] S. K. Sahoo and C. B. Singh. Effect of uniaxial compressive strength of rock on penetration rate and bit wear rate of drill. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 65(8) :455– 460, 2017.

[33] H. Yenice. Determination of drilling rate index based on rock strength using regression analysis. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(3) :e20181095, 2019.

[34] M. S. Ataei, J. S. Moarefvand, and M. Eslami. Evaluation of the effect of rock strength on drilling penetration rate. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(2) :219–225, 2015.

[35] A. Yilmaz, E. Poyraz, and G. Ozdemir. Drilling engineering assessment and cost analysis of oil and gas wells drilled in onshore of turkey. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208 :109420, 2022.