

## Remerciement

Tout d'abord, nous remercions **DIEU** de nous avoir donné le courage et la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, remercie nos enseignants et notre encadreur pour sa patience, ses conseils et ses efforts pour nous avoir suivé et diriger à élaborer ce travail.

Et, nous remercions aussi toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Notre parent, pour leur soutien exceptionnel tout au long de la rédaction de ce mémoire, et leur encouragement qui nous a donné la force d'aller de l'avant.

Merci à vous tous

## *Dédicace*

*Je remercie Dieu tout puissant de m' avoir aidé pour  
achever ce modeste travail.*

*À mes chers parents, ma mère « FERHI Beya » et  
mon père « SIAF Farid », pour l'éducation qu'ils  
m'ont prodiguée avec tous les moyens et au prix de tous  
les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour leur  
patience, leur amour et leurs encouragements que ce travail  
leur apporte joie et fierté.*

*À mes chers frères « SIAF achraf » et « SIAF  
Meriem » ;*

*Particulièrement mon encadreur PR. LOUAFI que je ne  
remercierai jamais assez, À mon collègue de travail,*

*Mr AMER Mohamed Amine, sans oublier mes amis  
surtout Moha CHENNAK, BENZERGA Aimen, TERMZI Achraf,  
BOUTRAA Abir et MAACHE Oumeima.*

**SIAF Messaoud**



## *Dédicace*

*Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé pour  
achever ce modeste travail.*

*À mes chers parents, ma mère « ACHOUR Meriem »  
et mon père « AMER M'hamed », pour l'éducation  
qu'ils m'ont prodiguée avec tous les moyens et au prix de  
tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour  
leur patience, leur amour et leurs encouragements que ce  
travail leur apporte joie et fierté.*

*À mes chers frères à toute ma famille ; particulièrement  
mon encadreur PR. LOUAFI que je ne remercierai jamais  
assez. À mon collègue de travail, Mr SIAF Messaoud, sans  
oublier mes amis surtout BENZERGA Aimen, TERMZI Achraf,*

*MAACHE Oumeima, BOUTRAA Abir Et ILhame.*

AMER Mohamed amine

TGV

# Résumé

## ملخص

تمثل هذه الدراسة تحليل العوامل المختلفة لتحسين عملية الحفر المنجمي لمنجم الفوسفات جبل العنق تبسة الجزائر. كما وجهت الدراسة نحو التعرف على مختلف طرق الحفر. و كيفية تجهيز عملية الحفر . من استكشاف الموقع الى تحليل النتائج و دراستها . و يتم ذلك عن طريق تطبيق عدة طرق من ضمنها دراسة استجابة السطح (RSM) .

حيث يؤثر تحسين معدل الاختراق (ROP) على تكاليف الحفر. من أجل تحديد المعدل الأمثل لمعدل الاختراق(ROP) ، من الضروري التأكد من التركيبة الأكثر فائدة من معلمات الحفر. في هذه الدراسة، تم استخدام منهجية سطح الاستجابة (RSM) لدراسة تأثير المعلمات الميكانيكية المتغيرة، بما في ذلك الوزن على الأداة (WOB)، وسرعة الدوران (RPM) ، ونوع الصخور، على معدل الاختراق (ROP)

الهدف من هذه الدراسة هو تحليل ومعالجة البيانات التجريبية من أجل تطوير نماذج رياضية تشرح العلاقة بين مختلف المتغيرات ومعدل التقدم. يتيح تطبيق المنهجية المختارة تحديد المعلمات المثلى لنظام التشغيل العقلاني للحفر. تُظهر النتائج النموذج المناسب تمامًا للمهمة المطروحة، حيث يُظهر درجة عالية من الدقة وارتباطاً قوياً بين البيانات المتوقعة والتجريبية.

## Abstract

This study represents the analysis of different factors to optimize the mining drilling process for the phosphate mine of Jbel El-onk, Tébessa, Algeria. The study was also directed towards recognizing the different drilling methods. And how to equip the drilling process. From site exploration to analyzing and studying the results. This is done by applying several methods, including the surface response study (RSM).

Optimizing the rate of penetration (ROP) affects drilling costs. In order to determine the optimal (ROP), it is necessary to ascertain the most advantageous combination of drilling parameters. In this study, response surface methodology (RSM) was used to investigate the effect of variable mechanical parameters, including weight on tool (WOB), rotational speed (RPM), and rock type, on (ROP).

The objective of this study is to analyze and manipulate experimental data in order to develop mathematical models that explain the relationship between various variables and the rate of advancement. The application of the selected methodology enables the determination of the optimal parameters for a rational operating system for drilling. The results show that the model is well suited to the task at hand, showing a high degree of accuracy and a strong correlation between predicted and experimental data.

## Résumé

Cette étude représente l'analyse des différents facteurs permettant d'optimiser le processus de forage minier pour la mine de phosphate de Jbel El-onk, Tébessa, Algérie. L'étude a également été orientée vers la reconnaissance des différentes méthodes de forage. Et comment équiper le processus de forage. Depuis l'exploration du site jusqu'à l'analyse et l'étude des résultats. Cela se fait en appliquant plusieurs méthodes, dont l'étude de la réponse de la surface (RSM).

L'optimisation du taux de pénétration (ROP) influe sur les coûts de forage. Afin de déterminer le taux de pénétration optimal, il est nécessaire d'établir la combinaison de paramètres de forage la plus avantageuse. Dans cette étude, la méthodologie de la surface de réponse (RSM) a été utilisée pour étudier l'effet des paramètres mécaniques variables, notamment le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le type de roche, sur le taux de pénétration (ROP).

L'objectif de cette étude est d'analyser et de manipuler des données expérimentales afin de développer des modèles mathématiques qui expliquent la relation entre les différentes variables et le taux d'avancement. L'application de la méthodologie choisie permet de déterminer les paramètres optimaux d'un système d'exploitation rationnel pour le forage. Les résultats montrent que le modèle est bien adapté à la tâche à accomplir, avec un degré élevé de précision et une forte corrélation entre les données prédites et les données expérimentales.

# Liste des figures



## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

- Figure I.1.** Situation géographique de la région de BIR EL ATER.
- Figure I.2.** Carte de la répartition des complexes aquifères de la zone d'étude
- Figure I.3.** Variation de la température moyenne mensuelle maximale.
- Figure I.4.** Variation de la température moyenne mensuelle minimum.
- Figure I.5.** Variation de la moyenne mensuelle des précipitations à la station de SafSaf El Ouessra pour tous les mois enregistrés pendant la période de septembre 1997 à février 2014.
- Figure I.6.** L'humidité relative moyenne.
- Figure I.7 :** Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk.
- Figure I.8.** Coupe géologique interprétative entre le Djebel de DJEMI DJEMA et BLED ELHADBA.
- Figure I.9.** Carte de localisation des sondages et des tranchées.
- Figure I.10.** Carte géologique de la zone de Bled El Hadba.
- Figure I. 11.** Coupes géologiques sériées à travers le gisement de Bled El Hadba.
- Figure I. 12.** Carte structurale du mur du faisceau phosphaté.
- Figure I .13.** Carte structurale du toit du faisceau phosphaté.

### CHAPITRE II

- Figure II.1.** Schéma explicative du principe de forage des trous de mines.
- Figure II.2.** Schéma représentatif du forage rotatif.
- Figure II.3.** Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant.
- Figure II.4.** Les phases du forage roto-percutant.
- Figure II.5.** Classification des machines de forage.
- Figure II.6.** Chantier de forage.
- Figure II.7.** Équipement de forage.
- Figure II.8.** Système de rotation.
- Figure II.9.** Les tiges.
- Figure II.10.** Tricône.
- Figure II.11.** Diamond Bits.
- Figure II.12.** Down-the-Hole Hammers.
- Figure II.13.** Core Bits.

### CHAPITRE III

- Figure III.1.** Machine de forage.
- Figure III.2.** Fosse a boue.
- Figure III.3.** Table de rotation.
- Figure III.4.** Ressort extracteur.
- Figure III.5.** Couronne.
- Figure III.6.** Echantillon de la carotte.
- Figure III.7.** Carotte en caisse.
- Figure III.8.** Information de machine golden bear 1400.

## CHAPITRE IV

**Figure IV.1.** Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1).

**Figure IV.2.** Représentation de l'espace expérimental.

**Figure IV.3.** Représentation du domaine d'étude.

## CHAPITRE V

**Figure V.1.** Représentation du taux de pénétration théorique en fonction de celui expérimental.

**Figures V.2.** Variation ROP en fonction de WOB.

**Figures V.3.** Variation ROP en fonction de RPM.

**Figures V.4.** Variation ROP en fonction de RC.

**Figure V.5.** Variation ROP en fonction de WOB et RPM.

**Figure V.6.** Variation ROP en fonction de WOB et RC.

**Figure V.7.** Variation ROP en fonction de RPM et RC.

# Liste des tableaux

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau I.1.** Distribution des fréquences des directions du vent.

**Tableau I.2.** Comparaison entre le système de classification soviétique historique et les codes de déclaration internationaux (Mining Journal, Londres, 20 août 2004 ; Stephen Henley : Russian Mineral Reporting).

**Tableau I.3.** Déclaration des ressources de l'étude de l'EREM.

**Tableau I.4.** Déclaration des ressources de l'étude du BRGM.

**Tableau I.5.** Déclaration des ressources de l'étude du CERAD

**Tableau I.6.** Ressources de BEH, numérisées à partir de l'étude du CERAD.

**Tableau I.7.** Estimation des ressources de DMT de 2013.

**Tableau I.8.** Tableau de comparaison des ressources entre plusieurs études. EREM (1987), BRGM (1992), CERAD (1998) et DMT (2013).

**Tableau II.1.** Les recommandations des modes de forage pour les différentes résistances des roches.

**Tableau IV.1.** Domaines expérimentaux des paramètres étudiés.

**Tableau V.1.** Le taux de pénétration expérimentale.

**Tableau V.2.** Analyse de variance de ROP.

# Liste des symboles



## Liste

---

**y** : est la réponse ou la grandeur d'intérêt.

**x<sub>i</sub>** : représente le niveau attribué au facteur *i* par l'expérimentateur pour réaliser un essai.

**a<sub>0</sub>, a<sub>i</sub>, a<sub>ij</sub>, a<sub>ii</sub>** : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori.

**ε** : erreur totale.

**Y** : est le vecteur des réponses.

**X** : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points.

**a** : est le vecteur des coefficients.

**e** : est le vecteur des écarts.

**X' X** : La matrice d'information.

**(X' X)<sup>-1</sup>** : La matrice de dispersion.

**Y** : est le taux de pénétration (réponse).

**X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> et X<sub>3</sub>** : sont les valeurs des paramètres.

**b<sub>0</sub>** : représente la constante de modèle.

**b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> et b<sub>3</sub>** : sont les coefficients des termes linéaires.

**b<sub>11</sub>, b<sub>22</sub> et b<sub>33</sub>** : sont les coefficients des termes quadratiques.

**b<sub>12</sub>, b<sub>13</sub> et b<sub>23</sub>** : sont les coefficients des termes d'interaction.

**Es** : l'énergie spécifique (psi).

**WOB** : le poids sur l'outil (lbf).

**AB** : La section de puits « l'outil » (in<sup>2</sup>).

**N** : RPM (Rotation Par Minute).

**ROP** : la vitesse d'avancement (ft/h).

**T** : Torque en (ft×lbf).

**DB** : diamètre de l'outil (in).

**Es<sub>min</sub>** : l'énergie spécifique minimum (Dureté de la roche).

## Liste

---

**RC** : La nature deroche ( kg/cm<sup>2</sup>).

**ROP** : Le taux de pénétration expérimentale (mm/s).

**RPM** : La vitesse de rotation(tr/min).

**Kgf** : est une ancienne unité de force, n'appartenant pas au système international, qui relie les notions de masse et de poids. On utilise maintenant : 1 kgf = 9,806 65 N.

# Table des matières

## Table des matières

---

Dédicace. ....	I
Remerciement. ....	II
Résumé. ....	III
Liste des figures. ....	IV
Liste des tableaux. ....	V
Liste des symboles.....	VI
La table des matières.....	VII
Introduction générale .....	3

### **CHAPITRE I**

Présentation du secteur minier de Bir El Ater :-----	4
1. Situation géographique : -----	4
2. Aperçu hydrogéologique : -----	5
3. Conditions climatiques : -----	5
3.1. Climatologie : -----	6
3.2. Température : -----	6
3.3. Précipitation : -----	7
3.4. Humidité :-----	8
3.5. Le vent :-----	8
Le gisement potentiel de Bled El Hadba :-----	9
1. Généralités :-----	9
2. Données prise en compte :-----	11
2.1. ÉTUDE DE LA SONAREM (1980, CAMPAGNE DE 1 976 A 1978)-----	11
2.2. ÉTUDE DE L'EREM (198 7, CAMPAGNE DE 1985 A 1987)-----	11
2.3. L'intervalle BRGM - SOFREMINEs (1993) :-----	12
2.4. ÉTUDE DU CERAD : -----	13
2.5. ÉTUDE DE L'ORGM : -----	14
3. Contexte géologique du gisement :-----	15
4. Lithostratigraphie du gisement : -----	19
5. Historiques des Réserves en phosphate : -----	21
a) ÉTUDE DE L'EREM :-----	21

## Table des matières

---

b) ÉTUDE DU BRGM : .....	22
c) ÉTUDE DU CERAD : .....	23
d) II-5-4- ÉTUDE DE DMT DE 2013 : .....	24
6. Calcul de la production annuelle de Bled El Hadba : .....	25

### **CHAPITRE II**

LE FORAGE DANS LES MINES.....	27
1. Introduction : .....	27
1.1. Paramètres géométriques : .....	27
1.2. Paramètres de la roche et de la machine : .....	27
2. Définition de forage : .....	28
3. Principe de forage minier : .....	28
4. Les modes de forage : .....	29
4.1. Le mode de forage percutant : .....	29
4.2. Le mode de forage rotatif : .....	30
4.3. Le mode de forage roto-percutant : .....	31
5. Les machines de forage : .....	35
6. Processus de forage : .....	36
7. Installation de forage minier : .....	37
7.1. Le système de suspension de forage : .....	39
7.2. Le système de rotation : .....	40
7.3. Le système de circulation du fluide : .....	41
a) Fonction du fluide de forage : .....	43
7.4. Le système d'alimentation : .....	45
8. La garniture de forage : .....	46
8.1. Rôle de garniture de forage : .....	46
8.2. Fonction de la garniture de forage : .....	46
8.3. Les masse-tiges : .....	47
a) Différent type de masse-tige : .....	48
b) L'assemblage de fond : .....	48
9. Les outils de forage : .....	48
10. Mode de destruction de la roche : .....	51



## Table des matières

---

11. La vitesse d'avancement : .....	52
11.1. Paramètres mécaniques : .....	53
a) Le poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit) : .....	53
b) Vitesse de rotation de l'outil ou RPM (Révolution Par Minute) : .....	53
c) Couple exercé sur l'outil TTOB (Torque On Bit) : .....	53
d) Type et conception de l'outil : .....	53
e) La nature de la roche : .....	53
11.2. Paramètres hydrauliques : .....	54
a) Pression et débit hydraulique : .....	54
b) Densité de la boue : .....	54
c) Le fluide de forage : .....	54
12. Conclusion : .....	55

## CHAPITRE III

1. Introduction : .....	57
2. Technique de forage : .....	57
2.1. Forage rotary à circulation directe : .....	57
a) Avantages : .....	57
b) Inconvénient : .....	57
3. Moyens de mise en œuvre : .....	58
4. Préparation de la boue : .....	59
4.1. Fosse à boue : .....	59
4.2. Préparation de la boue : .....	59
4.3. Le rôle de la boue : .....	60
5. Le forage (exécution) : .....	60
5.1. Avant-trou : .....	60
5.2. Le tubage : .....	61
5.3. La Foration : .....	61
5.4. La circulation : .....	62
La récupération de la carotte .....	62
1. Principe : .....	62
2. Mode opératoire : .....	62

## Table des matières

---

3. Mise en œuvre : .....	63
4. Mode de récupération : .....	64
5. Mise en caisse de la carotte : .....	65
6. Différents types de carottiers : .....	66
7. Différents types de couronnes : .....	66
8. Réglage du carottier : .....	66
9. Paramètres : .....	66
a) Vitesse de rotation : .....	66
b) Poids de l'outil : .....	66
c) Débit de circulation ou produit de boue : .....	66
10. L'appareil de forage : (Golden Bear 1400) .....	67
11. Conclusion : .....	68

## CHAPITRE IV

1. Introduction : .....	70
2. Les Plans d'expériences : .....	70
2.1. Généralités sur les plans d'expériences : .....	70
a) Définition des plans d'expériences : .....	70
b) L'intérêt des plans d'expériences : .....	70
c) Facteur : .....	70
d) Notion d'espace expérimental : .....	71
e) Réponse : .....	73
f) Notion de modélisation mathématique : .....	73
g) Système d'équations : .....	73
3. Méthode d'optimisation RSM (réponse surface méthodologie) : .....	74
3.1. Les Principes généraux : .....	75
3.2. Étapes de RSM : .....	75
a) La première phase : .....	75
b) La deuxième phase : .....	76
c) La troisième phase : .....	77
3.3. Les avantages et les inconvénients (RSM) : .....	77
a) Les avantages : .....	77
b) Les inconvénients : .....	77

## Table des matières

---

4. Optimisation par l'Energie Spécifique (Es) : .....	78
4.1. Définition : .....	78
4.2. Principe de la théorie de l'énergie spécifique : .....	78
4.3. Coefficient de frottement « Coefficient of Sliding Friction » $\mu$ : .....	79
4.4. Efficacité mécanique EFFm : .....	79
5. Conclusion : .....	80

## CHAPITRE V

1. Introduction : .....	82
2. Modélisation du taux de pénétration (ROP) : .....	82
2.1. Le taux de pénétration expérimentale : .....	82
2.2. Les modèles mathématiques pour (ROP) : .....	84
2.3. Validation statistique du modèle : .....	84
3. Optimisation des paramètres : .....	86
3.1. Surfaces de réponses : .....	88
a) L'Influence de WOB et de RPM (RC constant) : .....	88
b) L'Influence de WOB et de RC (RPM constant) : .....	89
c) L'Influence de WOB et de RC (WOB constant) : .....	90
3.2. L'optimisation d'une réponse (ROP) : .....	90
4. Conclusion : .....	91

Conclusion générale .....	VII
---------------------------	-----

Bibliographe .....	VIII
--------------------	------

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'objectif de rationalisation a optimisé les variables opérationnelles au cours du processus de forage. Ces variables comprennent le poids de l'outil, la vitesse de rotation, les propriétés de la boue et la nature de la formation. Le but est d'améliorer les performances du forage. La compréhension des relations entre les différents paramètres de forage permet d'établir des concepts théoriques et pratiques pour un meilleur contrôle des opérations de forage. Les paramètres de forage sont les différents facteurs qui déterminent le taux de pénétration. Ces paramètres se répartissent en deux catégories principales : les paramètres mécaniques liés au type et à la forme de l'outil, à son poids et à sa vitesse de rotation ; et les paramètres hydrauliques liés au débit, à la pression, à la nature et aux caractéristiques du fluide de forage. Les paramètres hydrauliques, qui comprennent le débit, la pression, la nature et les caractéristiques du fluide de forage, sont également pris en compte. Ce travail se concentre principalement sur l'amélioration du taux de pénétration en fonction de la variation des paramètres mécaniques. Pour atteindre cet objectif, une approche expérimentale a été adoptée, par laquelle les données sont traitées pour obtenir des valeurs qui permettent d'optimiser la conception des opérations de forage. La RSM (réponse surface méthodologie) est l'une des méthodes les plus récentes utilisées pour développer le forage minier.

La recherche actuelle est basée sur l'interrelation expérimentale des différents facteurs affectant le taux de pénétration. L'objectif est de rationaliser l'opération de forage. Dans ce contexte, le travail a été développé en deux parties. La première partie de l'étude a consisté à décrire l'appareil de forage et les différents paramètres de forage. La deuxième partie de l'étude a été consacrée à l'examen des méthodes d'optimisation des paramètres de forage, des solutions proposées par les chercheurs pour répondre aux problèmes identifiés et de la modélisation mathématique et l'étude a porté sur l'application de la méthode d'optimisation, avec une analyse des résultats obtenus à partir du traitement des données expérimentales.



Présentation du  
gisement de Bled  
El Hadba

## Présentation du secteur minier de Bir El Ater :

### 1. Situation géographique :

La région de Bir El Ater est située au Sud-Est de l'Algérie à 100 kilomètres au Sud de la wilaya de Tébessa et à 20 km de la frontière Algéro-Tunisienne, sur la route qui relie Tébessa à El Oued (**fig I.1**).

Les gisements de phosphates situés à proximité de la municipalité de Bir El Ater sont situés dans la zone de transition entre la partie la plus orientale de l'Atlas saharien au nord et la plate-forme saharienne au sud. La frontière entre ces deux unités est marquée par la faille ou flexure de l'Atlas méridional. L'Atlas saharien fait partie de l'orogène atlasique s'étendant sur environ 2 300 km, selon une direction SO-NE du Maroc à la Tunisie. L'Atlas appartient à la ceinture alpine qui a été formée par la collision des plaques eurasienne et africaine à la fin de la période jurassique. [1]



Figure. I.1. Situation géographique de la région de BIR EL ATER.

2. Aperçu hydrogéologique :

L'étude hydrogéologique de la nappe d'El-Hadba est à priori une nécessité à suivre afin d'apercevoir les zones étant favorables à exploitées et que le sous-sol reste une réserve connue par sa vaste répartition des eaux emmagasinées exploitables et qui nous garanties, sic'est possible, d'exploité le gisement en souterrain sans aucun risque.

La région d'étude appartient à la zone extérieure du bassin artésien Algéro–tunisien. Dans les limites de cette zone, on distingue une multitude de petites structures hydrogéologiques ayant les sources d'alimentation locales. Les sources des nappes plus profondes peuvent être bien éloignées au Nord. Compte tenu des données actuelles, on peut distinguer les complexes aquifères suivants :

- ✚ Complexe aquifère du Quaternaire.
- ✚ Complexe aquifère du Miocène.
- ✚ Complexe aquifère de l'Eocène.
- ✚ Complexe aquifère du Paléocène.
- ✚ Complexe aquifère du Crétacé supérieur.

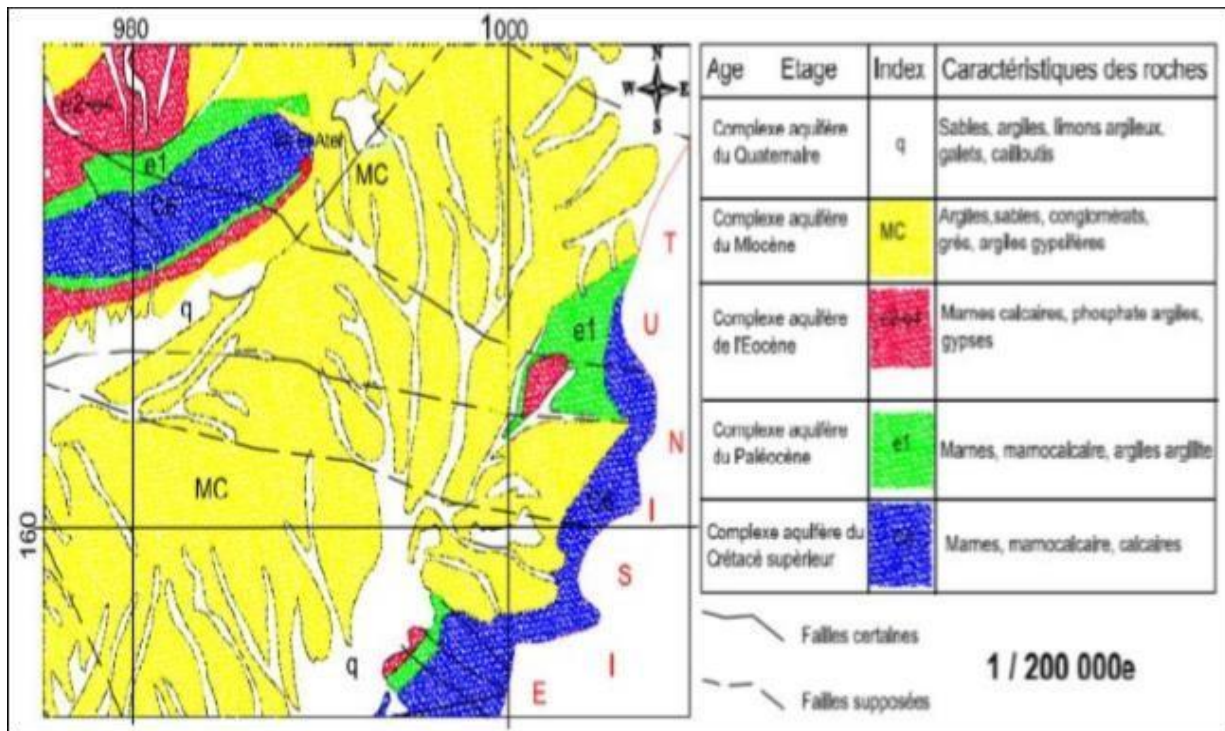


Figure I.2. Carte de la répartition des complexes aquifères de la zone d'étude.

### 3. Conditions climatiques :

#### 3.1. Climatologie :

Les conditions climatiques sont du type continental et sont caractérisées par des hivers froids et des étés chauds. La zone de l'étude bénéficie d'un climat de transition entre la région semi-aride de Tébessa et la région subaride de Négrine. Dans cette région, quatre stations enregistrent les conditions météorologiques sur de longues périodes :

- ✚ Négrine (Code de la station météo : 063001).
- ✚ Saf Saf El Ouessra (Code de la station météo : 062808).
- ✚ Thélidjène (Code de la station météo : 062503).
- ✚ Tébessa (Code de la station météo : inconnu).

#### 3.2. Température :

Les données de température enregistrées sur la station Saf Saf El Ouessra couvre la période d'avril 1992 à mars 2012 et indique des valeurs maximales, minimales et des valeurs moyennes mensuelles.

Les températures extrêmes enregistrées sont les suivantes :

- ✚ -6.2 °C en février 1996.
- ✚ 45,8 °C en août 1993.

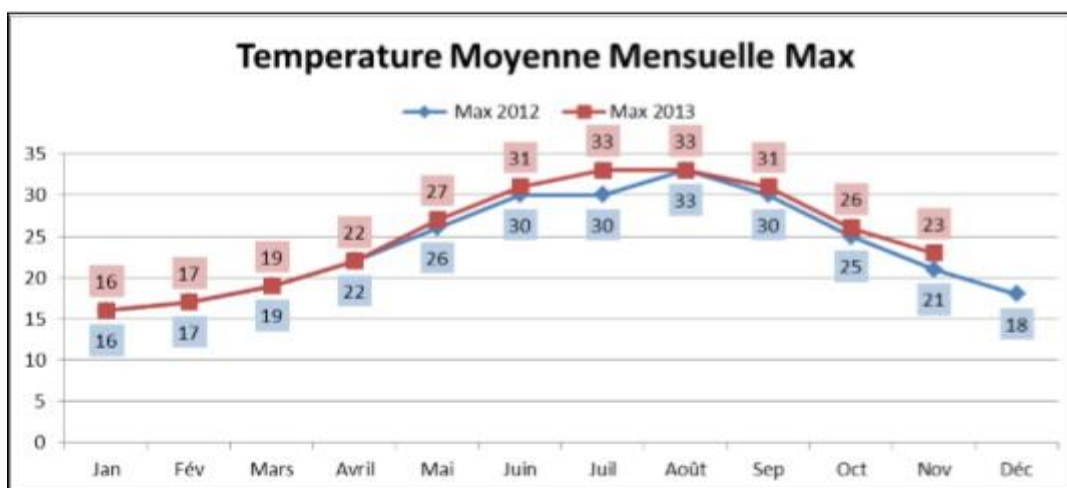


Figure I.3. Variation de la température moyenne mensuelle maximale.

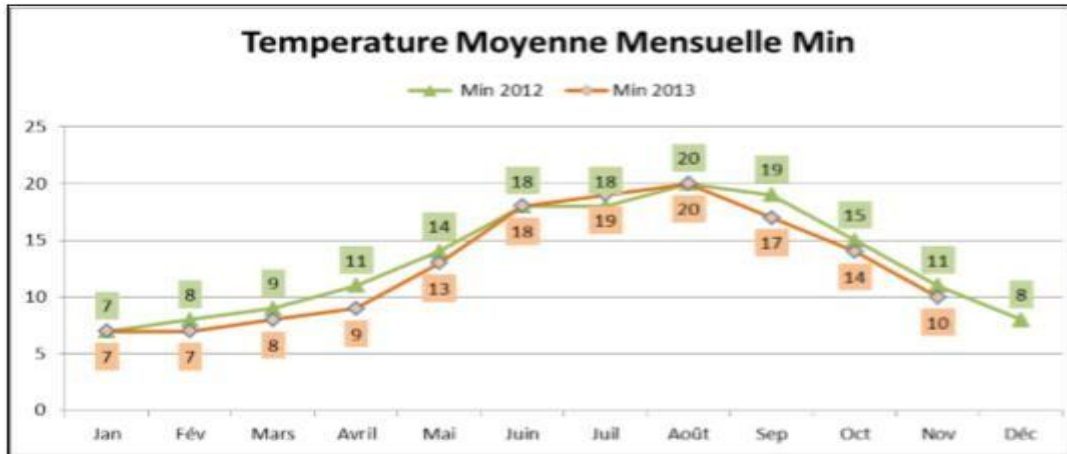


Figure I.4. Variation de la température moyenne mensuelle minimum.

### 3.3. Précipitation :

Le total des précipitations varie considérablement d'une année à l'autre. La moyenne des précipitations mensuelles (FigI.5) montre clairement un maximum pour le mois de septembre avec 30,1 mm et un déclin continu jusqu'à 7,5 mm en février. Par la suite, les taux de précipitations mensuelles augmentent au printemps pour retomber à des valeurs très faibles pendant les mois de juillet (7,2 mm) et d'août (11,6 mm). L'orage fréquent durant le mois d'aout et septembre.

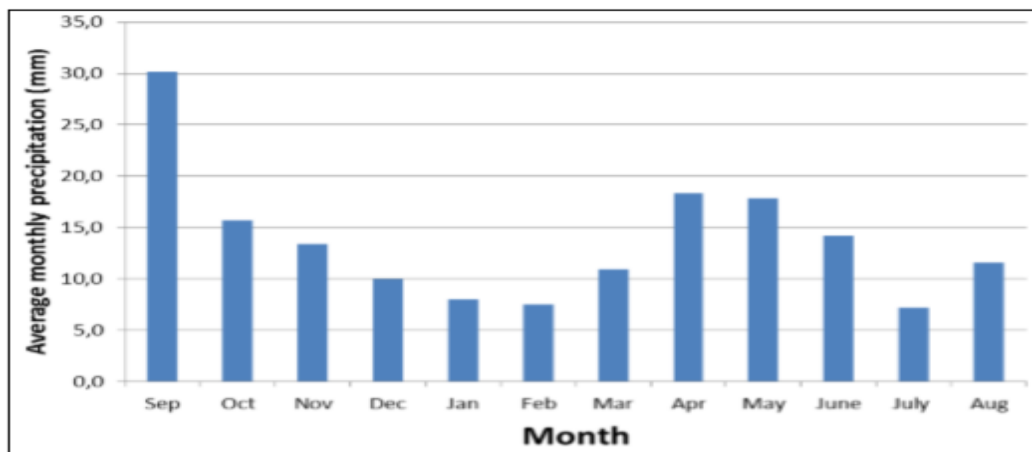


Figure I.5. Variation de la moyenne mensuelle des précipitations à la station de Saf Saf ElOuessra pour tous les mois enregistrés pendant la période de septembre 1997 à février 2014.

3.4. Humidité

Toute au long de l'année, le taux de l'humidité est élevé vu qu'il se situe entre 40% et 75%. Les valeurs maximales d'humidité de l'air sont obtenues en hiver et la minimale en été (Fig. I.6).

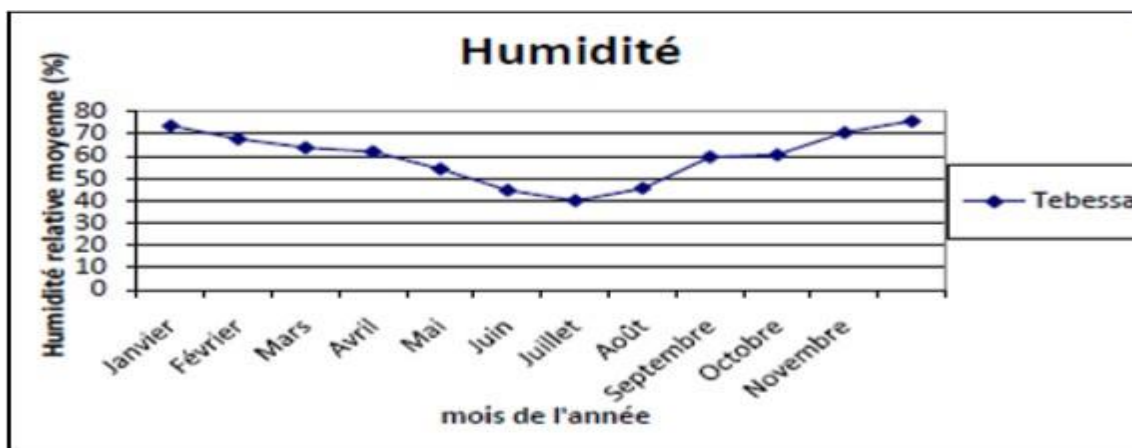


Figure I.6. L'humidité relative moyenne.

3.5. Le vent :

L'analyse de la vitesse du vent montre un vent relativement constant toute l'année et ne dépassant pas 28 km/h. Le tableau qui suit montre la distribution des fréquences des directions du vent **Tableau I.1**:

**Tableau I.1.** Distribution des fréquences des directions du vent.

	N	N-E	E	S-E	S	S-O	O	N-O
Moyenne Quotidienne	6 %	6 %	5 %	9 %	6 %	17 %	17 %	34 %

### Le gisement potentiel de Bled El Hadba :

#### 1. Généralités :

Le gisement potentiel de BLED EL HADBA est situé à 14 km au sud-est de BIR EL ATERet à 6 km de la frontière algéro-tunisienne (**fig.I.7**). Il est distant, en ligne droite, de 16 km de la carrière de DJEMI DJEMA, Ses coordonnées sont les suivantes : X = 1000,00 à 1002,00 et Y = 164,50 à 167,00. Les altitudes varient entre 730 et 790 m. La superficie de la zone reconnue par les sondages carottés est d'environ 2,9 km<sup>2</sup>,

Au plan structural, la zone de Bled El Hadba constitue le flanc ouest de la structure antiforme du DJEBEL ZREGA (1153 m) dont la ligne de crête forme la frontière algéro-tunisienne (**fig. I.7**). Cette structure antiforme, à cœur de Crétacé supérieur, constitue le prolongement nord de la structure du DJEBEL MRATA - DJEBEL SIF EL LEHANI, en Tunisie. Par rapport à cet allongement anticlinal principal, la série phosphatée de Bled El Hadba se situe sur son flanc ouest, tandis que les phosphates du DJEBEL MRATA Localisés à 14 km plus au sud, appartiennent à son flanc oriental.

Par comparaison avec les études réalisées sur la série phosphatée du DJEBEL MRATA (Sassi, 1974, p. 84), le faisceau phosphaté de BLED EL HADBA se révèle être très différent, ce qui indique que les deux zones appartiennent à des domaines de sédimentation nettement distincts. Si la série du DJEBEL MRATA, de 32,5 m d'épaisseur, comprend neuf minces couches de phospharénites alternant avec des intercalaires argilo-marneux ou dolomitiques, par contre, le faisceau phosphaté de Bled El Hadba se compose d'une couche de phospharénites quasi continue sur 31m d'épaisseur, avec seulement quelques minces intercalaires stériles (dolomie phosphatée et lumachelle phosphatée).

L'intérêt de la zone phosphatée de Bled El Hadba est qu'elle constitue le symétrique de celle du flanc sud du DJEBEL ONK (DJEMI-DJEMA et KEF ES SENNOUN), et que l'épaisseur du faisceau phosphaté y est toujours aussi élevée (30 m), ce qui représente des réserves potentielles importantes. En effet, le gîte potentiel appartient au flanc sud-est de la vaste cuvette synclinale dissymétrique, d'environ 14 km de largeur et d'axe SW-NE, qui supporte sur son flanc nord-ouest, l'épaisse série phosphatée du flanc sud du Djebel Onk.

Les études géophysiques réalisées dans le cadre des prospections de la SONAREM (1977-1979) tendent en effet à montrer que la couche de phosphate de DJEMI DJEMA est continue sous le synclinal à remplissage miocène (850 à 900 m d'épaisseur) et qu'elle réapparaît, en pente douce (9 à 10°), à l'affleurement, au niveau du Bled El Hadba, c'est-à-dire sur le flanc sud-est de la mégastucture synclinale (**fig. I .7**)[2].



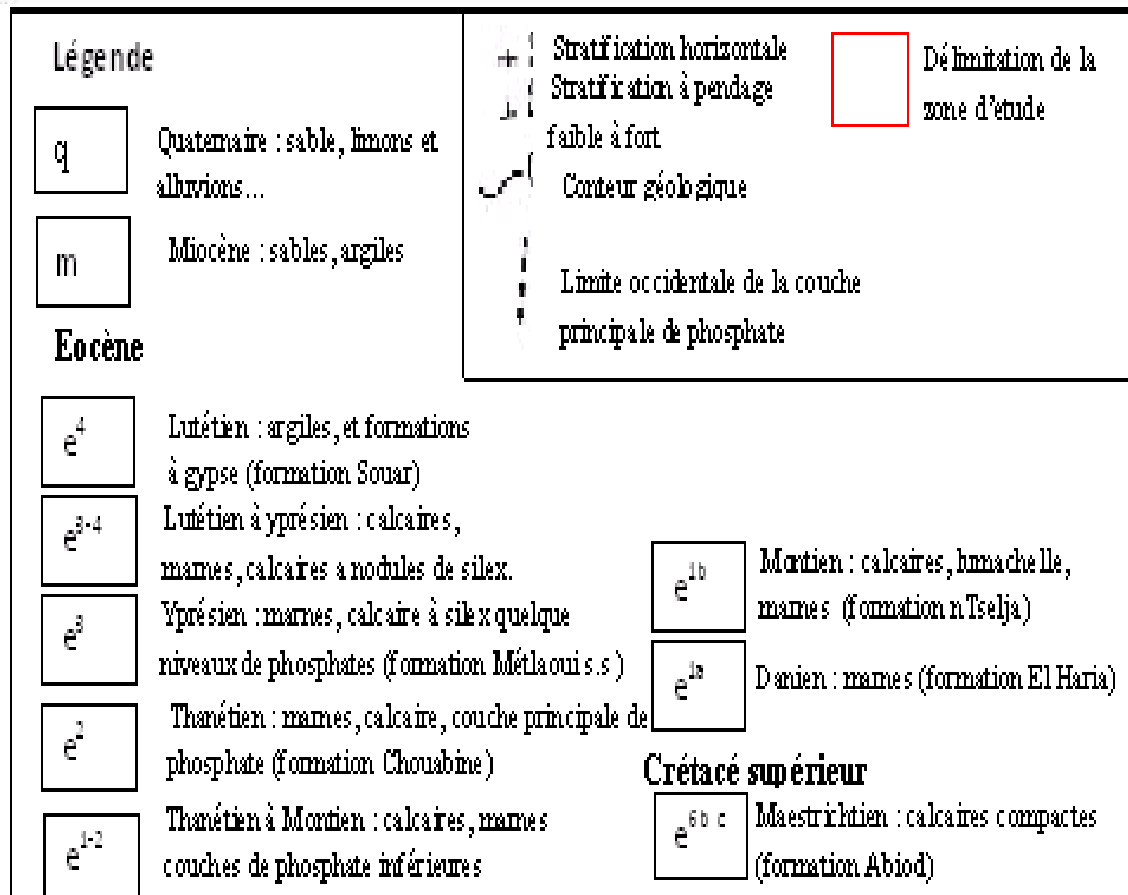
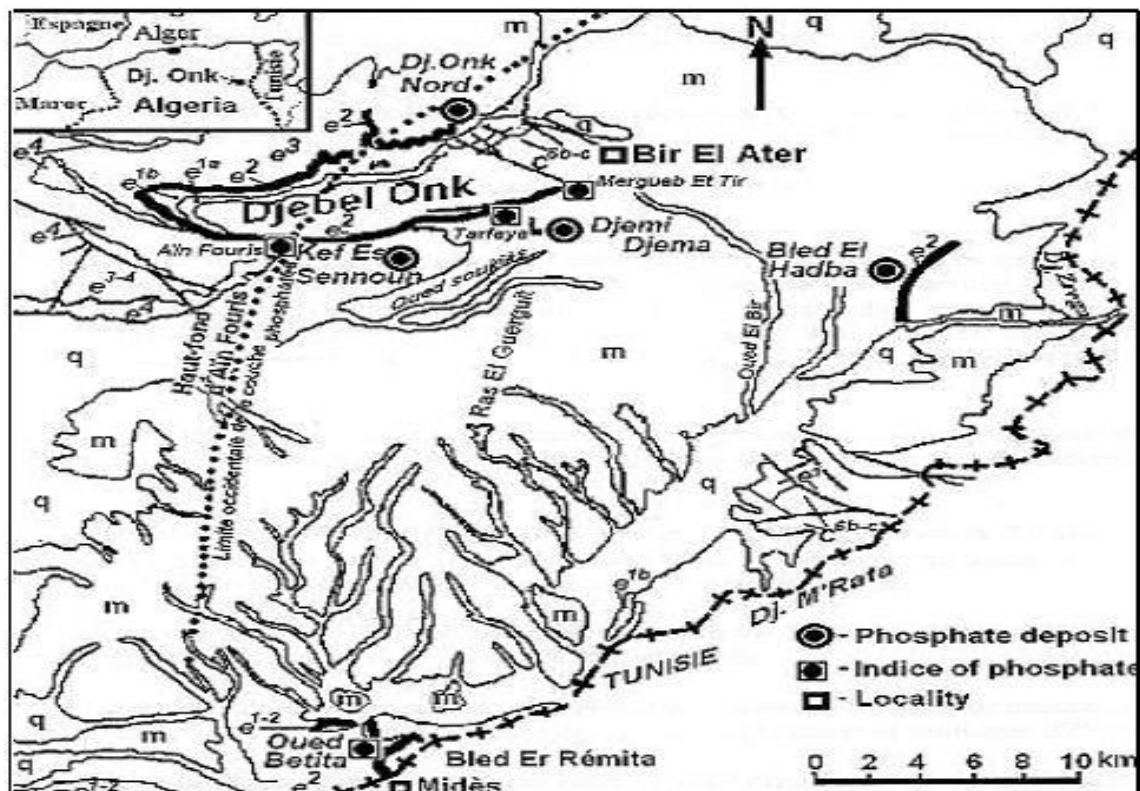
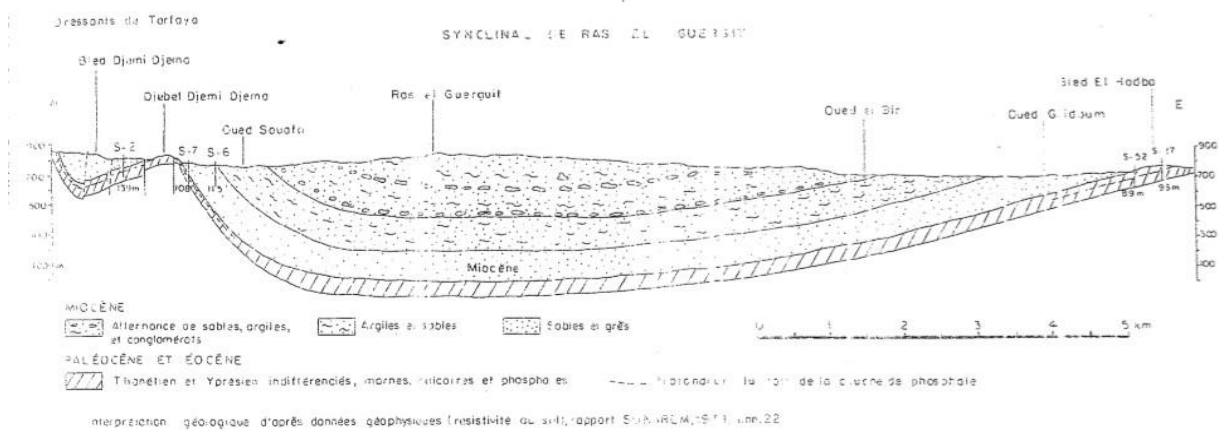


Figure I.7 : Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk.





**Figure I.8.** Coupe géologique interprétative entre Djebel de DJEMI DJEMA et BLED ELHADBA.

## 2. Données prise en compte :

Cette section énumère et présente succinctement les travaux historiques et actuels réalisés sur le site de BEH, sur lesquels reposent la modélisation géologique et l'estimation des ressources. Dans plusieurs études du projet, des inventaires des zones adjacentes ont été effectués et des ressources minérales ont été déclarées. Le premier forage documenté a eu lieu à la fin des années 1970 dans le cadre de l'étude de la SONAREM. À BEH, 83 trous (12 076 m) ont été forés lors de plusieurs campagnes depuis la fin des années 70, couvrant une zone cohérente d'environ 12 km<sup>2</sup> [3].

### 2.1. ÉTUDE DE LA SONAREM (1980, CAMPAGNE DE 1976 A 1978)

À BEH, 9 sondages carottés (741 m) ont été effectués à la fin des années 70 dans le cadre d'une campagne d'exploration de la SONAREM et ont confirmé la présence de lits de phosphorite semblables à des veines, lesquels avaient été découverts auparavant par des campagnes de cartographie et un échantillonnage de l'affleurement.

### 2.2. ÉTUDE DE L'EREM (1987, CAMPAGNE DE 1985 A 1987)

Au total, 11 sondages carottés (1 170 m) ont été effectués à la fin des années 1980 dans le cadre moyen de prélèvement des carottes était de 1 m (parfois de 0,5 m). La représentation graphique des diagraphies a été effectuée à l'échelle 1:200. Les analyses ont été réalisées pour 8 éléments : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, résidus insolubles et U.

Les analyses ont été réalisées dans les laboratoires de Skikda et Béchar, avec un contrôle externe dans le laboratoire de FERPHOS.

Il a été déterminé une densité moyenne de 2,310 t/m<sup>3</sup> et une porosité de 19,7 % pour les

phosphorites tandis que des mesures limitées de la densité et de la porosité ont donné respectivement 2,552 t/m<sup>3</sup> et 10,39 % pour les calcaires phosphatés. Des échantillons métallurgiques en vrac de 250 kg ont été prélevés,

d'une campagne de forage intercalaire de l'EREM couvrant la partie sud de BEH avec un maillage de forage de 400 x 600 avec un diamètre de carotte de 72, 60 et 52 mm dans le phosphate et de 93 mm dans le calcaire et le phosphate dolomitique supérieur. Le taux de récupération des carottes dans le phosphate était supérieur à 85 %.

### 2.3. L'intervalle BRGM - SOFREMINES (1993) :

En se basant sur le matériau des carottes originales, 14 mesures de contrôle des analyses de l'EREM ont été réalisées pour six éléments : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et perte au feu (plus carbone organique et soufre de six échantillons). Un total de 44 sections fines ont été analysées du point de vue du développement du faciès.

La détermination de la densité a donné 2,3 t/m<sup>3</sup> pour les phospharénites et 2,3 - 2,5 t/m<sup>3</sup> pour l'horizon de phosphate dolomitique supérieur. À BEH, l'épaisseur moyenne de la couche a été estimée à 30 m, avec 3 horizons de phosphate : les couches supérieure et inférieure contiennent moins de phosphate et une matrice dolomitique plus importante, avec la présence de niveaux lumachelliques. Le gisement représente probablement le haut-fond situé entre les bassins de Djebel Onk et de Gafsa-Metlaoui.

À BEH, les caractéristiques chimiques de la couche principale sont moins constantes, ce qui signifie qu'elle est plus hétérogène en ce qui concerne le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et le MgO. La chimie des variétés claires et foncées est similaire lorsqu'elles sont superposées. Les teneurs en carbone organique sont généralement de < 1 % (0,52 - 0,65 % pour la variété grise-noire, 0,3 % pour la variété claire), et la teneur en SO<sub>3</sub> se situe aux alentours de 3 % (2,95 - 3,25 % pour la variété grise-noire et 2,65 % pour les phosphorites claires). 50 t de minerai clair et 30 t de minerai foncé ont été prélevés pour des essais de flottation à Boumerdès,

La rudite supérieure contient une granulométrie très hétérogène (0,1 mm à 2 mm), ses particules coprogènes sont grossières (1 - 2 mm). Son épaisseur est variable tandis que sa chimie est constante, avec une teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> relativement faible.

Les rénites supérieures et inférieures à BEH contiennent t moins de grains de phosphate et davantage de ciment dolomitique. La composition chimique est variable et l'épaisseur de la partie riche en quartz encore plus variable [2].

### 2.4. ÉTUDE DU CERAD :

Au total, 12 forages (1 277 m) ont été réalisés à la fin des années 1990 par le CERAD dans le cadre d'une campagne de forage intercalaire couvrant la partie Nord de BEH, avec un maillage de forage de 400 x 600 m ; en plus , 12 tranchées ont été réalisées et de nouvelles cartes topographiques à l'échelle 1:1 000, 1:2 000, 1:5 000 basées sur 20 points/ha pour une superficie totale d'environ 500 ha ont été élaborées.

Au total, 11 sections distantes de 250 - 300 m, d'une longueur d'environ 1 800 m. D'autres sections plus courtes de 300 - 800 m de longueur ont été interprétées dans les zones d'affleurement avec failles.

Le taux de récupération des carottes dans le phosphate était de > 84 %. FERTIBERIA (Espagne) ainsi que le laboratoire de l'ORGM à Boumerdès ont réalisé des analyses géochimiques. 66 t de minerai provenant des trois couches de phosphate ont été confiées à FERTIBERIA pour des essais de traitement. En outre, des échantillons ont été prélevés des coupes fines pour la détermination des densités. Une analyse chimique portant sur jusqu'à 18 éléments a été effectuée. La densité moyenne déterminée à partir de 47 échantillons de phosphate était de 2,14 t/m<sup>3</sup>, ce qui avec les données de l'EREM (2,31t/m<sup>3</sup>), donne 2,22 t/m<sup>3</sup> pour le gisement (**fig. I.3**) [3].



ont été obtenues et examinées sur le site. L'échantillonnage a été réalisé à partir de carottes coupées en deux. Le pendage des forages était mesuré à l'aide d'un inclinomètre. Un levé de l'emplacement des collets a été effectué de manière professionnelle. De plus, les géologues de SOMIPHOS ont décrit les lithologies de façon détaillée et ont établi une synthèse des diagraphies.

Tous les échantillons ont été analysés chimiquement par voie humide dans le laboratoire de l'ORGM, cependant sans mise en place de mesures AQ/CQ appropriées.

Afin de confirmer ces données et les données des études historiques précédemment effectuées, DMT a mis en œuvre un programme de confirmation incluant une nouvelle analyse des échantillons de pulpes du programme de l'ORGM par le laboratoire ALS et le forage de trous jumelés avec des trous historiques incluant un échantillonnage et des analyses. Tous les travaux de confirmation reposent sur une gestion de l'AQ / CQ, comprenant par exemple un jeu d'échantillons AQ / CQ dans chaque lot de 10 échantillons, des visites du site ou des contrôles sur place afin de vérifier si les procédures appliquées ont été appropriées pour produire des résultats représentatifs

### 3. Contexte géologique du gisement :

La carte géologique de la zone de Bled El Hadba (fig. I.4) montre que le faisceau phosphaté du Thanétien forme une bande d'affleurement orienté NE-SW qui s'enfonce vers l'ouest sous les calcaires à silex de l'Yprésien et les sables du Miocène. Vers l'est, affleurent les marnes infra-série phosphatée, puis les calcaires et marnes du Montien. La série phosphatée n'est donc pas exprimée dans cette direction.

La structure géologique d'ensemble du gisement est très simple, puisque la série paléocène, éocène et miocène pend de manière monoclinale vers l'ouest, le nord-ouest et le sud-est, avec un pendage de 6 à 10° (fig. I.5). Les cartes structurales du mur et du toit du faisceau phosphaté (fig. I.6 et I.7) illustrent bien le pendage monoclinale, vers l'ouest, de la série. Plusieurs décrochements horizontaux, NW-SE, sont visibles cartographiquement, Mais ils n'entraînent pas de modifications importantes de la géométrie de la couche de phosphate.

Un paramètre important à prendre en compte, pour la compréhension géologique du gisement, est la discordance d'érosion anté-miocène qui est responsable de l'érosion complète du faisceau phosphaté dans le sondage S-57K, et de l'érosion partielle de la partie supérieure du faisceau (sur environ 2 m) dans les sondages S-11H et S-55K (fig. I.5 et I.7). [1]



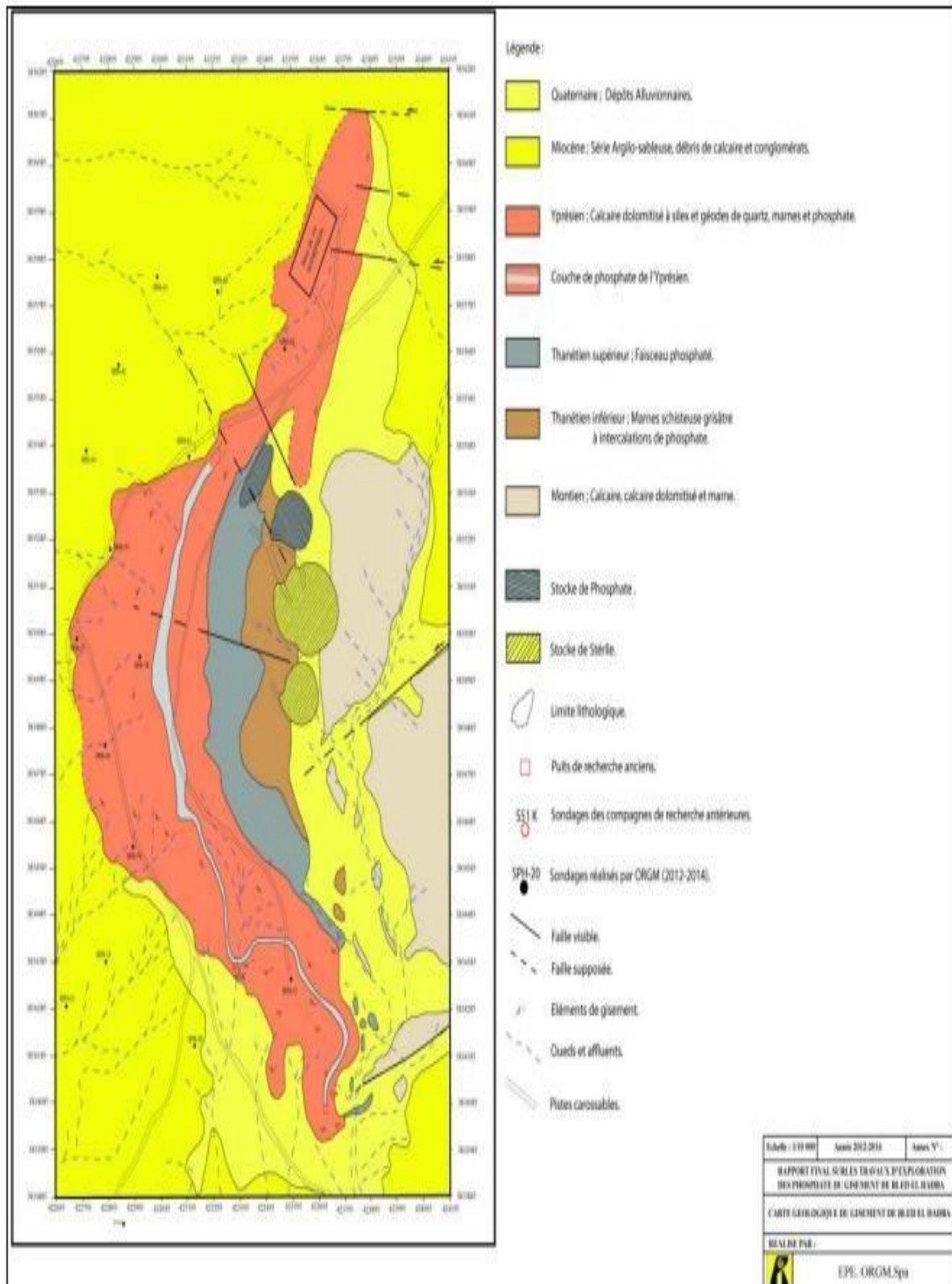


Figure I.10. Carte géologique de la zone de Bled El Hadba.

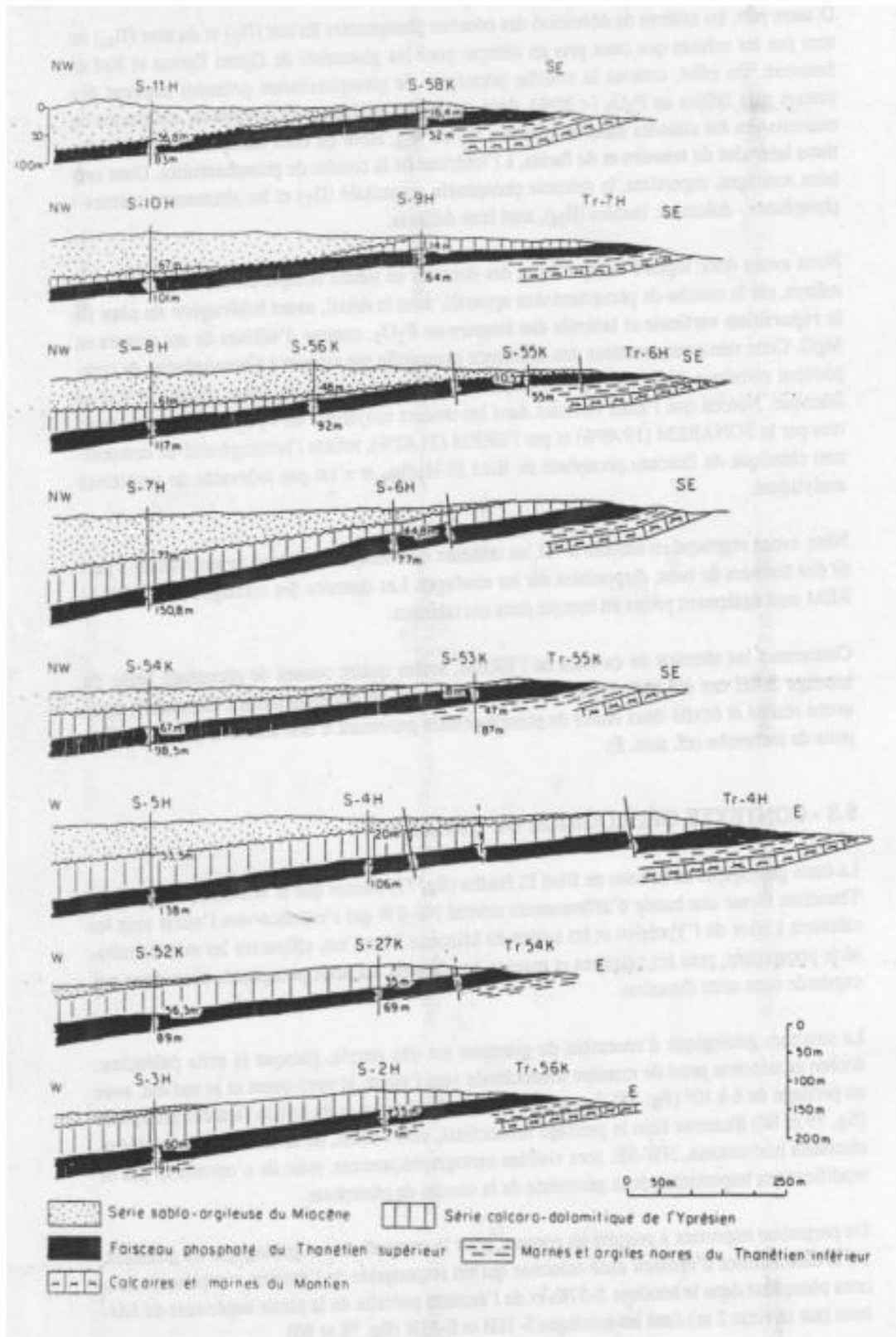


Figure I. 11. Coupes géologiques sérieées à travers le gisement de Bled El Hadba.

# Présentation du gisement de Bled El Hadba

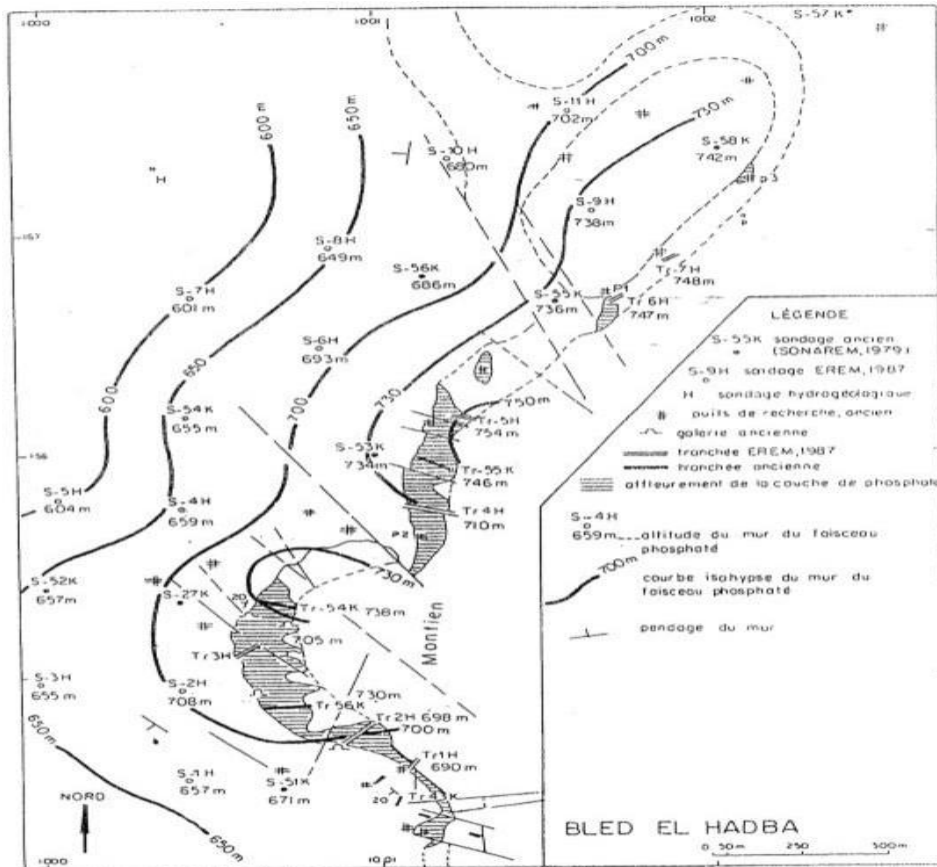


Figure I. 12. Carte structurale du mur du faisceau phosphaté.

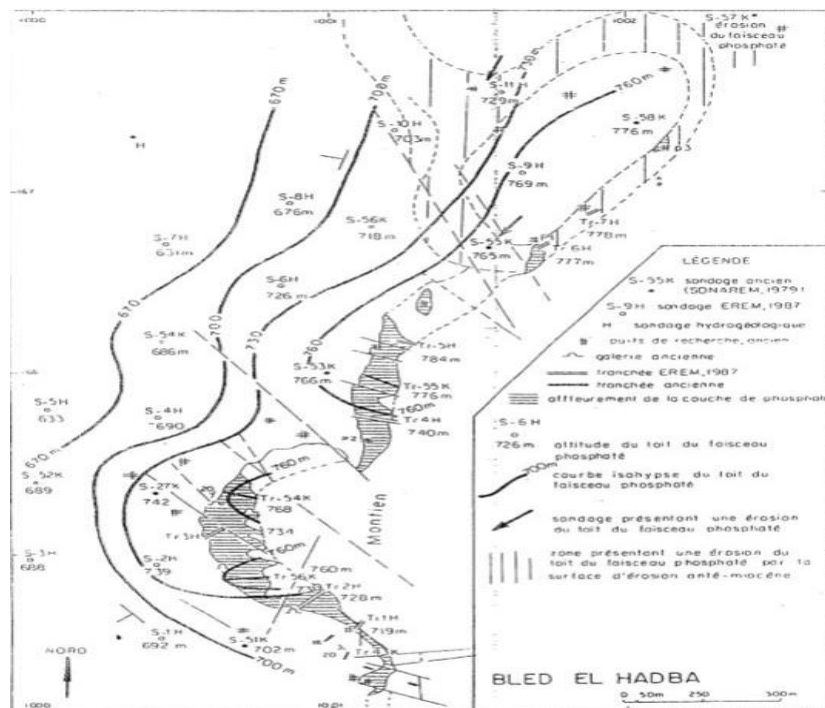


Figure I.13. Carte structurale du toit du faisceau phosphaté.



Cette paléo surface d'érosion s'exprime dans la partie nord-ouest du gisement de Bled El Hadba, et tronque la série en allant du SW au NE. Nous pensons que toute la partie nord-ouest du gisement constituait, avant la Miocène, une zone de horst, car la série des calcaires yprésiens à silex y est entièrement érodée (sondages S-11H, S-55K) ou partiellement érodée, du SW au NE, par la discordance anté-miocène (sondages S-9H, S-58K, S-10H, S-56K, S-6H). Cette remarque indique donc que l'existence de la série phosphatée est hypothétique au nord-ouest des sondages S-8H et S-10H.

#### 4. Lithostratigraphie du gisement :

La succession litho stratigraphique est, dans ses grandes lignes, assez semblable à celle des gisements de DJEMI DJEMA et KEF ESSENNOUN, mis à part des variations lithologiques importantes à l'intérieur du faisceau phosphaté (fig.I.8).

Le mur du faisceau phosphaté est constitué par les marnes et argiles feuilletées, vert foncé à noir, du Thanétien inférieur. Dans la partie supérieure des marnes s'individualise un premier horizon de phosphates argileux, fins, d'environ 2 m d'épaisseur. Cet horizon est noté IY-G, selon la terminologie adoptée par G, Ranchin (1963) et la SONAREM (1980). Il est surmonté par des marnes dolomitiques, vert foncé à noir, et des dolomies argileuses parfois lumacheliques (1 à 4 m), notées IV-F. C'est au toit de cet intervalle argilo-dolomitique que nous avons placé le mur du faisceau phosphaté principal.

Le faisceau phosphaté pris en compte, d'environ 30 m d'épaisseur, comprend la superposition de cinq couches de phospharénites bien différenciables par leurs teneurs en  $P_2O_5$  et MgO.

La couche IV-E (4 à 7 m) est composée de phospharénites fines, peu phosphatées (moins de 20%  $P_2O_5$ ) et à ciment dolomitique très développé (8% MgO, de moyenne). Cet horizon correspond à la couche 11 de l'EREM. Nous l'avons dénommé "couche de phosphate inférieure (PI)".

La couche IV-D (6 à 25 m) correspond à la couche principale de phospharénites, à teneurs élevées en  $P_2O_5$  (24 à 26%, de moyenne) et à faibles teneurs en MgO (2,5 à 4,5%). C'est la couche I de l'EREM dans laquelle nous avons distingué, parfois, une couche I-A, peu dolomitique (2,5 à 4,5%) et une couche I-B, plus dolomitique (4,5 à 6,5%).

Les couches IV-C, IV-B et IV-A (4 à 17 m), sont des phospharénites à basses teneurs en  $P_2O_5$  (14 à 17% de moyenne) et très dolomitiques (7 à 8% MgO). Cette trilogie correspond à la couche IIT de l'EREM. Nous l'avons dénommé "couche de phosphate supérieure (PS)". Nous présentons, sur la figure 82, une coupe NE-SW à l'intérieur du faisceau phosphaté illustrant les importantes variations d'épaisseurs des couches de phosphates et de leurs

caractéristiques chimiques.

Ce faisceau est surmonté par un horizon de lurnachelle phosphatée à huîtres, de 1 à 5 m d'épaisseur (couche III de la SONAREM), auquel succède la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien.

Cette série carbonatée, marneuse, dolomitique et calcaire, peut atteindre jusqu'à 56 m d'épaisseur (sondage S-5H), mais est progressivement tronquée, dans la partie nord du gisement, par la surface d'érosion anté-miocène (fig. 83). Elle a complètement disparu par érosion dans les sondages S-11H et S-55K, dans lesquels le Miocène repose directement sur le faisceau phosphaté par l'intermédiaire d'une brèche polygénique, ou d'un conglomérat, à éléments de calcaire, dolomie, phosphate et silex.

La série calcaro-dolomitique de l'Yprésien renferme, dans sa partie médiane, trois minces bancs de phosphate dolomitique de 1,7 à 2,3 m d'épaisseur (16 à 20% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 10 à 12% MgO), alternant avec des marnes dolomitiques et des calcaires. Ces niveaux correspondent aux couches lia, Hb et Ile, définies dans le rapport de la SONAREM. Dans la partie supérieure de la série calcaro-dolomitique à silex s'individualise une couche de phosphate dolomitique pouvant atteindre 6 à 11,8 m d'épaisseur (couche n° I de la SONAREM). Les teneurs moyennes en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sont de 17 à 19%, pour 5 à 8% MgO. Cette couche est bien exprimée dans la zone des sondages S-52K, S-2H, S-3H, S-4H, mais est progressivement érodée, en allant vers le nord, par la surface d'érosion anté-miocène qui tronque la série du sud-ouest au nord-est (sondages S-56, S-58, S-54, S-6Hf, S-9H, S-10).

La série sablo-argileuse du Miocène recouvre, en allant vers l'ouest, la série calcaro-dolomitique à silex. Son épaisseur augmente progressivement en allant vers le nord-ouest, pour atteindre 77 m dans le sondage S-7H (fig. 84). La série débute généralement par un conglomérat polygénique surmonté par des argiles feuilletées vert foncé, puis par des sables.

### 5. Historiques des Réserves en phosphate :

Les études historiques utilisent le terme « réserves » d'une manière qui n'est pas conforme à l'actuelle définition des « réserves ». Aujourd'hui, le transfert des ressources en réserves

implique de tenir compte de tous les facteurs modificatifs (tableau I.1). Ainsi, les « réserves » déclarées par le passé sont considérées comme des « estimations de ressources » non conformes. [1]

**Tableau I.2 .** Comparaison entre le système de classification soviétique historique et les codes de déclaration internationaux (Mining Journal, Londres, 20 août 2004 ; Stephen Henley : Russian Mineral Reporting) .

Russe	Codes de déclaration internationaux
A,B	Reserve prouvé/ ressource mesuré
C1	Reserve probable/prouvé Ressource indiqué
C2	Reserve probable Ressource présumé/indiqué
P1	Ressource présumé
P2	Recherche des ressources minérales (Source : UN Framework Classification for Reserves/Resources, code334)
P3	Aucun équivalent

a) **ÉTUDE DE L'EREM :**

La première estimation des ressources du gisement de BEH a été préparée dans le cadre de l'étude de l'EREM au milieu des années 80 (1985-1987) en se fondant sur 11 forages.

La densité appliquée comme facteur de tonnage reposait sur une valeur de masse volumique moyenne de 2,310 t/m<sup>3</sup> déterminée à partir d'un nombre limité de mesures (47 échantillons). Dans cette étude, aucune teneur de coupure n'a été appliquée et aucune séparation entre minerai à forte teneur et minerai à faible teneur n'a été effectuée.

Les ressources indiquées ont été estimées conformément au système de codification soviétique. Les ressources ont été classées dans la catégorie B, lorsque l'espacement entre les forages était de 300 m x 150 m, et dans les catégories inférieures C1 et C2, lorsque l'espacement entre les forages était de 600 m x 200 m. Les ressources ont été estimées en utilisant l'épaisseur de la minéralisation, la teneur moyenne interceptée par les forages et la zone d'influence correspondante de chaque forage (pondération par polygone). Certaines parties des blocs entourant la zone forée ont été classées dans la catégorie de ressources C2 (**Tableau I.3**) [4].

**Tableau I.3.** Déclaration des ressources de l'étude de l'EREM.

Classe des ressources	Couche phosphorite	Tonnage [Mt]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	MgO (%)
<b>C1 + C2</b>	2	204,6	23,8	3,4
	1+3	120,9	16,4	7,4
	<b>1+2+3</b>	<b>325,5</b>	<b>21,0</b>	<b>5,1</b>
<b>P2 à 400 m de profondeur</b>		480,0		

### b) ÉTUDE DU BRGM :

La deuxième détermination de ressources historique a été faite par le BRGM en 1992-1993 uniquement sur la base de données historique : en d'autres termes, aucun nouveau forage n'a été réalisé pour cette étude. Au cours de l'étude du BRGM, la couche de phosphorite a été séparée en trois couches [2] :

- ✚ La couche supérieure (couche sommitale) a des valeurs < 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et > 4,5 % de MgO.
- % de MgO.
- ✚ La couche centrale (couche principale) avec une teneur élevée en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a des valeurs < 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et < 4,5 % de MgO.
- ✚ La couche inférieure (couche basale) a des valeurs < 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et > 4,5 % de MgO.

**Tableau I.4.** Déclaration des ressources de l'étude du BRGM.

Classe des ressources	Couche de phosphorite	Tonnage [Mt]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	MgO (%)
C1 + C2	1	72,4	15 à 18	7 à 9
	2	165,6	24,9	3,4
	3	62,0	18,3	7,9
<b>C1 + C2</b>	<b>1+2+3</b>	<b>300,0</b>	<b>21,5</b>	<b>5,4</b>

### c) ÉTUDE DU CERAD :

Une troisième évaluation des ressources, centrée sur BEH, a été réalisée par le CERAD en 1998-1999. Une campagne de forage intercalaire a permis de réaliser 12 forages supplémentaires (1 277 m). En conséquence, 32 forages étaient disponibles pour BEH.

Un espacement entre les forages a été choisi de 250 m x 400 m pour la catégorie de ressources B et de 500 m x 400 m pour les catégories de ressources C1 et C2. Au total, 39 échantillons ont été collectionnés et les densités déterminées. La densité moyenne de 2,22 t/m<sup>3</sup> a été appliquée pour les calculs de tonnage. [3]

Le CERAD a adopté la classification des couches choisie par le BRGM, seule la teneur de référence pour le MgO a été modifiée et est passée de 4,5 à 6 % de MgO.

- ✚ La couche supérieure (couche sommitale) avec une faible teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a des valeurs de 13 % à 19 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et de 6 à 10 % de MgO.
- ✚ La couche centrale (couche principale) avec une teneur élevée en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a des valeurs de 20 % à 27,5 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et de 2 à 6 % de MgO.
- ✚ La couche inférieure (couche basale) avec une faible teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a des valeurs de 16 % à 19 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et de 6 à 9,5 % de MgO.

**Tableau I.5.** Déclaration des ressources de l'étude du CERAD.

Classe des ressources	Couche de phosphorite	Tonnage [Mt]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	MgO (%)
B + C1 + C2	1	71,0	17,2	8,5
	2	197,0	24,4	3,9
	3	51,7	18,1	8,0
<b>B + C1 + C2</b>	<b>1+2+3</b>	<b>319,7</b>	<b>21,8</b>	<b>5,5</b>

**Tableau I.6.** Ressources de BEH, numérisées à partir de l'étude du CERAD.

Catégorie de ressources (Système soviétique)	Couche de phosphorite	Tonnage [Mt]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	MgO (%)
B	1	20,1	17,1	8,1
	2	70,4	24,1	4,0
	3	12,6	18,0	7,7
	<b>SOUS-TOTAL</b>	<b>103,1</b>	<b>22,0</b>	<b>5,3</b>
C1	1	37,6	17,4	8,7
	2	95,5	24,4	3,9
	3	23,6	18,2	7,8
	<b>SOUS-TOTAL</b>	<b>156,7</b>	<b>21,8</b>	<b>5,6</b>
C2	1	13,3	16,7	8,4
	2	31,1	25,3	3,4
	3	15,5	18,0	8,4
	<b>SOUS-TOTAL</b>	<b>59,9</b>	<b>21,5</b>	<b>5,8</b>
B + C1 + C2	1	71,0	17,2	8,5
	2	197,0	24,4	3,9
	3	51,7	18,1	8,0
	<b>TOTAL</b>	<b>319,7</b>	<b>21,8</b>	<b>5,5</b>

d) **II-5-4- ÉTUDE DE DMT DE 2013 :**

Contrairement aux estimations historiques des ressources, la déclaration des ressources de DMT de 2013 ne se fonde pas sur une estimation par la méthode des polygones, mais sur l'interprétation géologique et la modélisation de blocs 3D des couches de phosphorite et des couches hôtes. Tous ces facteurs font obstacle à une comparaison directe.

Pour l'étude de DMT, le nombre de forages a augmenté, passant de 32 à 60 depuis le rapport du CERAD. Les forages supplémentaires sont issus d'une campagne de forage menée par l'ORGM. Au moment de l'élaboration de la déclaration des ressources par DMT, l'ORGM et SOMIPHOS avaient fourni des informations complémentaires sur la géologie ainsi que des données de densité (638 échantillons) [1].

## Présentation du gisement de Bled El Hadba

**Tableau I.7.** Estimation des ressources de DMT de 2013.

Classe des ressources	Couche	Tonnage [Mt]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	MgO (%)
M + I	4	141,6	16,9	7,7
	1	48,4	15,5	8,4
	2	409,0	24,1	4,1
	3	115,9	19,5	5,9
	<b>1+2+3</b>	<b>573,3</b>	<b>22,5</b>	<b>4,8</b>
	<b>1+2+3+4</b>	<b>714,9</b>	<b>21,3</b>	<b>5,4</b>
Présumées	1+2+3	197,8		
	1+2+3+4	287,3		

Le **tableau I.8** représente une comparaison entre l'estimation des réserves des 4 études (EREM, BRGM, CERAD, DMT2013)

**Tableau I.8.** Tableau de comparaison des ressources entre plusieurs études. EREM (1987), BRGM (1992), CERAD (1998) et DMT (2013).

EREM:					BRGM:					CERAD:					DMT 2013:				
Res. Class	Phos. Layer	Ton. [Mt]	P2O5 [%]	MgO [%]	Res. Class	Phos. Layer	Ton. [Mt]	P2O5 [%]	MgO [%]	Res. Class	Phos. Layer	Ton. [Mt]	P2O5 [%]	MgO [%]	Res. Class	Phos. Layer	Ton. [Mt]	P2O5 [%]	MgO [%]
															M+I	4	141.6	16.9	7.7
C1+C2	1+3	120.9	16.4	7.4	1	72.4	15 à 18	7 à 9	B+C1+0	1	71.0	17.2	8.5	M+I	1	48.4	15.5	8.4	
C1+C2	2	204.6	23.8	3.4	C1+C2	2	165.6	24.9	3.4	B+C1+0	2	197.0	24.4	3.9	M+I	2	409.0	24.1	4.1
						3	62.0	18.3	7.9	B+C1+0	3	51.7	18.1	8.0	M+I	3	115.9	19.5	5.9
C1+C2	1+2+3	325.5	21.0	5.1	C1+C2	1+2+3	300.0	21.5	5.4	B+C1+0	1+2+3	319.7	21.8	5.5	M+I	1+2+3	573.3	22.5	4.8
															M+I	1+2+3+4	714.9	21.3	5.4
	P2 to 400 m dep	480.0													inferred		197.8		
															inferred plus IV		287.3		

### 6. Calcul de la production annuelle de Bled El Hadba :

Pour l'estimation et le calcul de la production annuelle on utilise la formule empirique de Taylor 1977 : [5]

$Q = 5 \times R^{0.75}$  où ; Q : représente la production

R : les réserves de minerai R = 714.9 Mt

(D'après étude DMT 2 013).

$$Q = 5 \times (714900000)^{0.75}$$

$$Q = 21\,860\,192 \text{ t/an}$$

Donc la durée de vie de la mine estimée :

$N = R / Q$  où ;  $N$  représente la durée de vie de la mine

$$N = 714900000 / 21860192$$

$$N \approx \mathbf{33 \text{ ans}}$$

# Généralité sur le forage minier



### LE FORAGE DANS LES MINES

#### 1. Introduction :

Dans le domaine de l'exploitation minière, un certain nombre de procédés sont utilisés pour extraire la roche du massif. L'un des processus les plus cruciaux de cette chaîne est le minage de la masse rocheuse. Pour ce faire, la première étape consiste à creuser des trous de mines qui seront ensuite remplis d'explosifs. Cette tâche est principalement effectuée par des machines de forage. Une distribution géométrique précise des trous de mine est assurée par un schéma de tir prédéfini, ce qui est essentiel pour garantir une bonne construction de la mine. Le forage de trous permet de mettre à jour les données géologiques du site minier pendant l'excavation. Les paramètres de construction des trous sont les suivants [5.6].

#### 1.1. Paramètres géométriques :

- + Profondeur du trou, limitée par la hauteur de la marche (H) en mètres.
- + L'inclinaison du trou, pour assurer un angle de bord stable.
- + Le diamètre du trou doit être suffisant pour assurer un remplissage adéquat des explosifs.

#### 1.2. Paramètres de la roche et de la machine :

Pour la roche :

- + Résistance à la compression de la roche.
- + Dureté.
- + Abrasivité.
- + Humidité.

Pour la machine :

- + Poussée sur l'outil exprimée en barre pour assurer l'avancement de l'outil de forage.
- + Le couple en bar pour assurer la rotation de l'outil de forage.
- + La quantité d'air comprimé nécessaire pour nettoyer le trou et percuter l'outil de forage.

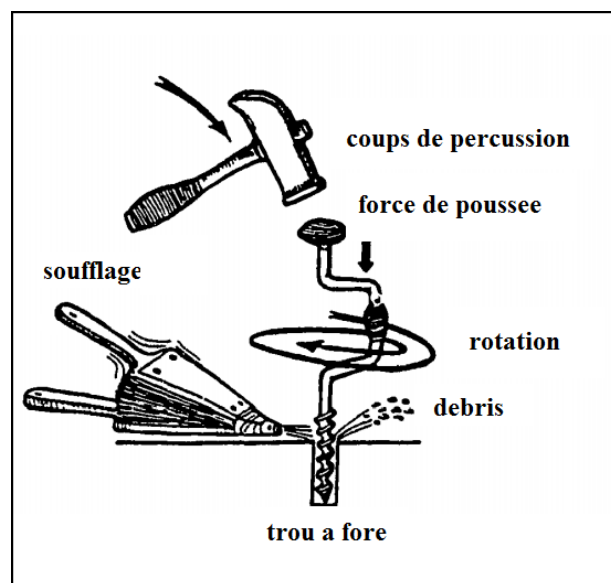
### 2. Définition de forage :

Le forage est première étape dans la chaîne des opérations pour traiter la roche en carrière. Cette chaîne inclut : le forage, le tir, le chargement, le transport, et le concassage. Forage, c'est l'action de construire un trou de mine de forme cylindrique dans le massif par la destruction de la roche. Le forage est effectué au moyen d'outils spéciaux dont l'action peut être le cisaillement, la coupe et abrasion.

Le forage c'est l'action de creuser un trou de diamètre allant jusqu'à 75mm ou un sondage dont le diamètre est supérieur à 75mm, de forme cylindrique dans le massif par destruction de roche.

### 3. Principe de forage minier :

Le principe fondamental du forage dans les mines est la création de trous d'un diamètre et d'une longueur prédéfinis. L'outil est mis en contact direct avec la roche en exerçant une pression sur sa tête, qui sert également à appliquer un couple pour assurer la pénétration. Une fois que l'outil a pénétré dans la roche, les débris remontent à la surface sous l'action de l'air comprimé, qui sert à assurer le nettoyage du trou. [7]



**Figure II.1.** Schéma explicative du principe de forage des trous de mines.

Afin d'améliorer la capacité de l'outil à pénétrer dans la roche, les concepteurs de machines ont proposé d'ajouter une deuxième force de percussion à la tête de l'outil. Cette méthode de forage est appelée forage à percussion rotative.

Le choix de la méthode de forage optimale dépend des propriétés mécaniques de la roche (dureté et abrasivité) et des conditions naturelles du site. En revanche, les dimensions

géométriques des trous à forer (diamètre, profondeur, inclinaison) sont également importantes. Un autre facteur crucial est le coût de la main-d'œuvre et de l'équipement.[8].

#### 4. Les modes de forage :

Un appareil de Forage appelé " Sondeuse " est composé d'un ensemble d'éléments dont le but est d'assurer la progression d'un outil à travers des séries de terrains jusqu'à un objectif, déterminé par des études géologiques et géophysiques.

Les modes de forage sont définis par les différents efforts exercés sur l'outil de forage à savoir :

- ✚ Le forage percutant.
- ✚ Le forage rotatif.
- ✚ Le forage roto-percutant.

##### 4.1. Le mode de forage percutant :

Il s'agit de la plus ancienne méthode de forage connue, employée par les Chinois depuis l'Antiquité pour localiser l'eau. Cette méthode consiste à soulever un outil lourd et à le laisser tomber sur la roche à forer, la hauteur de la chute et la fréquence des coups variant en fonction de la dureté de la roche. Si le trépan est fixé directement au câble ou sous une masse, ce procédé est qualifié de pennsylvanien. Si le trépan est fixé sous un train de tiges, ce procédé est dit canadien et il est conseillé de monter une glissière sur le dessus de l'outil. Dans le cas du battage par câble (pennsylvanien), le mouvement alternatif est simplement actionné par le treuil, sans qu'aucun accessoire supplémentaire ne soit nécessaire. L'activation du levier d'embrayage soulève le trépan, et le relâchement brusque du levier fait descendre l'outil au fond du trou en chute libre.[9]

Dans les machines plus importantes, le mouvement alternatif est produit par un pendule entraîné par une bielle et une manivelle. Un matelas de ressorts amortisseurs est monté sous la poulie de tête de mât. Les mouvements alternatifs du câble entraînent la rotation du trépan, ce qui permet à l'élément de coupe d'agir sur toute la section du trou. Lorsqu'une certaine profondeur est atteinte, le trépan est relevé et une curette, une cuillère ou une valve est abaissée afin d'extraire le sédiment broyé.

Dans les appareils les plus simples, la destruction de la roche et l'avancement du trou qui en résulte sont réalisés à l'aide d'un trépan suspendu, relié à un câble. Ce câble est ensuite soumis à des mouvements alternatifs de montée et de descente, impulsés par un équilibreur ou un treuil à chute libre. Cette méthode est appelée "méthode pennsylvanienne" ou "sondage au câble ».  
[8.9]

Le trou est périodiquement nettoyé à l'aide d'une vanne qui soulève les débris de la roche, tandis que dans les sols non cohésifs et érodés, un tuyau entraîné soutient les parois du trou de forage, empêchant l'outil de se coincer et permettant une mesure plus précise du matériau extrait.

Dans le cas des sols non cohésifs et saturés, tels que les sables et les graviers alluviaux, le processus de forage peut être mené exclusivement à l'aide d'une vanne avec un système de tubes d'avancement, à condition que le sol ne contienne pas d'éléments durs ou de bancs significatifs.

**[8]**

### 4.2. Le mode de forage rotatif :

La pénétration de l'outil est obtenue par l'abrasion et l'écrasement du sol, sans application d'impact, uniquement par l'action de la rotation.

L'outil est fixé à la base de la ligne de sonde, qui comprend les éléments suivants, de bas en haut :

L'outil comprend des trépan, des trépan traînants et des colliers de forage.

Le terme "tige de forage" est utilisé pour décrire un type spécifique de tige utilisé dans les opérations de forage. La Tige carrée (Kelly) est un type d'outil.

La tête d'injection (pivotante) est un élément de l'appareil.

L'outil tire son mouvement de rotation et une partie de son poids de la ligne de forage.

**[10.11]**

Le réglage de ces deux éléments - la vitesse de rotation et le poids de l'outil - est d'une importance capitale. Collectivement, ils constituent le paramètre de forage. Le mouvement de rotation est transmis à la ligne de sonde par les moyens suivants :

La table de rotation et la broche carrée sont utilisées à cette fin.

Le mandrin est équipé de clavettes coulissantes pour Kelly cylindrique cannelée.

La douille exerce une force directe sur les tiges, qui glissent à l'intérieur et peuvent être bloquées par des vis de blocage.

La tige carrée et le Kelly sont construits avec des sections creuses qui permettent le passage de la boue de forage **[8]**.

La tête d'injection est suspendue au crochet du palan par un col de cygne, qui relie hydrauliquement l'intérieur de la ligne de sonde au tuyau de circulation et à la pompe à boue.

Il est impératif que les pompes à boues assurent un débit compatible avec les performances optimales du trépan utilisé, et que le taux de circulation garantisse une vitesse ascendante minimale dans l'espace annulaire. Une pompe à boues est toujours à double effet, avec la capacité d'aspirer et de refouler dans les deux sens de déplacement du piston. Dans un sens, le volume de déplacement est entièrement utilisé, tandis que dans l'autre sens, la tige du piston réduit légèrement ce volume **[9]**.

La double action de la rotation et de la pression (poids) exercée par la ligne de sonde permet à l'outil de détacher les déblais du sol au fond du trou. Ces déblais sont ensuite ramenés à la surface en circuit continu par l'action d'un liquide visqueux **[12.13]**.

Les déblais remontent à la surface par l'espace annulaire entre le train de tiges et le sol ou la colonne de tubage déjà en place.

Dans son mouvement ascensionnel, la boue tapisse les parois du trou non encore tubé et les maintient, momentanément, en attendant la pose des colonnes de soutènement ou la mise en place de la colonne de captage, crépine et gravier additionnel.

Dans le cas du forage minier on utilise généralement l'air comprimé, qui remplace alors la boue, dans cette solution, un compresseur remplace la pompe à boue, il convient alors de placer à la sortie des puttings, au niveau du sol, un déflecteur annulaire (goulotte). Le foreur peut intervenir sur les trois éléments suivants qui conditionnent l'avancement de l'outil dans le terrain (**Figure II.2**) [14] :

- ✚ Poids sur l'outil (poussée sur l'outil).
- ✚ Vitesse de rotation.
- ✚ Débit
- ✚ Pression (air comprimé).

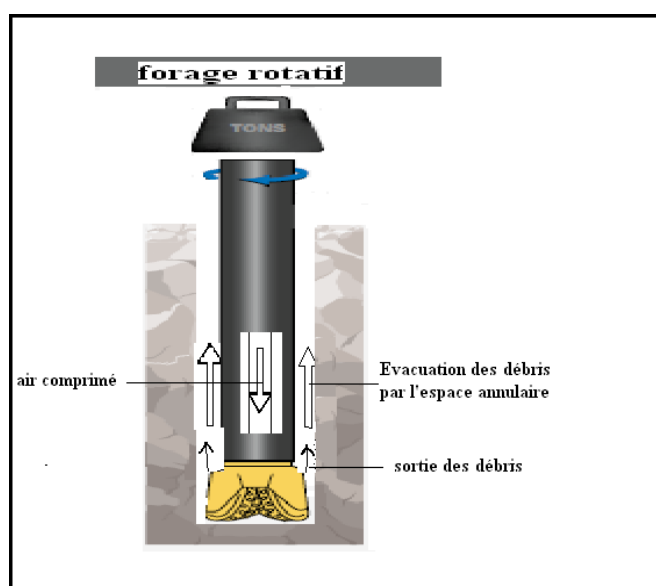


Figure II.2. Schéma représentatif du forage rotatif.

### 4.3. Le mode de forage roto-percutant :

Cette méthode de forage permet une percussion rapide par un marteau pneumatique placé au "fond du trou". Le principe fondamental de cette méthode de forage est l'entraînement du marteau par de l'air provenant d'un compresseur. Il en résulte un mouvement rapide de va-et-vient vertical du marteau, qui frappe la queue de l'outil. Le tranchant de l'outil reste en contact avec la roche au fond du trou. Un marteau pneumatique est fixé au bas d'un chapelet de tiges creuses, ce qui active un outil, l'outil étant une fraise à pointe en carbure de tungstène ou à pointe bouton, qui est alimentée en air comprimé par les tiges et une tête d'injection.

L'air comprimé, qui a été détendu par le marteau de fond de trou, monte ensuite à grande vitesse, transportant les déblais dans l'espace annulaire entre les tiges et le trou. Dans ce mode,

le marteau ne frappe que le fond du trou, tandis que la rotation est transmise à la partie supérieure du train de tiges. Comme dans le mode rotatif, les débris poussiéreux sont expulsés du trou par l'air comprimé, qui est acheminé au fond du trou par l'intérieur des tiges et remonté par l'espace annulaire. Cette technique est efficace dans les sols très durs et stables.

Le forage roto-percutant combine les deux modes précédents en utilisant trois actions de forces.

- ✚ La poussée axiale.
- ✚ Un couple de rotation.
- ✚ Un mécanisme de percussion. (Figure II.3) [8.9]

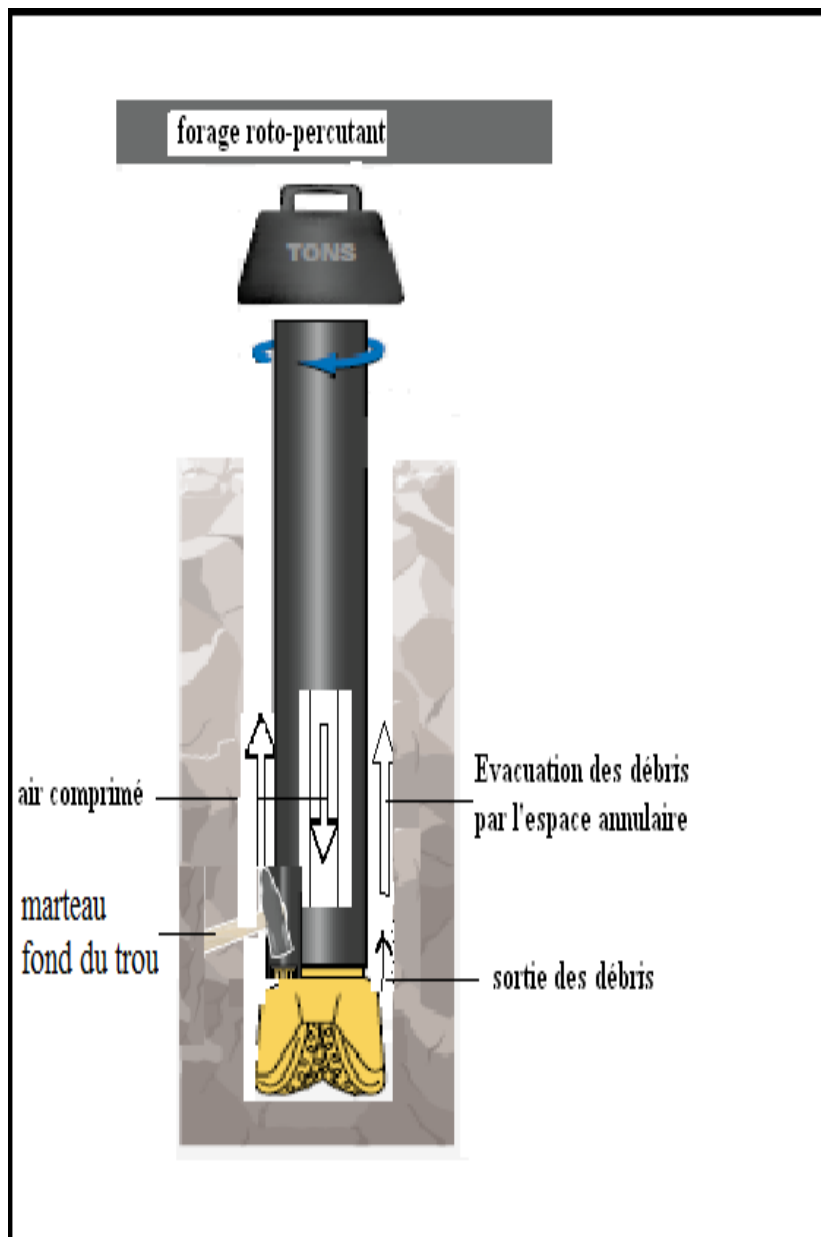


Figure II.3. Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant.

C'est le mode de forage le plus utilisé actuellement dans les différents secteurs d'industrie.

Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grès, calcaires). On distingue 2 phases, la percussion et le soufflage. [7.15].

La percussion : l'air comprimé sert au fonctionnement du piston du marteau qui frappe sur le taillant en appui sur la roche, l'air s'échappe ensuite dans l'espace annulaire entraînant les débris vers le haut.

Le soufflage évacuation des débris : le taillant n'étant plus en appui, la totalité de l'air.

D'air s'écoule au travers du marteau sans le faire fonctionner et s'échappe dans l'espace annulaire. [15.16]

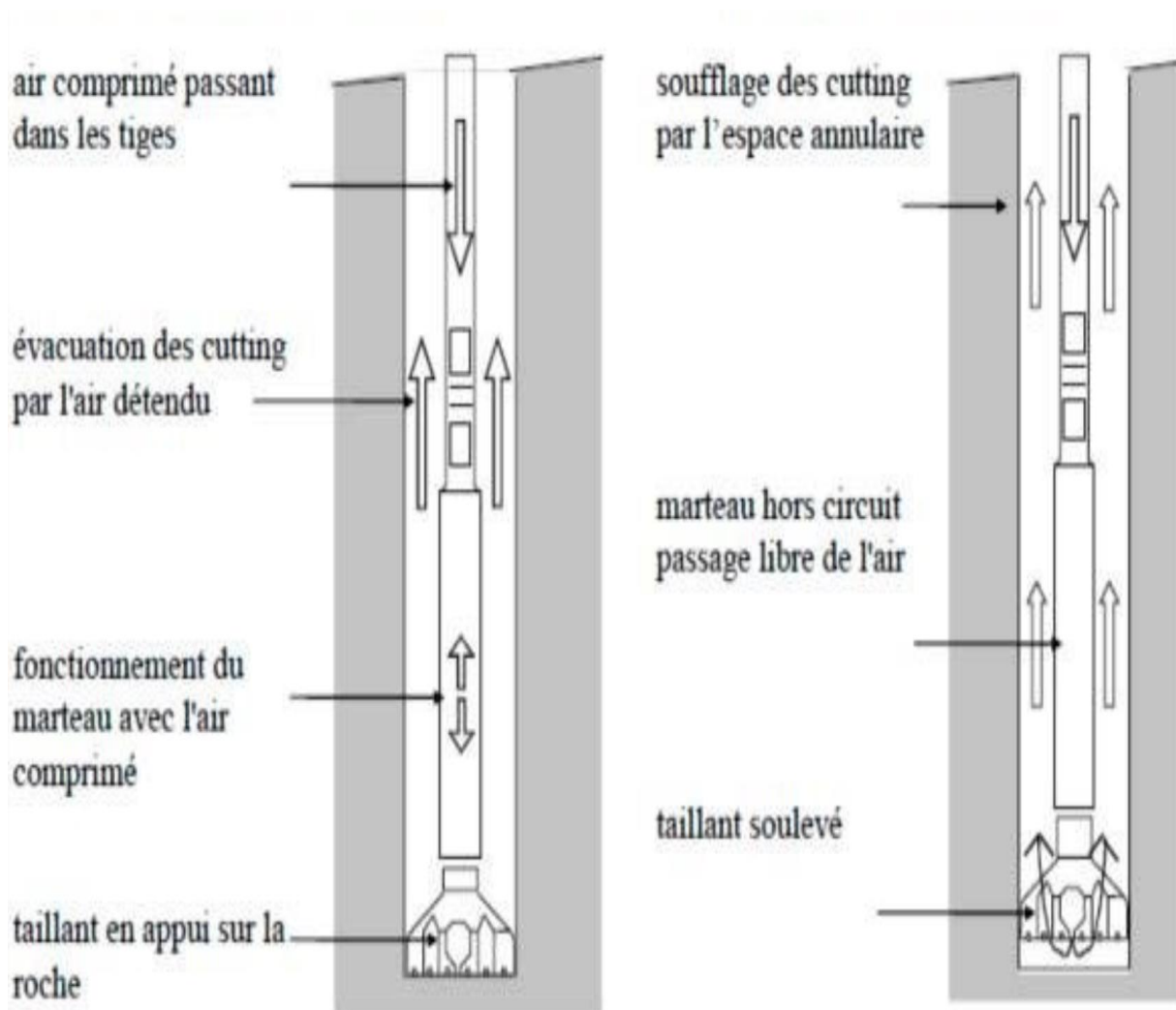


Figure II.4. Les phases du forage roto-percutant .



Synthèse Le tableau 1 montre l'emploi des différents modes de forage dans les mines selon les propriétés des roches a forées. [16]

**Tableau II.1.** Les recommandations des modes de forage pour les différentes résistances des roches.

<b>Mode de forage</b>	<b>Rotary-tarière</b>	<b>Rotary-molettes</b>	<b>Rotary-diamant</b>	<b>Percutant</b>
<b>Tendre</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Moyenne</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Dur</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
<b>Très dur</b>				<b>X</b>

### 5. Les machines de forage :

A partir des procédés et des modes de forage, nous pouvons classer selon le schéma II.1.

Le procédé de destruction des roches a trouvé une très large application lors des travaux miniers. Ce procédé peut être divisé selon le mode de travail de l'outil et l'application de charge :

- ✚ Destruction suivant le mode de forage rotatif.
- ✚ Destruction suivant le mode forage percutant.

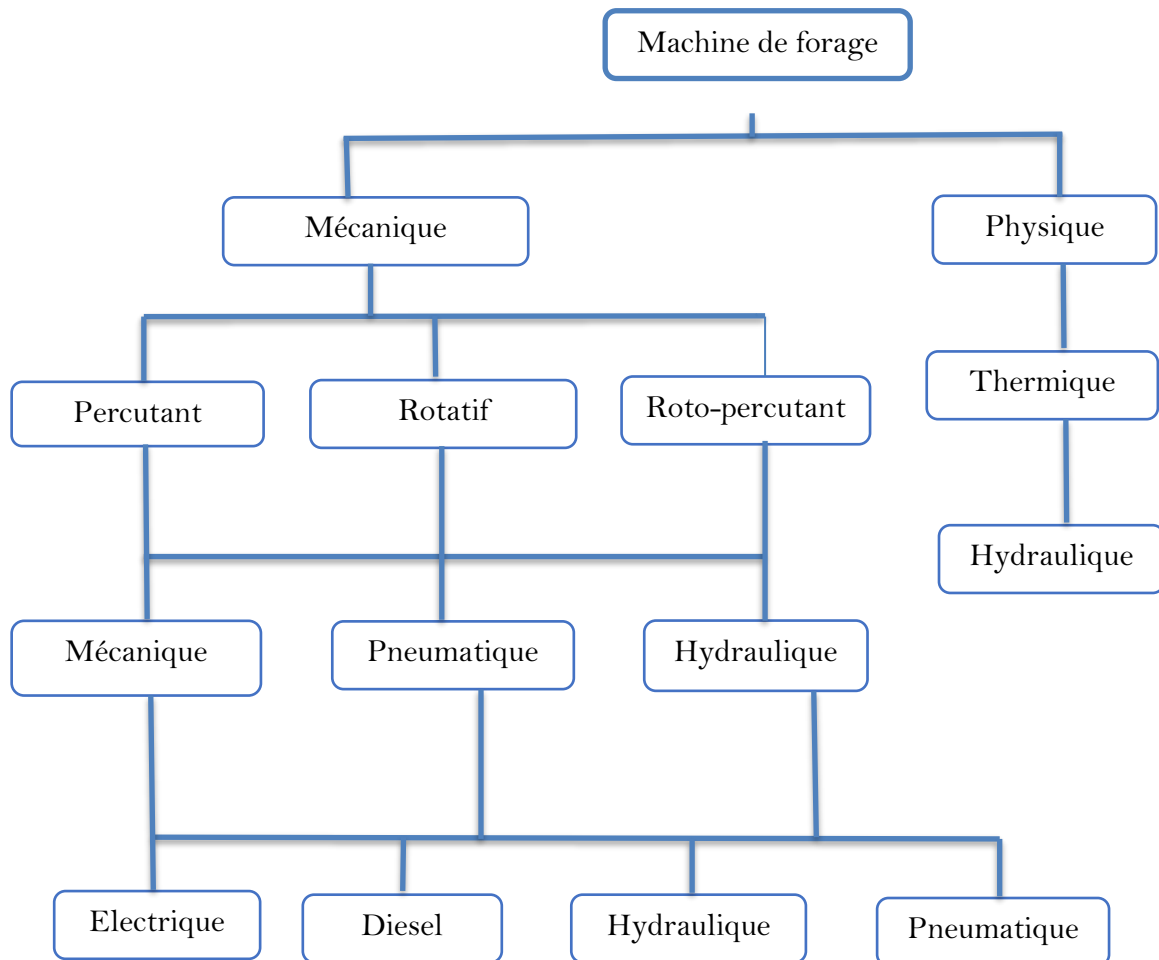


Figure II.5. Classification des machines de forage.

### 6. Processus de forage :

Le forage d'un puits d'exploration est un processus complexe qui nécessite une planification et une exécution minutieuses. De la sélection initiale du site au forage proprement dit, de nombreux facteurs doivent être pris en compte. Les puits d'exploration sont utilisés pour déterminer le potentiel de gisements de pétrole ou de gaz, et le processus de forage est la première étape de cette entreprise. Cette section fournira un aperçu du fonctionnement des puits d'exploration, en se concentrant sur le processus de forage lui-même.

- ✚ Sélection du site : Avant que le forage puisse commencer, le site du puits d'exploration doit être sélectionné. Cela se fait généralement à l'aide de données géologiques et sismiques pour identifier les zones présentant un potentiel de gisements de pétrole ou de gaz. Le site doit également être accessible aux équipements et au personnel, et toute préoccupation environnementale ou réglementaire doit être prise en compte.
- ✚ Préparation du site : Une fois le site sélectionné, la zone doit être préparée pour le forage. Cela implique généralement le défrichage de la végétation, le nivellement du sol et la construction d'une plateforme de forage. Le support de forage fournit une base stable pour l'équipement de forage et contribue à prévenir les dommages environnementaux.
- ✚ Forage du puits : Le processus de forage proprement dit implique l'utilisation d'un foret pour pénétrer dans la surface de la terre. Lorsque le foret tourne, il crée un trou dans le sol. Le trépan est fixé à un appareil de forage, qui fournit la puissance et l'équipement nécessaires pour forer le puits. Le processus de forage peut prendre plusieurs semaines à plusieurs mois, selon la profondeur du puits et les conditions du site.
- ✚ Collecte d'échantillons : Au fur et à mesure du forage du puits, des échantillons de roche et de sol sont collectés à différentes profondeurs. Ces échantillons sont analysés pour déterminer la composition géologique de la zone et rechercher des signes de gisements de pétrole ou de gaz.
- ✚ Évaluation des résultats : Une fois le puits foré et les échantillons prélevés, les résultats doivent être évalués. Cela implique généralement l'analyse des données géologiques et des échantillons pour déterminer le potentiel de gisements de pétrole ou de gaz. Si les résultats sont prometteurs, d'autres explorations et forages pourraient être justifiés.

Dans l'ensemble, le processus de forage des puits d'exploration est une entreprise complexe et longue. Il s'agit cependant d'une étape cruciale dans la recherche de gisements de pétrole et de gaz et peut fournir des informations précieuses sur la géologie d'une zone. En planifiant et en exécutant soigneusement le processus de forage, les entreprises peuvent augmenter leurs chances de succès dans la recherche d'or liquide.

### 7. Installation de forage minier :

L'installation d'un forage minier est une opération complexe qui nécessite une planification minutieuse et une exécution précise pour assurer la sécurité des travailleurs et la performance de l'équipement. Voici les étapes typiques impliquées dans le processus d'installation d'un forage minier :

- ✚ Planification du site : Avant de commencer toute opération, il est essentiel de sélectionner soigneusement l'emplacement du forage en fonction des données géologiques disponibles. Cela implique l'analyse des cartes géologiques, des données de forage antérieures et d'autres informations pertinentes pour identifier les zones potentielles de minerais.



**Figure II.6.** Chantier de forage.



- ✚ Préparation du site : Une fois le site sélectionné, il doit être préparé pour accueillir l'équipement de forage. Cela peut inclure le nivellement du sol, le défrichage de la végétation, la mise en place de routes d'accès et la construction de plates-formes de forage solides et sécurisées.
- ✚ Installation de l'équipement : Une fois le site préparé, l'équipement de forage est transporté et installé sur place. Cela comprend généralement des foreuses, des compresseurs d'air, des pompes à boue, des équipements de manutention, et d'autres outils nécessaires au processus de forage.



**Figure II.7.** Équipement de forage.

- ✚ Forage : Le processus de forage proprement dit commence une fois que l'équipement est opérationnel. Les foreuses sont utilisées pour percer dans le sol et extraire des échantillons de roche à différentes profondeurs. Des techniques de forage spécifiques peuvent être utilisées en fonction des caractéristiques géologiques du site et du type de minerai recherché.
- ✚ Contrôle et suivi : Pendant le forage, il est essentiel de surveiller en permanence les paramètres tels que la pression du fluide de forage, la vitesse de rotation, la température et la profondeur. Des ajustements peuvent être nécessaires en fonction des conditions rencontrées pour assurer la sécurité et l'efficacité du processus.
- ✚ Analyse des échantillons : Les échantillons de roche prélevés pendant le forage sont analysés en laboratoire pour déterminer leur composition minéralogique et leur teneur en minéraux d'intérêt. Ces analyses aident à évaluer le potentiel économique du gisement et à orienter les décisions concernant la poursuite de l'exploration.
- ✚ Documentation et rapports : Tout au long du processus, des rapports détaillés sont généralement tenus pour documenter les activités de forage, les résultats des analyses et les observations géologiques. Ces informations sont essentielles pour évaluer la viabilité du projet et pour obtenir les autorisations réglementaires nécessaires.

### 7.1. Le système de suspension de forage :

Les systèmes de suspension de forage minier sont essentiels pour maintenir la stabilité et la sécurité lors de l'exploitation minière. Voici quelques composants et concepts clés souvent présentes dans ces systèmes :

- ✚ Mât de forage : Le mât est la structure verticale sur laquelle est montée la plate-forme de forage. Il offre le support nécessaire pour les opérations de forage.
- ✚ Treuils : Les treuils sont utilisés pour lever et abaisser les outils de forage et les tiges de forage dans le puits. Ils sont souvent contrôlés électroniquement pour un fonctionnement précis.
- ✚ Plate-forme de forage : C'est la plate-forme sur laquelle sont placés les équipements de forage et où travaillent les opérateurs. Elle doit être conçue pour supporter le poids des équipements et des opérateurs en toute sécurité.

- ✚ Systèmes de stabilisation : Pour éviter les basculements ou les mouvements non désirés, les systèmes de stabilisation sont souvent intégrés. Cela peut inclure des vérins hydrauliques ou des dispositifs de nivellement automatique.
- ✚ Systèmes de contrôle : Les systèmes modernes de suspension de forage sont souvent équipés de contrôles électroniques avancés pour surveiller et réguler les opérations de forage. Cela peut inclure des systèmes de surveillance en temps réel pour détecter les problèmes potentiels.
- ✚ Dispositifs de sécurité : Comme les opérations de forage peuvent être dangereuses, des dispositifs de sécurité tels que des limites de charge, des capteurs d'inclinaison et des systèmes d'arrêt d'urgence sont souvent intégrés pour protéger les travailleurs et les équipements.
- ✚ Systèmes de gestion des fluides de forage : Les fluides de forage sont essentiels pour le processus de forage. Des systèmes de gestion des fluides, y compris des pompes, des réservoirs et des filtres, sont souvent inclus dans les systèmes de suspension de forage pour garantir un fonctionnement efficace.

### 7.2. Le système de rotation :

Le système de rotation dans le forage minier est vital car il permet de faire tourner les outils de forage pour percer à travers les formations géologiques. Voici les composants principaux d'un système de rotation typique dans le forage minier :

- ✚ Tête de rotation (rotary Head) : La tête de rotation est l'élément essentiel qui reçoit le couple moteur et transfère la rotation aux tiges de forage et aux outils de forage. Elle est généralement située en haut du mât de forage et est alimentée par un moteur hydraulique ou électrique.
- ✚ Moteur de rotation : Ce moteur fournit la puissance nécessaire à la tête de rotation pour effectuer la rotation. Il peut être alimenté par une source d'énergie externe comme un moteur diesel ou électrique, ou intégré directement à la tête de rotation.
- ✚ Tiges de forage : Les tiges de forage transmettent la rotation de la tête de rotation aux outils de forage situés à l'extrémité inférieure. Elles sont généralement constituées de tubes métalliques filetés ensemble pour former une colonne de forage.
- ✚ Outils de forage : Ces outils sont montés à l'extrémité inférieure des tiges de forage et sont utilisés pour percer à travers la roche ou le sol. Ils peuvent varier en fonction du

type de formation géologique rencontrée et peuvent inclure des trépan, des marteaux perforateurs, des fraises, etc.

- ✚ Système de contrôle de la rotation : Les systèmes modernes de forage sont équipés de contrôles avancés pour réguler la vitesse, le couple et la direction de rotation. Ces systèmes de contrôle permettent également de surveiller les paramètres opérationnels tels que la pression, la température et la vitesse de rotation, ce qui contribue à assurer un forage efficace et sécurisé.
- ✚ Lubrification : Pour réduire l'usure et la friction pendant le forage, un système de lubrification peut être intégré pour fournir un flux continu de lubrifiant aux zones de contact entre les tiges de forage et les outils de forage.



**Figure II.8.** Système de rotation.

### 7.3. Le système de circulation du fluide :

Le système de circulation du fluide de forage dans les opérations minières est essentiel pour plusieurs raisons, notamment le refroidissement et la lubrification des outils de forage, le transport des déblais de forage à la surface, et la stabilisation des parois du trou de forage. Voici comment fonctionne généralement un tel système :

- ✚ Pompe de circulation : Au cœur du système se trouve une pompe de circulation qui est chargée de pomper le fluide de forage depuis la surface vers le fond du trou de forage.



Cette pompe peut être de différents types, tels que centrifuge ou à piston, et est généralement alimentée par un moteur électrique ou hydraulique.

- ✚ Fluide de forage : Le fluide de forage, souvent appelé boue de forage, est une suspension liquide qui peut être composée d'eau, de bentonite, de polymères et d'autres additifs. Ce fluide joue plusieurs rôles critiques, notamment le refroidissement et la lubrification des outils de forage, le transport des déblais de forage à la surface et la stabilisation des parois du trou de forage.
- ✚ Système de mélange : Avant d'être pompé dans le trou de forage, le fluide de forage est généralement mélangé et préparé à la surface. Cela peut impliquer l'ajout d'additifs pour ajuster les propriétés du fluide en fonction des conditions géologiques et des exigences de forage spécifiques.
- ✚ Tiges de forage et tuyaux de circulation : Le fluide de forage est pompé depuis la surface à travers les tiges de forage et/ou les tuyaux de circulation jusqu'au fond du trou de forage. Ces tiges de forage et tuyaux de circulation sont conçus pour résister aux pressions et aux forces de pompage tout en permettant un débit efficace du fluide.
- ✚ Retour du fluide de forage : Une fois que le fluide de forage a rempli sa fonction au fond du trou de forage, il est remonté à la surface à travers l'espace annulaire entre les parois du trou de forage et les tiges de forage. À la surface, le fluide est récupéré, filtré et préparé pour être réutilisé dans le système de circulation.
- ✚ Système de traitement et de stockage : Le fluide de forage récupéré à la surface est souvent envoyé à travers des équipements de traitement pour éliminer les débris solides et réguler les propriétés chimiques du fluide. Une fois traité, le fluide peut être stocké dans des réservoirs pour une réutilisation ultérieure.

Le système de circulation du fluide de forage minier existe deux principaux types de circulation : la circulation directe et la circulation inverse :

### **Circulation directe :**

- ✚ Ce système permet de forer dans tous les types de sol, y compris les roches sédimentaires et cristallines, sans l'utilisation de tubes de revêtement.
- ✚ Il implique l'établissement d'une circulation de boue à travers les tiges de forage pour récupérer les débris vers la surface.

- ✚ La stabilité des parois est assurée par la pression hydrostatique et la viscosité du fluide de forage.
- ✚ La force de traction de la machine doit être supérieure au poids du train de tiges.
- ✚ Profondeur maximale de 0 à 1 000 m et diamètre maximal de 152 mm à 444 mm.
- ✚ Utilisé pour les forages de petits à moyens diamètres et adapté à tous types de terrains, y compris les terrains fissurés ou fragmentés.

### **Circulation inverse :**

- ✚ Ce système utilise deux types de fluides : le fluide en circulation directe qui descend par le train de tiges, et le fluide en circulation inverse qui descend par l'espace annulaire.
- ✚ La circulation inverse présente des avantages tels que la reprise directe des éboulis si les parois du forage s'éboulent, évitant ainsi l'accumulation d'éboulis et la contamination des échantillons de sol et d'eau prélevés.
- ✚ La perte de fluide peut indiquer la présence de fractures ou de vides dans les terrains traversés, ce qui peut poser des problèmes au foreur.
- ✚ La composition physicochimique du fluide de forage peut être ajustée en fonction des conditions rencontrées lors du forage, et des experts en boue de forage peuvent modifier la composition, la pression ou le volume de la boue en fonction des besoins.

#### a) **Fonction du fluide de forage :**

Le fluide de forage, ou boue de forage, est une composante essentielle dans les opérations de forage minier. Il remplit diverses fonctions cruciales pour assurer le succès du processus de forage. Voici quelques-unes de ses fonctions principales :

- ✚ **Lubrification :** Le fluide de forage agit comme un lubrifiant entre les outils de forage et les parois du trou de forage. Cette lubrification réduit la friction et l'usure des outils de forage, ce qui prolonge leur durée de vie et permet des opérations de forage plus efficaces.
- ✚ **Refroidissement :** Pendant le forage, les outils de forage génèrent de la chaleur due au frottement avec la roche. Le fluide de forage est utilisé pour dissiper cette chaleur en absorbant la chaleur des outils et en la transportant vers la surface. Cela évite la surchauffe des outils, ce qui pourrait les endommager, et maintient une température de fonctionnement optimale.

- ✚ Stabilisation des parois du trou de forage : Le fluide de forage exerce une pression hydrostatique sur les parois du trou de forage, ce qui aide à les stabiliser et à prévenir les effondrements. Il maintient également les débris de forage en suspension, empêchant ainsi leur accumulation et le colmatage du trou de forage.
- ✚ Transport des déblais de forage : Le fluide de forage transporte les déblais de forage de la zone de forage jusqu'à la surface. Cela permet de nettoyer le trou de forage et d'éviter l'accumulation de débris qui pourraient entraver le processus de forage.
- ✚ Contrôle de la pression de formation : Le fluide de forage peut être conçu pour exercer une pression hydrostatique spécifique dans le trou de forage afin de contrebalancer la pression de formation. Cela empêche les fluides souterrains indésirables, tels que l'eau ou le gaz, de pénétrer dans le trou de forage et de causer des problèmes de pression non désirée.
- ✚ Transmission des signaux géologiques : Le fluide de forage peut également être utilisé pour transmettre des échantillons de roche et des signaux géologiques à la surface. Des composants spéciaux peuvent être ajoutés à la boue de forage pour permettre la récupération des échantillons de roche et fournir des informations précieuses sur la formation géologique.
- ✚ Contrôle de la pression de pore : Le fluide de forage peut être utilisé pour contrôler la pression de pore dans les formations géologiques. En ajustant la densité et la viscosité du fluide, les ingénieurs peuvent équilibrer la pression de pore dans la formation, ce qui réduit les risques de perte de circulation ou de déversement de fluides dans la formation.
- ✚ Prévention de la corrosion : Certains fluides de forage sont formulés avec des additifs qui aident à prévenir la corrosion des équipements de forage, en particulier dans les environnements où les conditions géologiques peuvent être corrosives.
- ✚ Support des diagraphies : Pendant le processus de forage, des diagraphies sont souvent réalisées pour évaluer les caractéristiques géologiques de la formation. Le fluide de forage peut être conçu pour permettre des diagraphies précises en maintenant une pression stable et en fournissant un environnement propice à la transmission des données.
- ✚ Contrôle des éruptions de gaz : Dans certaines zones, des éruptions de gaz peuvent survenir pendant le forage. Le fluide de forage peut être utilisé pour contrôler ces éruptions en exerçant une pression suffisante pour contenir les gaz dans le trou de forage et les empêcher de s'échapper brusquement.

- ✚ Réduction des coûts : Un fluide de forage efficace peut contribuer à réduire les coûts d'exploitation en améliorant l'efficacité du forage, en prolongeant la durée de vie des équipements et en minimisant les perturbations des opérations.

### 7.4. Le système d'alimentation :

Le système d'alimentation dans le forage minier est responsable de fournir la force nécessaire pour pousser les outils de forage dans le sol ou la roche. Voici un aperçu des composants clés d'un système d'alimentation typique :

- ✚ Moteur d'alimentation : Le moteur d'alimentation est généralement situé sur la plateforme de forage et fournit la puissance nécessaire pour déplacer les outils de forage vers le bas dans le trou de forage. Il peut être électrique, hydraulique ou pneumatique, en fonction de la configuration de l'équipement.
- ✚ Système de transmission de puissance : Pour transmettre la puissance du moteur d'alimentation aux outils de forage, un système de transmission de puissance est utilisé. Cela peut impliquer des engrenages, des courroies ou d'autres mécanismes de transmission pour convertir la puissance du moteur en mouvement linéaire des outils de forage.
- ✚ Système de guidage : Pour assurer un mouvement précis des outils de forage, un système de guidage est souvent intégré. Cela peut inclure des rails, des glissières ou des colonnes de guidage qui maintiennent les outils de forage alignés pendant le processus de forage.
- ✚ Dispositif d'avance automatique : Dans certains systèmes d'alimentation modernes, un dispositif d'avance automatique peut être utilisé pour contrôler le mouvement des outils de forage de manière automatique et programmée. Cela permet d'optimiser le processus de forage en ajustant automatiquement la vitesse et la force d'avance en fonction des conditions de forage.
- ✚ Système de contrôle : Les systèmes d'alimentation peuvent également être équipés de contrôles pour réguler le mouvement des outils de forage, surveiller les paramètres opérationnels et assurer la sécurité des opérateurs.

### 8. La garniture de forage :

Ce terme englobe divers outils et dispositifs spécialement conçus pour percer des trous dans le sol ou la roche lors de l'exploration ou de l'exploitation minière.

Voici quelques éléments courants qui pourraient faire partie d'une garniture de forage minier :

- ✚ Forets de différents types et tailles : Les forets sont des outils utilisés pour percer des trous dans le sol ou la roche. Ils varient en fonction du type de matériau à percer et de la profondeur du forage.
- ✚ Marteaux de forage : Les marteaux de forage sont utilisés pour frapper le foret et ainsi faciliter le processus de forage, en particulier dans les roches dures.
- ✚ Tiges de forage : Les tiges de forage sont des tubes métalliques utilisés pour prolonger la portée du foret et transporter la boue de forage ou l'air comprimé vers le bas du trou de forage.
- ✚ Systèmes de circulation de fluide : Ces systèmes sont utilisés pour transporter la boue de forage ou l'air comprimé vers le bas du trou de forage pour évacuer les débris et refroidir le foret.
- ✚ Équipement de forage directionnel : Dans certaines situations, comme l'exploration de gisements étendus, des outils de forage directionnel peuvent être utilisés pour contrôler la direction du forage.
- ✚ Accessoires de sécurité : Cela peut inclure des dispositifs de protection individuelle tels que des casques, des lunettes de sécurité et des gants, ainsi que des dispositifs de sécurité pour les machines de forage.

#### 8.1. Rôle de garniture de forage :

- ✚ Permettre la rotation de l'outil ;
- ✚ Permettre du poids sur l'outil ;
- ✚ Permettre la circulation du fluide de forage ;
- ✚ Guider, réaliser et contrôler la trajectoire du puits ;

#### 8.2. Fonction de la garniture de forage :

Permettre la circulation de la boue avec le minimum de perte de charge

Permettre de connaître avec précision la profondeur atteinte du forage

Permet la réalisation des opérations spéciales telles que la cimentation, le repêchage et les tests de formation

Une garniture de forage est constituée des principaux éléments suivants :

- ✚ Les tiges.
- ✚ Les tiges lourdes.
- ✚ Les masse-tiges.

### 8.3. Les masse-tiges :

**Masse-tiges permettent de :**

Mettre du poids sur l'outil pour éviter de faire travailler les tiges de forage en compression. Le poids utilisable des masse-tiges ne devra pas excéder 80% de leur poids total dans la boue ;

Jouer le rôle du plomb du fil à plomb pour forer un trou aussi droit et vertical que possible. Elles ne rempliront pleinement ces conditions que si elles sont aussi rigides que possible donc aussi largement dimensionnées que possible.



**Figure II.9.** Les tiges.

### a) Différent type de masse-tige :

- ✚ Masse tiges classiques.
- ✚ Masse tiges à rétreints.
- ✚ Masse tiges à extrémités soudées.
- ✚ Masse tiges à partie centrale surdimensionnée.
- ✚ Masse tiges carrées.
- ✚ Masse tiges spiralées.
- ✚ Masse tiges amagnétiques.

### b) L'assemblage de fond :

L'assemblage de fond de forage minier fait référence à la configuration et à l'agencement des outils, des tiges et des dispositifs utilisés au bas du puits lors du forage minier. C'est une étape critique dans le processus de forage, car elle détermine la stabilité du trou de forage, la circulation du fluide de forage, et la capacité à atteindre et à récupérer les échantillons de roche.

Les composants typiques de l'assemblage de fond de forage minier comprennent :

**La tête de forage :** C'est l'outil qui est en contact direct avec la roche à forer. Il peut être équipé de différents types de mors ou de dents en fonction du matériau à forer.

**Les tiges de forage :** Ce sont des tubes creux qui transmettent la rotation et la puissance de la surface au fond du puits. Elles sont généralement filetées pour permettre l'assemblage et le désassemblage facile des segments.

**Les stabilisateurs :** Ils sont souvent intégrés aux tiges de forage pour maintenir la verticalité du trou de forage et pour réduire les vibrations.

**Les marteaux de forage :** Utilisés dans le forage à percussion, ces outils transmettent l'énergie de percussion à travers les tiges de forage jusqu'à la tête de forage pour briser la roche.

**Les dispositifs de circulation de fluide :** Ils assurent la circulation du fluide de forage (généralement de l'eau ou de la boue) pour refroidir la tête de forage, transporter les débris de roche à la surface et stabiliser les parois du trou de forage.

### 9. Les outils de forage :

Les outils de forage minier sont essentiels pour extraire les ressources minérales enfouies sous terre. Voici quelques-uns des principaux outils utilisés dans le forage minier :



Tricône Bits (Mèches Tricône) : Ces mèches ont trois cônes rotatifs qui sont équipés de dents ou de carbure de tungstène. Elles sont efficaces pour le forage dans une grande variété de formations géologiques, y compris les roches dures.



**Figure II.10.** Tricône.

Mèches à Diamant (Diamond Bits) : Ces mèches sont équipées de segments de diamant synthétique ou naturel. Elles sont utilisées pour le forage dans les formations rocheuses très dures comme le granite, le gneiss et le basalte.



**Figure II.11.** Diamond Bits.



Mèches à Dents (Rock Bits) : Conçues avec des dents en acier ou en carbure de tungstène, ces mèches sont efficaces pour le forage dans les roches moyennement dures à dures.

Marteaux Fond de Trou (Down-the-Hole Hammers) : Ces outils sont utilisés dans le forage à percussion. Ils envoient des coups de marteau puissants à la tête de forage pour briser la roche.



**Figure II.12.** Down-the-Hole Hammers.

Outils de Forage Directionnel : Utilisés dans le forage directionnel, ces outils permettent de modifier la direction du forage pour atteindre des gisements situés en profondeur ou sous des obstacles.

Outils de Forage Horizontal : Ces outils permettent de réaliser des forages horizontaux ou en angle pour accéder à des gisements inaccessibles par forage vertical.

Trépans (Core Bits) : Utilisés pour le carottage, ces outils récupèrent des échantillons de roche sous forme de carottes cylindriques pour des analyses géologiques détaillées.



**Figure II.13.** Core Bits.

Mèches pour Forage à Circulation Inversée (Reverse Circulation Drill Bits) : Ces mèches sont conçues pour le forage à circulation inversée, où le fluide de forage est injecté à travers les tiges de forage pour remonter les débris de roche à la surface.

Outils de Forage Automatique : Ces outils utilisent des techniques avancées telles que le forage automatique guidé par GPS pour améliorer l'efficacité et la précision du forage.

### 10. Mode de destruction de la roche :

Il existe plusieurs modes de destruction de la roche utilisés dans l'industrie minière et de la construction, en fonction des caractéristiques de la roche, de l'objectif du travail et des contraintes environnementales. Voici quelques-uns des principaux modes de destruction de la roche :

- ✚ Forage et Dynamitage (Drilling and Blasting) : C'est l'une des méthodes les plus courantes pour briser la roche dans les opérations minières et de construction. Des trous de forage sont percés dans la roche, puis des explosifs y sont insérés et détonés pour fracturer la roche en morceaux plus petits.
- ✚ Forage et Abattage Mécanique (Drilling and Mechanical Breakage): Cette méthode utilise des équipements mécaniques tels que des marteaux hydrauliques, des brise-roches et des cisailles pour briser la roche en fragments plus petits. Elle est souvent utilisée dans les zones sensibles où l'utilisation d'explosifs est limitée.

- ✚ Forage au Jet d'Eau (Water Jet Drilling): Cette méthode utilise des jets d'eau à haute pression pour fragmenter la roche. Elle est efficace pour le forage dans les roches friables ou sensibles à la chaleur, et elle est souvent utilisée dans des environnements où les vibrations et le bruit doivent être minimisés.
- ✚ Forage à la Tarière (Auger Drilling) : Cette méthode est utilisée pour creuser des puits peu profonds ou pour collecter des échantillons de sol. Une tarière rotative est utilisée pour creuser dans la roche ou le sol.
- ✚ Forage à Percussion (Percussion Drilling): Cette méthode utilise un marteau-piqueur qui transmet des coups répétés à la tête de forage pour briser la roche en morceaux plus petits. Elle est souvent utilisée dans les applications de forage de puits d'eau et de géotechnique.
- ✚ Forage au Laser (Laser Drilling): Cette méthode utilise un faisceau laser concentré pour chauffer et fracturer la roche. Elle est utilisée dans des applications spécifiques où un contrôle précis de la taille et de la forme des fragments est nécessaire.
- ✚ Explosion Nucléaire (Nuclear Explosions) : Dans des circonstances très spécifiques et généralement contrôlées, des explosions nucléaires souterraines ont été utilisées pour fracturer la roche. Cependant, cette méthode est extrêmement controversée en raison de ses implications environnementales et de sécurité.

### 11. La vitesse d'avancement :

Le temps passé à avancer le puits représente une part importante du coût du forage. Dans les puits typiques, le temps perdu à faire avancer l'outil a été estimé entre 10 et 30 % du coût du puits [10]. Cela signifie que la régulation du taux de pénétration exerce une influence considérable sur les coûts de forage,

Pour identifier un taux de pénétration optimal, il est essentiel d'exploiter tout le potentiel des paramètres mécaniques et hydrauliques, ce qui peut être réalisé en ayant les paramètres optimaux. Cependant, cela représente un défi technique important, étant donné que les paramètres de forage sont mesurés en temps réel par des capteurs tout au long de l'opération de forage. Les paramètres susmentionnés sont nombreux et se divisent en deux catégories : les paramètres mécaniques et les paramètres hydrauliques.

### 11.1. Paramètres mécaniques :

#### a) Le poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit) :

Le WOB est la charge appliquée à l'outil pour vaincre la résistance de la roche. En d'autres termes, c'est la charge nécessaire pour permettre aux éléments de coupe de l'outil de pénétrer dans la formation. La charge limite est le poids sur l'outil nécessaire pour introduire complètement les dents de l'outil dans la formation.

#### b) Vitesse de rotation de l'outil ou RPM (Révolution Par Minute) :

C'est la vitesse du trépan par rapport à son axe de révolution, et sa valeur dépend du système de forage. Elle peut varier entre 50 et 1000 tr/min.

#### c) Couple exercé sur l'outil TTOB (Torque On Bit) :

Le couple exercé sur l'outil est équivalent au couple transmis par le liner au trépan le long de la révolution de son axe de rotation. Compte tenu du frottement du train de tiges contre la paroi du puits de pétrole ou de gaz, le couple est considérablement plus faible que celui mesuré à la surface. Le couple représente les effets combinés du couple réactif et des forces de frottement non linéaires sur la longueur du (Bottom Hole Assemblé). La valeur du couple en surface varie généralement entre 200 et 3 000 kg/m.

#### d) Type et conception de l'outil :

Le choix de l'outil approprié est d'une importance capitale pour déterminer la vitesse d'avancement des opérations de forage. En outre, une grande variété de configurations de rigidité et une grande variété de types d'outils sont également nécessaires. Le nombre, la taille, la forme des dents et la conception de la boîte de l'outil ont tous une incidence sur sa capacité à progresser, ce qui rend difficile la sélection de l'outil optimal pour une tâche donnée.

#### e) La nature de la roche :

La compréhension des caractéristiques de la roche en tant que matériau à usiner est fondamentale pour l'étude des modes de destruction. En outre, elle sert de base à l'étude de la détérioration des outils. En outre, elle est d'une grande utilité dans la recherche des facteurs de rendement dans les opérations de forage.

La dureté et l'abrasivité du minéral dont il est issu, sa résistance à la pénétration statique et dynamique, sa résistance à l'écrasement, sa résistance à la compression non confinée, sa

résistance à la compression confinée, sa fragilité et sa plasticité sont autant de facteurs qui contribuent à sa représentation.

### 11.2. Paramètres hydrauliques :

#### a) Pression et débit hydraulique :

Le problème de l'évacuation des déblais dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment des propriétés du fluide et du débit qui lui est imposé. En outre, la surface de la colonne d'évacuation et les pertes doivent être prises en compte. Le fluide (boue dont la densité et la composition sont adaptées à l'opération de forage) dans un trou de forage est un élément crucial, car il facilite l'évacuation des déblais qui s'accumulent au fond du trou, stabilise les parois du trou lorsque celui-ci n'est pas encore tubé (protégeant les constructions situées sous terre des pressions hydrostatiques horizontales), et, enfin, il peut également lubrifier et refroidir l'outil en fonctionnement.

#### b) Densité de la boue :

Le terme « densité de boue » est utilisé dans le contexte du contrôle des puits pour obtenir des informations sur le puits en question. Il est notamment utilisé pour contrôler la pression du puits. La densité de la boue est utilisée pour recueillir des données sur le puits, en particulier pour réguler la pression du puits. La boue de forage, en plus de transporter les déblais à la surface, fait également remonter à la surface le gaz contenu dans les roches. Cela permet d'obtenir des informations sur la nature des fluides présents dans le réservoir, ce qui constitue un élément important pour le contrôle de l'obturateur.

La densité et la viscosité du fluide de forage sont en fonction de la teneur en solide.

Cette dernière, étant élevée, elle réduit les performances de l'outil

Les meilleures vitesses d'avancement sont obtenues en forant avec une boue de densité et de viscosité les plus faibles possible à la sortie des duses de l'outil.

#### c) Le fluide de forage :

Le type de boue de forage est sélectionné en fonction de ses caractéristiques de performance. Il a mené des recherches et déterminé les propriétés physiques et chimiques du fluide de forage. Les types de boues les plus courants sont la boue hydroponique (boue hydratée), la boue à base de pétrole (argile à base de pétrole) et l'argile synthétique (argile à base synthétique). L'argile

est un mélange d'additifs chimiques et d'eau.

### 12. Conclusion :

Les machines de forage utilisées pour le creusement des trous dans les carrières sont généralement divisées en deux groupes selon le mode de destruction de la roche par l'outil spécial :

- + La destruction mécanique de la roche.
- + La destruction physique de la roche.

Les machines du premier groupe, les plus répandues, peuvent être classées en fonction du type de travail de l'outil et de l'application des charges. Il s'agit des machines de forage rotatif, percutant et roto-percutant.

Ce chapitre a donné un aperçu des principes fondamentaux qui sous-tendent le domaine d'étude. Cela nous a permis de comprendre les concepts et les processus qui sont cruciaux pour le processus. L'objectif est d'établir des concepts théoriques et pratiques qui faciliteront un contrôle plus efficace de l'opération de forage. Ces méthodes sont très bénéfiques en termes d'économies de temps et de matériel, avec la possibilité de réduire les dépenses en outils de forage.

Carottage

## 1. Introduction :

La technique de forage rotary consiste à utiliser un outil qui détruit la roche sous l'effet du poids et de la rotation.

Nous allons décrire la procédure de réalisation d'un forage et les étapes qui les constituent.

## 2. Technique de forage :

### 2.1. Forage rotary à circulation directe :

La méthode de forage rotary utilise un outil (trépan) monté au bout d'une ligne de sonde (tige visée les unes aux autres), animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale sous l'effet d'une partie de poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique. Le mouvement de rotation est imprimé au train de tiges et à l'outil par un moteur situé sur la machine de forage en tête de puits. Les tiges sont creuses et permettent l'injection de la boue au fond de forage. Les outils utilisés en rotation sont des trépans de plusieurs types en fonction de la dureté des terrains rencontrés (outil à lames, outil à pastille, molette ou tricône, outils diamantés ou à carbures métalliques). Au-dessus du trépan, on peut placer un ou plusieurs masses tiges très lourds qui accentuent la pression verticale sur l'outil et favorisent la pénétration et la rectitude du trou et des tiges.

Le forage rotary nécessite l'emploi d'un fluide de forage préparé sur le chantier. Dans le cas de la circulation directe, le fluide est injecté en continu sous pression dans les tiges creuses de la ligne de sonde, il sort par les événements de l'outil remonte à la surface dans l'espace annulaire (entre la tige et les parois du trou).[23]

#### a) Avantages :

- ✚ La profondeur du forage peut être très importante, la formation n'est pas perturbée par le terrain peu stable ou plastique, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adaptés.
- ✚ Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue)
- ✚ Le forage rotary entraîne une consolidation des parois en terrain meuble par dépôt d'un cake.

#### b) Inconvénient :

- ✚ Nécessité d'un fluide de forage qui ne permet pas d'observation directe de la qualité des eaux du forage traversées
- ✚ Colmatage possible des formations aquifère par utilisation de certaines boues (bentonite)
- ✚ Difficulté d'observation des cuttings, la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement l'inconvénient.





Figure III.1. Machine de forage.

### 3. Moyens de mise en œuvre :

Pour une campagne de sondage il faut au minimum les matériaux suivants :

- ✚ Un camion-citerne : permettant le ravitaillement en eau industrielle pour les travaux du chantier.
- ✚ Une remorque a tige : lieu de stockage et de transport des tiges. Elle est toujours positionnée à proximité de la sondeuse.
- ✚ Un véhicule TOYOTA pour la relève.
- ✚ Un mixeur (pour la préparation de la boue).
- ✚ Une centrale à boue ou fosse à boue.
- ✚ Une pompe à boue indépendante (si celle de la machine est en panne).

Une sondeuse permet le forage des puits. Elle est constituée des plusieurs organes dont : un moteur à l'actionne tout le mouvement, une pompe à boue, un derrick (mat), un treuil, un

mandrin de rotation, une tête d'injection, une tige carrée, une moufle mobile et une moufle fixe.

#### 4. Préparation de la boue :

##### 4.1. Fosse à boue :

Lors de l'aménagement du site du forage, L'engin creuse une fosse à côté du point à sonder c'est la fosse à boue. Cette fosse doit être rendu pratique pour les ouvriers de l'équipe de forage. Elle est arrosée d'eau, puis tapissée par deux ou trois sacs de bentonite. Ce tapissage permet d'éviter les pertes de boue dues à l'infiltration [24].



Figure III.2. Fosse a boue.

##### 4.2. Préparation de la boue :

Elle se fait dans une fosse ou bac à boue (la centrale à boue). Le contenant est rempli d'eau provenant de la citerne présente sur le lieu de forage. En fonction de la qualité d'eau dans la fosse ou dans le bac, le chef sondeur évalue le nombre de sacs de bentonite à y introduire. La bentonite est mélangée d'eau à l'aide d'un mixeur.

Les caractéristiques importantes à maîtriser sont la densité et la viscosité. Elles sont de données capitales pour un bon mouvement. La densité se mesure à l'aide d'une balance BAROID

cette mesure doit être de  $1.20 \text{ g/cm}^3$  pour assurer une bonne remontée des cuttings et une bonne consolidation des parois de trou.

L'entonnoir MARSH permet d'obtenir le temps d'écoulement de cette même boue en seconde pour le remplissage d'un récipient de capacité 14 de gallon Us, soit 0.95 litre. C'est la viscosité de la boue. Elle doit être entre 40 et 45 secondes pour être pompée sans difficulté et assurer le bon colmatage des parois.[24]

### 4.3. Le rôle de la boue :

Le fluide qui remplit le trou de forage a des multiples rôles qui sont :

- ✚ Le nettoyage du trou,
- ✚ Les déblais (cuttings) sont remontés à la surface ou ils sont partiellement récupérés et étudiés par les géologues.
- ✚ Le maintien de parois de trou et de fluide contenus dans les formations. Les fluides exercent sur la formation une contre pression. Cette contre pression a bien évidemment une influence sur l'état de contrainte au voisinage du trou.
- ✚ La lubrification et le refroidissement des outils de forage.
- ✚ La consolidation des parois de forage en déposant en face des zones perméables un dépôt de boue que l'on appelle Mud cake ou gâteau de boue. Ce dernier finit par empêcher toute circulation de fluide entre le trou de forage et la formation.

Une boue ne peut jouer convenablement tous les rôles que nous avons énumérés que si elle est conditionnée, c'est-à-dire que si ses principales caractéristiques physiques et chimiques sont maintenues aux valeurs appropriées.[24]

## 5. Le forage (exécution) :

### 5.1. Avant-trou :

Le derrick dressé ; un outil tricône à huit pouces et demi de dimensions est monté sur la tige carrée. L'outil est choisi en fonction du diamètre du tube guide. La pompe à boue actionnée et refoulant la boue de circulation jusqu'aux orifices de l'outil, la table de rotation est en marche et le mouvement de rotation est transmis à la tige carrée. En suite cette tige est descendue et la foration se fait jusqu'à une profondeur d'un mètre (1). La moufle mobile remonte la tige carrée et le tube guide est installé dans le trou à la profondeur définie pour éviter les effondrements superficiels du terrain.



### 5.2. Le tubage :

Le tubage correspond à la mise en place d'un tube en acier six pouces un demi appelé tube guide qu'on installe généralement à une profondeur de 5m et qui ressort à la surface sur 0.5m.

Ici au niveau de ce tube on met du sable et de la bentonite mélangés pour mettre au niveau de l'espace annulaire situé entre la paroi externe du tube et la paroi interne du trou de forage.

### 5.3. La Foration :

Après la pose de ces dispositifs, l'outil tri lame à quatre pouces de dimensions trois quart, choisit en fonction du type de terrain sur le site, est monté définitivement et la foration se poursuit jusqu'à introduire la longueur de la tige carrée dans le sol. Cette dernière remontée à l'aide d'une moufle mobile et sera calé contre le derrick après avoir retiré l'outil. A l'aide d'une moufle mobile une tige retirée du camion sera visée à l'outil. La tige va être descendue totalement puis calée et au-dessus de cette tige, le Kelly s'emboîtera. La tige carrée est serrée à l'aide d'une clé (à mollette, à chaîne, ou hydraulique) [25].

La pompe à boue et la table de rotation remises en fonction, la foration continue en descendant la tige de sonde. Cette opération de monter de tige se répète tige après tige jusqu'à atteindre la profondeur requise. Pour ce qui concerne la remontée des tiges lors des incidents (pannes...) ou en fin de sondage, l'opération inverse à l'opération de foration sera pratiquée.



Figure III.3. Table de rotation.

### 5.4. La circulation :

Une fois la profondeur atteinte, c'est la fin de la foration. Alors la circulation de la boue du trou peut commencer. Elle dure au minimum une heure est après le nettoyage du trou qui est indispensable.

### La récupération de la carotte

Le carottage est le prélèvement d'un échantillon de sous-sol terrestre ou marin obtenu à l'aide d'un tube appelé carottier que l'on fait pénétrer dans le sous-sol. Dans un premier temps nous allons essayer de parler du principe, la mise en œuvre ensuite le mode opératoire, mode de récupération puis la mise en caisse et en fin les paramètres pour ressortir la carotte.

#### 1. Principe :

Le principe de sondage carotté est de venir découper un cylindre de terrain le plus intact possible afin de réaliser des observations et des essais représentatifs des formations en place. Le découpage du terrain peut être fait par fonçage ou battage (carottier poinçonneur) ou par rotation (carottier rotatif) [23].

#### 2. Mode opératoire :

Il est indispensable, d'abord, de nettoyer parfaitement le trou, en utilisant, au besoin un panier à sédiment sur 40 ou 50 derniers mètres forés.

La descente du carottier au fond du trou est à moins de quelque centimètre du fond. La circulation se déroule à très faible débit de boue, puis avec une vitesse légère, en tournant lentement en accélérant avec appuie. Lorsque le carottier se place sur le terrain estimé pour débiter le carottage, les différents réglages et collage se procèdent à savoir la rotation pour bruler et sectionner la carotte à sa base.

Pour remonter le carottier, il y a lieu de procéder d'abord très lentement, afin de ne pas détériorer le trou.

La manœuvre des tiges doit qui s'opère (emplois des clés à chaîne de préférence) pour ne pas risquer de perdre tout ou une partie de la carotte [24].



Figure III.4. Ressort extracteur.

### 3. Mise en œuvre :

Les carottiers rotatifs sont constitués d'un tube cylindrique à l'extrémité du quel se trouve un outil appelé couronne. L'ensemble est en rotation et en appui par la tête de forage via le train de tige. La couronne munie d'éléments d'abrasion, découpe le terrain qui entre à l'intérieur du tube du carottier. Un extracteur rompt le contact entre la carotte et le terrain en place puis maintient la carotte à l'intérieur du tube carottier.



Figure III.5. Couronne.



### 4. Mode de récupération :

Pour sortir la carotte du carottier, employer un maillet en bois, l'air comprimés, ou une pompe, à l'exclusion d'un marteau ou d'une masse métallique.

Après démontage de l'outil de coupe, la carotte est éjectée sous pression hydraulique, c'est une zone délicate s'opère horizontalement.

Ne jamais perdre de vue que les carottiers sont des outils de haute pression, les tubes sont minces et les filetages sont fin et fragiles.



Figure III.6. Echantillon de la carotte.



### 5. Mise en caisse de la carotte :

Après avoir récupéré la carotte, elle est soumise au géologue qui la nettoie en premier lieu et il la découpe en 0.75m de longueur et il la place dans des caisses conçues pour les circonstances et sont envoyée au laboratoire spécialisé.



Figure III.7. Carotte en caisse.

### 6. Différents types de carottiers :

Nous pouvons énumérer comme type de carottier :

- ✚ ✓ Carottier vertical qui peut être :
  - Carottier sélectif vertical (conventionnel Geobar S).
  - Supérieur à 250cm diamètre carotté (101 T6).
  - Inferieur à 250cm diamètre carotté (106 ; T6).
- ✚ ✓ Carottier sélectif de diamètre PQ ; HQ ; et NQ.
- ✚ ✓ Carottier incliné de diamètre de PQ : HQ et NQ.

### 7. Différents types de couronnes :

Pour les couronnes nous pouvons citer :

- ✚ La couronne T6 : 101mm de diamètre
- ✚ La couronne T6 ; 106mm de diamètre
- ✚ La couronne T6 ; 116mm de diamètre

### 8. Réglage du carottier :

Il permet d'empêcher l'altération du diamètre de la carotte, afin de ne pas lâcher la carotte dans le trou. Ensuite l'écrou permet de régler pour que le porte ressort ne se bouche pas.

### 9. Paramètres :

Il s'agit de régler les 3 facteurs suivants :

- ✚ Vitesse de rotation
- ✚ Poids de l'outil
- ✚ Débit de circulation ou produit de boue

#### a) Vitesse de rotation :

La vitesse de rotation est bien entendu, celle qui procure le plus faible prix de revient par mètre carotté.

Elle dépend surtout en degré d'usure de la couronne.

#### b) Poids de l'outil :

Pour la roche dure, la pression sur la couronne ne doit être très élevée.

Pour être logique, la détermination du poids à appliquer à une couronne diamantée devrait tenir compte exclusivement du nombre et de la surface de contact des roches, ce qui peut être appliqué au diamant.

#### c) Débit de circulation ou produit de boue :

Le réglage du débit de boue ou d'eau claire, en carottage doit permettre d'assurer une bonne évacuation des cuttings, sans cependant provoquer des failles dans les passages.



## 10. L'appareil de forage : (Golden Bear 1400)



DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
FABRICANTE	FORDIA
CANTIDAD	1
MOTOR	CUMMINS QSB 5.9 (205 CV)
MASTIL ELEVACIÓN	HIDRAULICO
CARRERA ÚTIL	5.200 mm
BOMBA	FMC (160 l.p.m.)
CABEZA DE ROTACIÓN	HIDRÁULICO
PAR MOTOR	1880 Nm
TRACCIÓN MÁXIMA	12.000 kg
MORDAZAS	HIDRAULICAS
RPM	1.250 r.p.m.
EMPUJE MÁXIMO	7500 kg
DIÁMETRO VARILLAS	PQ./HQ./NQ./BQ.

**Figure III.8.** Information de machine golden bear 1400.

La foreuse "Golden Bear 1400" est une machine de forage avancée utilisée dans diverses industries telles que le pétrole et le gaz, la géothermie et le forage de puits d'eau. Conçue pour offrir des performances élevées et une efficacité dans les opérations de forage profond, elle constitue un choix idéal pour de nombreux projets géologiques et d'ingénierie.

### 11. Conclusion :

Le processus de carottage représente l'exploration de la zone par l'extraction d'échantillons de la couche de sol afin d'identifier l'emplacement de la couche de phosphate. Ces informations sont ensuite utilisées pour déterminer la forme finale du gisement, ce qui est réalisé à l'aide d'une foreuse (Golden Bear). Le processus de forage est facilité par de nombreuses étapes et paramètres, qui sont utilisés pour identifier avec précision l'emplacement du gisement.

Méthodes  
d'optimisation des  
paramètres de forage

## 1. Introduction :

L'objectif de l'optimisation du forage est d'optimiser les variables contrôlables tout au long du processus de forage, y compris le poids de l'outil et la vitesse de rotation, ainsi que les paramètres hydrauliques.

Par conséquent, afin d'atteindre le coût le plus bas, la méthodologie optimale doit être employée, en tirant le meilleur parti possible de l'expérience et de la recherche antérieures.

## 2. Les Plans d'expériences :

Le but de l'optimisation du forage est d'améliorer le taux d'avènement et d'augmenter l'efficacité de l'opération et de réduire les coûts de forage.

L'amélioration des paramètres d'excavation vise à :

- + Rationalisation et conception du forage.
- + Modéliser des phénomènes complexes à travers des expériences, ces derniers peuvent être difficiles à appliquer sur le terrain, ou leurs conséquences sont déraisonnables.

C'est pourquoi la méthodologie de conception expérimentale est utilisée pour résoudre ce problème.

Avant de se lancer dans l'étude de plans expérimentaux, il est nécessaire de définir le vocabulaire que nous allons utiliser.

### 2.1. Généralités sur les plans d'expériences :

Ces plans d'expériences ont un vocabulaire et une terminologie qu'il est nécessaire de définir :

#### a) Définition des plans d'expériences :

Un plan d'expérience est une stratégie de planification des expériences dans le but d'obtenir des conclusions solides et adéquates d'une manière efficace et rentable. La méthodologie de la conception expérimentale repose sur l'hypothèse qu'une expérience correctement organisée conduira souvent à une analyse relativement simple et à une interprétation statistique des résultats [17].

#### b) L'intérêt des plans d'expériences :

Le principal avantage de la conception expérimentale est qu'elle permet d'optimiser le nombre d'expériences à réaliser pendant la phase d'essai en déterminant à l'avance les facteurs réels ou les combinaisons de facteurs qui influencent la réponse du système étudié [17].

#### c) Facteur :

Un facteur est défini comme toute variable qui peut être contrôlée et qui peut influencer la réponse observée. La distinction fondamentale entre les concepts de « variable » et de « facteur » réside dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié facilement. La valeur attribuée à un facteur dans le cadre d'une expérience est appelée niveau.[18]



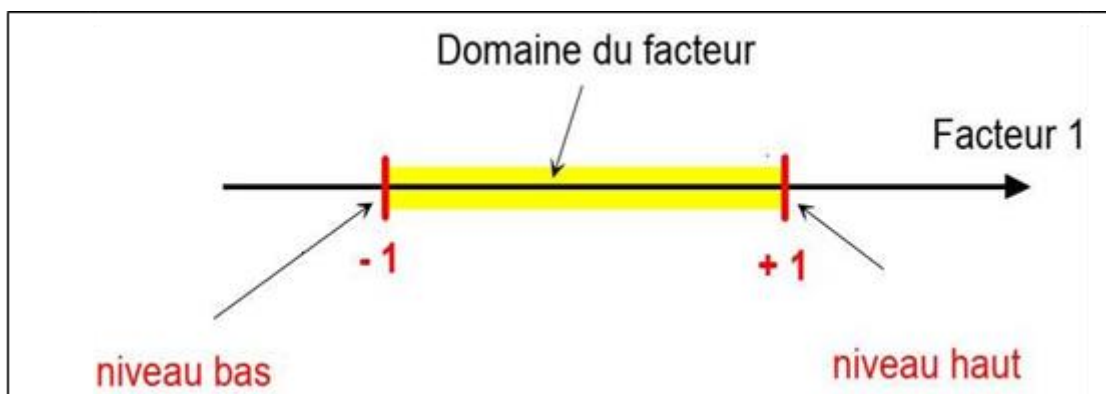
Les facteurs peuvent être classés comme quantitatifs, qualitatifs, contrôlables, incontrôlables, continus ou discontinus.

### d) Notion d'espace expérimental :

Dans le contexte de la recherche expérimentale, le terme « variable » est utilisé pour décrire un facteur susceptible de changer ou de varier. Au cours d'une étude, l'expérimentateur souhaite mesurer cette variable à chaque essai. Cette quantité est désignée comme la réponse, qui représente la quantité d'intérêt. La valeur de cette variable dépend de plusieurs variables. Le terme « variable » est remplacé par le terme « facteur ». Par conséquent, la réponse dépend de l'influence d'un ou de plusieurs facteurs.

Le facteur initial peut être représenté par un axe gradué et orienté. La valeur attribuée à un facteur dans le cadre d'un test est appelée niveau. Dans le cadre de l'étude de l'influence d'un facteur, il est habituel de limiter ses variations à une fourchette spécifique.

La limite inférieure est le niveau bas. La limite supérieure est le niveau haut.



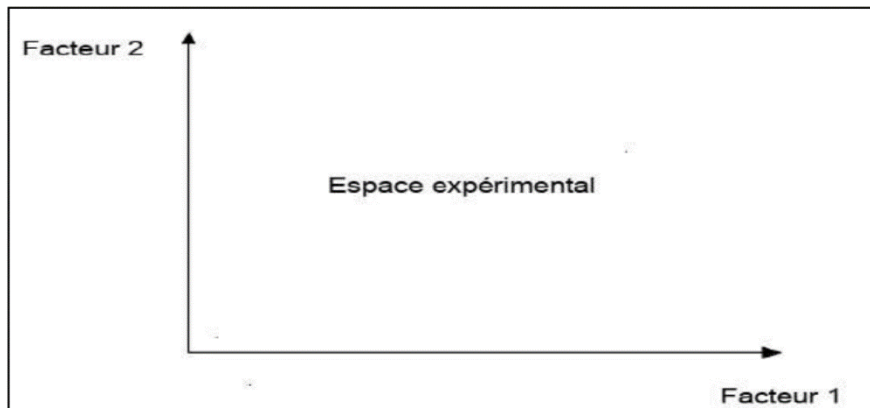
**Figure IV.1.** Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1).

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par (-1) et le niveau haut par (+1).

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions.

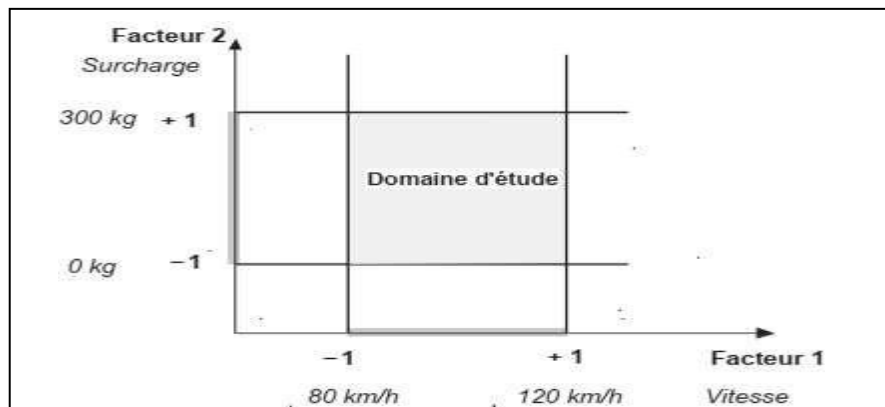
Cet espace est appelé l'espace expérimental.



**Figure IV.2.** Représentation de l'espace expérimental.

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude. Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs. Supposons que le second facteur soit la surcharge du véhicule définie comme toute masse supplémentaire à celle du véhicule et du chauffeur. Le niveau bas de la surcharge est 0 kg et le niveau haut 300 kg, par exemple.

S'il n'y a pas de contraintes, le domaine d'étude est représenté par tous les points dont les surcharges sont comprises entre 0 et 300 kg et dont les vitesses sont comprises entre 80 et 120 km/h.



**Figure IV.3.** Représentation du domaine d'étude.

e) **Réponse :**

On appelle réponse la grandeur d'intérêt observée dans l'étude d'un phénomène. Cette étude peut se traduire par plusieurs réponses. La valeur d'une réponse ne peut être modifiée que de manière indirecte en faisant varier les facteurs.[18]

f) **Notion de modélisation mathématique :**

Une fonction mathématique est sélectionnée à l'avance pour établir une relation entre la réponse et les facteurs. Un développement limité de Taylor-Mac Laurin est utilisé. On suppose que les dérivées sont constantes et que le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé.[19]

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij} \dots x_i x_j \dots x_z + e \dots \dots \dots \text{ I}$$

Où :

**y** : est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

**X<sub>i</sub>** : représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur.

**a<sub>0</sub>, a<sub>i</sub>, a<sub>ij</sub>, a<sub>ii</sub>** : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

**e** : erreur totale.

g) **Système d'équations :**

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle [19] :

$$Y = Xa + e \dots \dots \dots \text{ II}$$

Où

**Y** : est le vecteur des réponses.

**X** : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points.

Expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

**a** : est le vecteur des coefficients.

**e** : est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a  $n$  équations et  $p + n$  inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note :

Le résultat de ce calcul est :

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}' \mathbf{Y} \dots \dots \text{III}$$

Formule dans laquelle la matrice  $\mathbf{X}'$  est la matrice transposée de  $\mathbf{X}$ . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients. Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- ✚ La matrice d'information  $\mathbf{X}' \mathbf{X}$ .
- ✚ La matrice de dispersion  $(\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1}$ .

Nous allons maintenant appliquer les notions et les propriétés que nous venons de décrire aux plans d'expériences les plus classiques. Nous verrons successivement les plans suivants :

- ✚ Plans factoriels complets à deux niveaux.
- ✚ Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- ✚ Autres plans à deux niveaux.
- ✚ Plans à plusieurs niveaux.
- ✚ Plans pour surfaces de réponse.
- ✚ Plans de mélanges.
- ✚ Plans booléens.
- ✚ Plans optimaux.
- ✚ Plans pour simulations numériques.

### 3. Méthode d'optimisation RSM (réponse surface méthodologie) :

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques qui peuvent être utilisées pour développer, améliorer et optimiser les processus.

Ces techniques sont utiles au développement, à l'amélioration et à l'optimisation des processus. Elle trouve également

Elle trouve également des applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de produits existants. et l'amélioration de la conception des produits existants.

Les applications les plus larges de la RSM se trouvent dans le monde industriel, en particulier dans les situations où de multiples variables d'entrée affectent potentiellement un produit.

Les situations où de multiples variables d'entrée peuvent potentiellement affecter une mesure de performance ou une caractéristique de qualité du produit ou du processus. ou une caractéristique de qualité du produit ou du processus. Cette mesure de performance ou caractéristique de qualité est appelée la réponse. Elle est généralement mesurée sur une échelle continue, bien que les réponses attributives, les classements et les réponses sensorielles ne soient pas rares. La plupart des applications de la RSM dans le monde réel impliquent plus d'une réponse. Les variables d'entrée sont parfois appelées variables indépendantes, et elles sont sous le contrôle de l'ingénieur ou du scientifique, du moins pour les besoins de la recherche.

Les variables d'entrée sont parfois appelées variables indépendantes et sont sous le contrôle de l'ingénieur ou du scientifique, au moins pour les besoins d'un test ou d'une expérience.

### 3.1. Les Principes généraux :

La méthode de la surface de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser les processus. Elle trouve également des applications importantes dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception des produits existants.

L'objectif de cette méthode n'est pas de classer les effets des différents facteurs, mais de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations de ces facteurs.[20]

### 3.2. Étapes de RSM :

Une étude d'optimisation RSM peut être divisée en trois phases.

- ✚ La première phase : est le travail préliminaire au cours duquel les paramètres indépendants et leurs niveaux sont déterminés.
- ✚ La deuxième phase : est la classification des essais, le traitement et l'analyse des données, ainsi que la prédiction et la vérification de l'équation du modèle.
- ✚ La troisième phase : est la représentation des surfaces de réponse dans l'espace tridimensionnel (3D) et la détermination des points optimaux.

#### a) La première phase :

Cette étape concerne la détermination des paramètres opératoires et des zones expérimentales :

L'étude d'optimisation a porté sur les paramètres opératoires considérés comme influençant le taux de pénétration, à savoir le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et la nature de la roche, pour deux niveaux de paramètre géométrique (angle de coupe).

Le choix des paramètres à optimiser et leurs plages expérimentales sont basés sur les données de la littérature. Les trois paramètres considérés comme influençant le taux de pénétration sont tous des facteurs continus ou quantitatifs, c'est-à-dire des facteurs qui peuvent être contrôlés et qui peuvent prendre n'importe quelle valeur numérique réelle dans la plage choisie. Les paramètres et leurs plages expérimentales sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.1.** Domaines expérimentaux des paramètres étudiés.

Paramètre	Symbole	Unité	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Poids sur l'outil	WOB	kgf	80	120	160
Vitesse de rotation	RPM	tr/min	118	135	152
Résistance à la compression	RC	kg/cm <sup>2</sup>	640	750	1550

**b) La deuxième phase :**

La deuxième étape peut élaborer selon les points suivants :

- ✚ Classement des essais.
- ✚ Modèle mathématique : Le modèle mathématique postulé est un polynôme d'ordre 2 tel que l'équation

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \dots \text{III}$$

Où :

**Y** est le taux de pénétration (réponse) et **X<sub>1</sub>**, **X<sub>2</sub>** et **X<sub>3</sub>** sont les valeurs des paramètres.

**b<sub>0</sub>**, représente la constante de modèle et **b<sub>1</sub>**, **b<sub>2</sub>** et **b<sub>3</sub>** sont les coefficients des termes linéaires et **b<sub>11</sub>**, **b<sub>22</sub>** et **b<sub>33</sub>** sont les coefficients des termes quadratiques et **b<sub>12</sub>**, **b<sub>13</sub>** et **b<sub>23</sub>** sont les coefficients des termes d'interaction.

- ✚ Traitement et analyse des données : Le modèle a été validé à l'aide du test d'analyse de la variance (ANOVA). Le modèle, les coefficients de régression et le test de manque d'adéquation sont considérés comme significatifs si la probabilité de significativité de la p-value de risque est inférieure à 0,05. En plus de l'ANOVA, nous utiliserons d'autres outils, à savoir le coefficient de détermination multiple R<sup>2</sup> et le coefficient de variance CV. Une valeur du coefficient de variance inférieure à 10 % indique un très haut degré de précision entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.



### c) **La troisième phase :**

C'est l'étude de l'optimisation. Une fois le modèle déterminé et sa validité vérifiée, il s'agit d'optimiser le problème étudié. Plusieurs méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour optimiser simultanément les différentes réponses résultant de l'utilisation de la méthode de la surface de réponse.

Pour ce faire, il suffit de tracer les courbes d'iso réponse de chaque critère en fonction des variables, puis d'hachurer les zones d'intérêt en fonction des objectifs retenus. Enfin, en superposant les graphiques, on fait apparaître les zones de compromis. Malheureusement, si cette méthode semble très attrayante pour des cas simples à 2 ou 3 variables, elle devient très lourde pour des problèmes plus complexes. En effet, l'utilisateur doit jongler avec un grand nombre de graphiques pour trouver le meilleur compromis.

### 3.3. **Les avantages et les inconvénients (RSM) :**

#### a) **Les avantages :**

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes expérimentales ou d'optimisation traditionnelles qui utilisent une variable à la fois. Tout d'abord, la RSM permet d'obtenir une grande quantité d'informations à partir d'un petit nombre d'expériences. En effet, les méthodes classiques prennent du temps et nécessitent un grand nombre d'expériences pour expliquer le comportement d'un système. Deuxièmement, la RSM permet d'observer l'effet d'interaction des paramètres indépendants sur la réponse. L'équation du modèle clarifie facilement ces effets pour la combinaison binaire des paramètres indépendants. En outre, le modèle empirique qui relie la réponse aux variables indépendantes est utilisé pour obtenir des informations sur le processus. À cet égard, la RSM est un outil utile pour optimiser les processus de fabrication.[21]

#### b) **Les inconvénients :**

D'autre part, le principal inconvénient de la méthode RSM est qu'elle ajuste les données à un polynôme du second ordre. On ne peut pas dire que tous les systèmes contenant une courbure sont bien ajustés par le polynôme du second ordre. Pour y remédier, les données peuvent être transformées en une autre forme qui peut être expliquée par le modèle de second ordre. Par exemple, des transformations logarithmiques et d'autres méthodes de linéarisation peuvent être utilisées. Bien que ces transformations puissent être utiles, il n'est pas possible d'affirmer qu'elles donneront des résultats souhaitables pour tous les systèmes. En outre, la transformation de la réponse ou des entrées prend du temps et il est parfois difficile de savoir quelle forme de transformation est la meilleure. Par ailleurs, si le système est mal expliqué par un modèle de second ordre, il convient de choisir une gamme plus restreinte de paramètres indépendants. Il

est possible d'augmenter la précision de l'équation du modèle en travaillant dans une gamme étroite de paramètres indépendants, mais il faut se rappeler que travailler dans une gamme étroite réduit la possibilité de déterminer le point stationnaire. Le travail préliminaire devient plus critique lorsqu'il s'agit de déterminer la plage de paramètres indépendants. [21]

#### 4. Optimisation par l'Energie Spécifique (Es) :

##### 4.1. Définition :

L'énergie spécifique est le travail nécessaire pour extraire une unité de volume de roche. Ce modèle de « énergie mécanique spécifique » a été utilisé en laboratoire pour évaluer l'efficacité d'un outil de forage. Selon le type d'outil utilisé, une certaine quantité minimale d'énergie est nécessaire. La quantité d'énergie nécessaire dépend du type d'outil utilisé et de la nature de la roche.

##### 4.2. Principe de la théorie de l'énergie spécifique :

La théorie de l'énergie spécifique (Es) fournit des moyens pour prévoir ou analyser les performances de l'outil de forage. L'Es est basée sur des principes fondamentaux liés à la quantité d'énergie exigée pour enlever un volume unitaire de roche et de l'efficacité de l'outil pour détruire la roche [22].

L'énergie spécifique "ES" est une mesure utile pour prédire la puissance nécessaire (couple de l'outil et paramètre RPM) pour un type d'outil donné afin de forer à un ROP donné dans un type de roche donné. Pour forer à un ROP donné dans un type de roche donné. La théorie d'Es n'est pas nouvelle ; elle est utilisée depuis de nombreuses années pour évaluer rapidement les performances des outils [22].

$$Es = \frac{WOB}{AB} + \frac{120 + \pi \times N \times T}{ROP \times AB} \dots\dots\dots IV$$

Avec :

**Es** : l'énergie spécifique (psi).

**WOB** : le poids sur l'outil (lbf).

**AB** : La section de puits « l'outil » (in<sup>2</sup>).

**N** : RPM (Rotation Par Minute).

**T** : Torque (ft×lbf).

**ROP** : la vitesse d'avancement (ft/h).

Pressier a validé l'équation pour un forage sous la pression hydrostatique. Puisque la majorité de données réelles est sous forme de mesures en surface telles que : poids sur l'outil (WOB), RPM (N), et le taux de pénétration (ROP).

4.3. Coefficient de frottement « Coefficient of Sliding Friction »  $\mu$  :

Le coefficient de frottement  $\mu$  a été introduit pour exprimer le Torque (T) tant qu'une fonction de poids sur l'outil (WOB), ce coefficient sera utilisé par la suite pour calculer les valeurs de l'énergie spécifique imposée dans les cas où les mesures du Torque (T) sont fiables. Comme suite [20] :

$$\mu = 36 \times \frac{T}{WOB \times DB} \dots\dots V$$

Avec :

**T** : Torque en (ft×lbf).

**WOB** : le poids sur l'outil (lbf).

**DB** : diamètre de l'outil (in).

$\mu$  : Le coefficient de frottement (sans unité).

4.4. Efficacité mécanique **EFF<sub>m</sub>** :

L'énergie spécifique minimale est atteinte lorsque l'énergie spécifique est proche ou égale à la contrainte de compression de la roche forée. L'efficacité mécanique (EFF<sub>m</sub>) pour chaque type d'outil est alors calculée comme suit :

$$EFF_{max} = 100 \times \frac{Es_{min}}{ES} \dots\dots VI$$

**ES<sub>min</sub>** = l'énergie spécifique minimum (Dureté de la roche).

Le couple associé à un type particulier d'outil pour forer à un ROP donné dans un type donné de roche ou résistance à la compression (CCS) est calculé en employant l'équation (4), qui est dérivée de l'équation (1) et de l'équation (3), comme suit :

$$T = \left( \frac{CCS}{EFF_m} - \frac{4 \times WOB}{\pi \times DB} \right) \times \left( \frac{DB \times ROP}{480 \times N} \right) \dots\dots VII$$

Substituant Es en termes d'efficacité et couple mécaniques en fonction du WOB et résolvant l'équation (1) pour ROP, le taux de pénétration peut être calculé avec l'équation (5), comme suit :

$$ROP = (13.33 \times \mu \times N) / \left( DB \times \frac{CCS}{EFF_m \times WOB} - \frac{1}{AB} \right) \dots\dots IX$$

En étudiant la théorie de Pressier sur l'énergie spécifique et le travail, il a été conclu que le coefficient de frottement de glissement  $\mu$ , le rendement mécanique, le WOB et le RPM pouvaient être raisonnablement définis pour chaque type d'outil en fonction de la dureté apparente de la roche au niveau de l'outil. Dureté de la roche au niveau de l'outil. Les chercheurs ont entamé des travaux de laboratoire pour confirmer et mesurer ces relations. Les chercheurs ont entamé des travaux de laboratoire afin de confirmer et de mesurer ces relations. La recherche d'une solution bornée raisonnablement précise pour la dureté apparente de la roche à

l'outil a été entreprise par les chercheurs. pour la dureté apparente de la roche au niveau de l'outil a également été initiée. La recherche d'une solution limitée raisonnablement précise pour la dureté apparente de la roche à l'outil a également été lancée [20].

### 5. Conclusion :

L'application de méthodes d'optimisation permet de résoudre les problèmes scientifiques posés et d'améliorer les paramètres étudiés. Dans ce chapitre, nous aborderons l'une des méthodes les plus modernes pour améliorer les paramètres de forage. Les méthodes de conception d'expériences (DOE) sont utilisées pour la conception expérimentale des problèmes d'étude. Ces méthodes ont fait l'objet d'un développement considérable de la part des scientifiques et des chercheurs spécialisés dans le forage, car elles sont allées au-delà des méthodes conventionnelles pour répondre aux exigences d'amélioration du forage, de réduction du nombre d'expériences et, par conséquent, de réduction des coûts de forage.

Application de la  
méthode optimisation  
RSM

### 1. Introduction :

L'objectif principal de la présente étude est d'examiner l'influence des paramètres étudiés sur le taux de pénétration et de développer un modèle mathématique basé sur la méthode de la surface de réponse. Ce chapitre présente et discute les résultats obtenus. L'application de plans d'expériences a permis de minimiser le nombre d'expériences à réaliser, de démontrer l'effet des paramètres étudiés et de déduire les conditions optimales dans le domaine d'étude imposé.

### 2. Modélisation du taux de pénétration (ROP) :

Comme mentionné ci-dessus, l'objectif de cette étude est d'appliquer la méthodologie de la surface de réponse pour modéliser le taux de pénétration, qui est influencé par trois facteurs (le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et la nature de la roche). L'objectif est d'optimiser le taux de pénétration (ROP) qui représente la réponse souhaitée.

#### 2.1. Le taux de pénétration expérimentale :

Les expériences ont été menées conformément à un plan expérimental qui comprenait les paramètres suivants : poids de l'outil (WOB), vitesse de rotation (RPM) et type de roche (RC). Les résultats du taux de pénétration expérimental sont présentés dans le tableau V.1.



Tableau V.1. Le taux de pénétration expérimentale.

Exp	WOB :( kgf)le poids sur l'outil	RPM :( tr/min) La vitesse de rotation	RC :( kg/cm <sup>2</sup> ) La nature deroche	ROP :( mm/s) Le taux de pénétration expérimentale
1	120	118	750	4.04
2	120	152	640	8.04
3	120	118	750	4.04
4	160	118	1550	5.92
5	80	135	1550	0.88
6	80	135	640	3.92
7	160	152	750	7.68
8	120	152	640	8.04
9	160	118	640	7.2
10	160	135	750	6.8
11	80	152	750	4.88
12	120	135	750	4.88
13	80	152	1550	1.12
14	80	118	1550	0.6
15	80	135	750	3.8
16	160	118	640	7.2
17	120	118	750	4.04
18	120	135	750	4.88
19	80	118	640	2.84
20	120	152	1550	2.24

2.2. **Les modèles mathématiques pour (ROP) :**

Le modèle mathématique postulé est un polynôme d'ordre 2, comme l'illustre l'équation. Ce calcul est ensuite exécuté et les valeurs des coefficients sont fournies directement par le logiciel Design Expert® version 13.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 \dots\dots\dots X$$

Où :

y : est le taux de pénétration (réponse).

X : sont les valeurs des paramètres.

a : sont les coefficients.

Les deux modèles mathématiques sont donnés par les deux équations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & -1,99692 + 0.0353892 \times \text{WOB} + 0.0259904 \times \text{RPM} - 0.00157919 \times \text{RC} - 2,19709 \\ & \times 10^{-4} \times \text{WOB} \times \text{RPM} + 7,61975 \times 10^{-6} \times \text{WOB} \times \text{RC} - 2,26298 \times 10^{-5} \times \text{RPM} \times \text{RC} \\ & - 6,19939 \times 10^{-6} \times \text{WOB}^2 + 1,21547 \times 10^{-4} \times \text{RPM}^2 + 1.24352 \times 10^{-6} \times \text{RC}^2 \dots\dots\dots \text{XI} \end{aligned}$$

Ce l'équation permettant de prédire du taux de pénétration à n'importe quelles valeurs des trois paramètres appartenant au domaine d'étude considéré.

2.3. **Validation statistique du modèle :**

L'analyse de la variance (ANOVA) est un outil statistique utilisé dans de nombreux contextes, notamment pour la validation et la comparaison de modèles, ainsi que pour l'analyse de données. Cette méthode utilise des mesures de variance pour évaluer l'importance des facteurs et des modèles. L'avantage de cette analyse est qu'elle permet de tester l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée.

**Tableau V.2.** Analyse de variance de ROP.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	p-value
Model	7.35	9	0.8162	0.0001 significant
A : WOB	1.92	1	1.92	0.0001 significant
B : RPM	0.1773	1	0.1773	0.0001 significant
C : RC	1.90	1	1.90	0.0001 significant
AB	0.1399	1	0.1399	0.0002 significant
AC	0.1390	1	0.1390	0.0002 significant
BC	0.2571	1	0.2571	0.0001 significant
A <sup>2</sup>	0.0004	1	0.0004	0.7700
B <sup>2</sup>	0.0043	1	0.0043	0.3358
C <sup>2</sup>	0.0416	1	0.0416	0.0105 significant
Total	7.39	19		
CV (%)	3.14			
R <sup>2</sup>	0.9998			

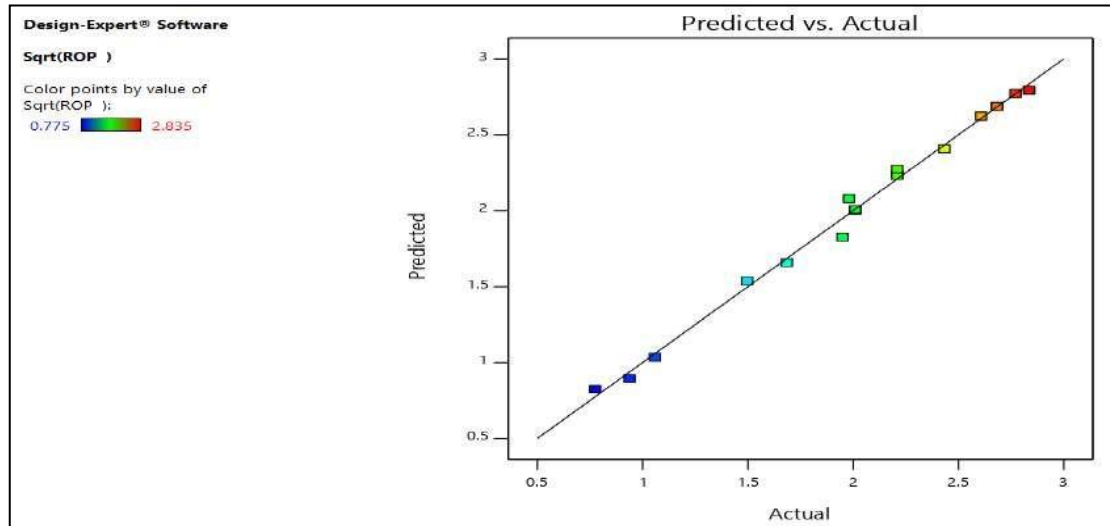
Les résultats affichés dans le tableau de l'analyse de la variance indiquent que le modèle est significatif puisque la probabilité de la signification du risque (p-value) est inférieure à 0,05, donc on peut dire que le modèle est bien ajusté. Par conséquent, le modèle peut être utilisé pour naviguer dans tout l'espace du domaine expérimentale.

L'analyse de la variance indique dans tableau (V.2) aussi que les termes du modèle A et B et C, AB, AC, BC, C<sup>2</sup> sont des termes significatifs (p-value<0,05) sont des termes significatifs.

Mais, le reste des termes sont statistiquement insignifiants dans tableau (V.2) B<sup>2</sup> et A<sup>2</sup>.

Un coefficient de variation (CV) dans tableau (V.2) CV= 3.14% indique un degré de précision très élevé entre les valeurs expérimentales et prédites. En revanche, pour un bon ajustement d'un modèle, la valeur R<sup>2</sup> devrait être un minimum de 0,80.

La courbe représentative des valeurs des taux de pénétration prévus en fonction Des taux de pénétration expérimentale est montrée sur la figure (V.1), où on constate d'après le graphe que le nuage des points n'est pas loin de la droite d'équation ( $y=x$ ), Ce qui indique que le modèle a une bonne qualité descriptive.

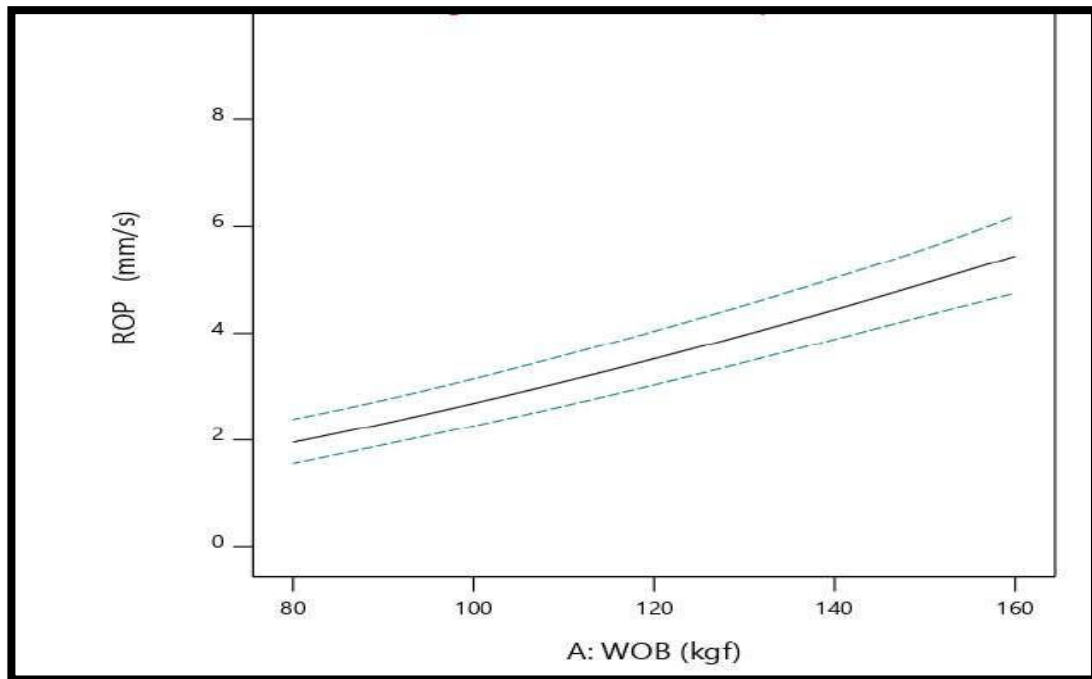


**Figure V.1.** Représentation du taux de pénétration théorique en fonction de celui expérimental.

### 3. Optimisation des paramètres :

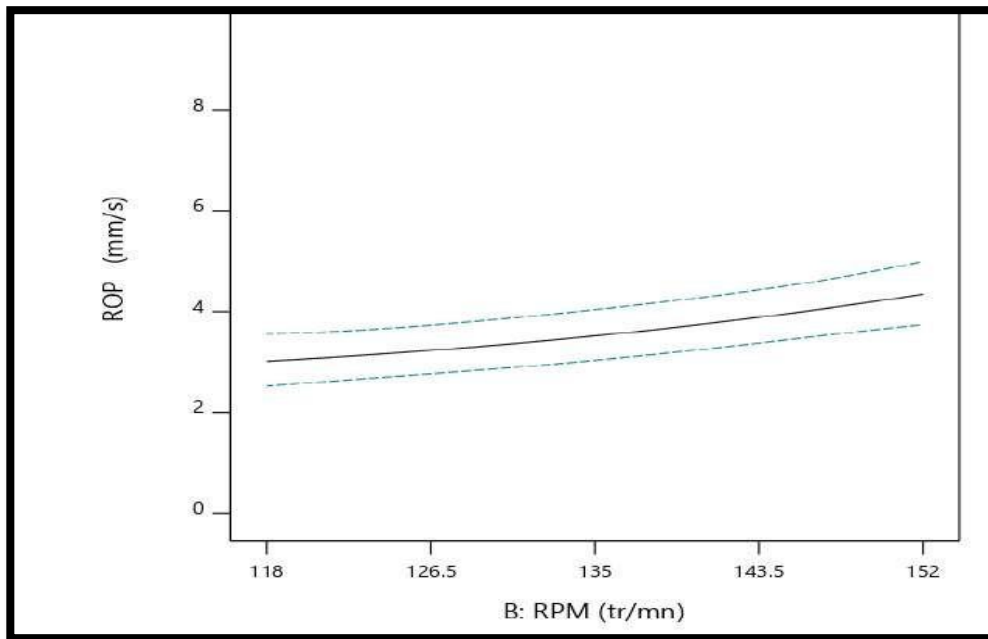
L'objectif de cette étude est d'améliorer le taux de pénétration en optimisant les paramètres de fonctionnement qui affectent le taux de pénétration. En réalisant la conception expérimentale de cet outil de forage, nous avons enregistré la vitesse de pénétration maximale avec une valeur de 8,04 mm/s. Par conséquent, l'objectif sera de déterminer les paramètres de fonctionnement optimaux qui permettront d'obtenir une vitesse de pénétration maximale supérieure à la vitesse expérimentale. En d'autres termes, nous rechercherons les conditions de fonctionnement optimales qui permettront d'obtenir la valeur maximale réalisable.

Les figures suivantes montrent l'effet de différents facteurs sur le taux de pénétration :



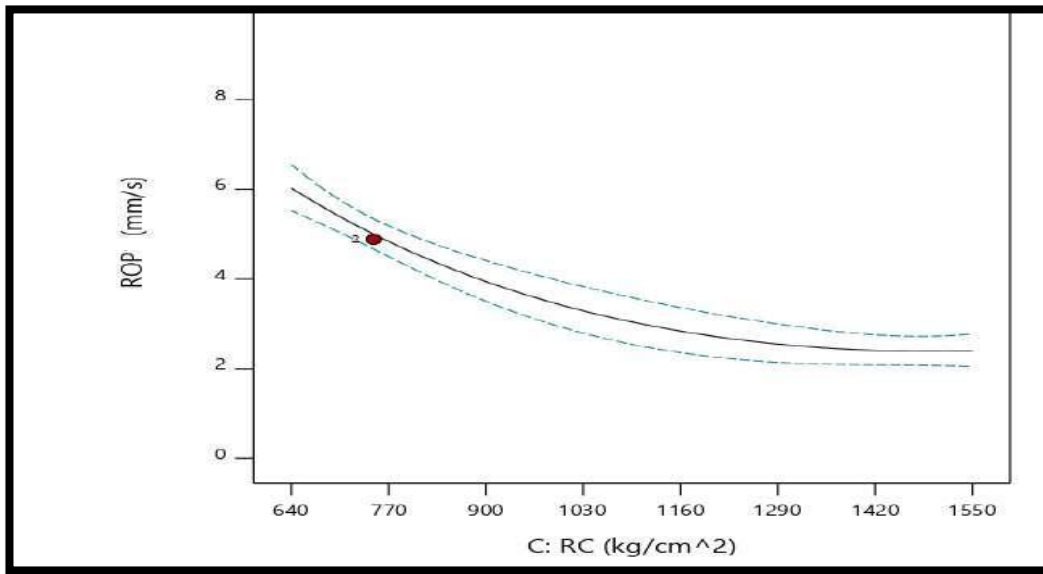
Figures V.2. Variation ROP en fonction de WOB.

On note que l'augmentation de **ROP** avec l'augmentation de **WOB**.



Figures V.3. Variation ROP en fonction de RPM.

On observe une augmentation de la **ROP** avec un **RPM** faiblement augmenté.



Figures V.4. Variation ROP en fonction de RC.

Nous observons une diminution de la **ROP** avec l'augmentation du **RC**.

### 3.1. Surfaces de réponses :

L'influence des paramètres étudiés sur le taux de pénétration peut être illustrée graphiquement par la représentation des surfaces de réponse dans un espace à trois dimensions (3D), ces surfaces permettent de montrer la variation du le taux d'avènement en fonction de deux paramètres tout en maintenant le troisième constant, l'effet des interactions mutuelles des paramètres sur le ROP qui peut être observé à partir de la nature de la courbure des surfaces de réponse.

#### a) L'Influence de WOB et de RPM (RC constant) :

Dans ce cas les représentations graphiques donnent la variation du taux de pénétration (ROP) en fonction de WOB et de RPM.

La figure (V.5) illustre la variation de ROP en fonction du poids sur l'outil (WOB) et la vitesse de rotation (RPM). D'autre part, pour WOB minimal et la diminution de ROP provoque une pénurie considérable dans ROP.



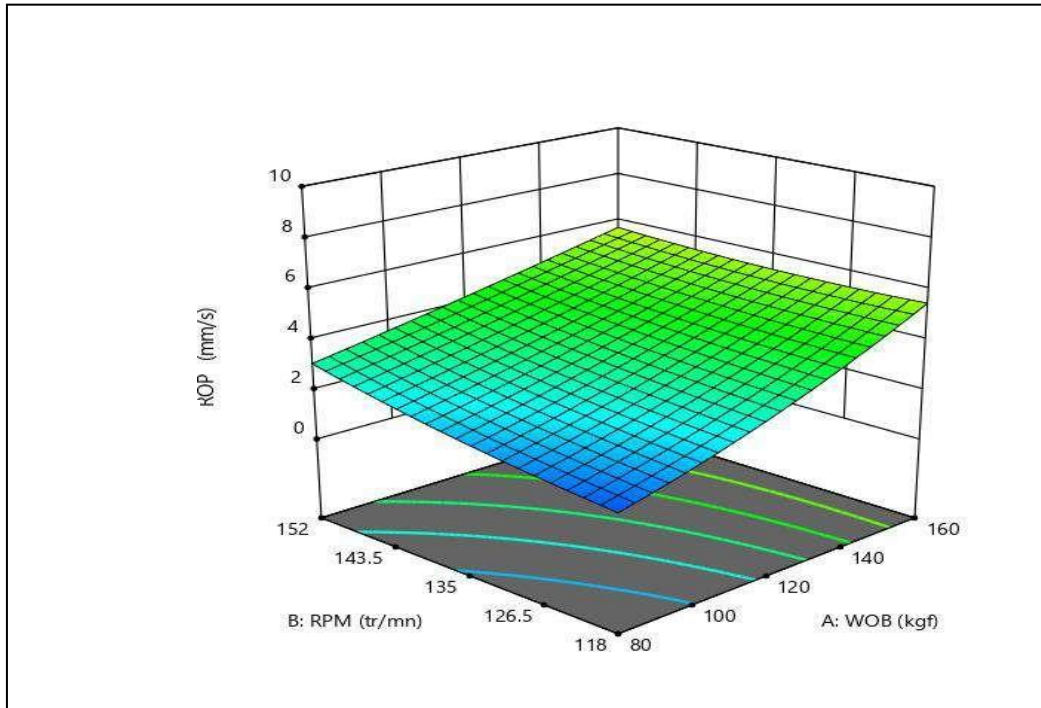


Figure V.5. Variation ROP en fonction de WOB et RPM.

b) L'Influence de WOB et de RC (RPM constant) :

D'après la figure (V.6) une large variation dans RC engendre une faible augmentation de ROP notamment avec le plus petit WOB. Par contre, l'influence de RC est très évidente quel que soit le WOB, dont une petite diminution de RC une forte augmentation de ROP.

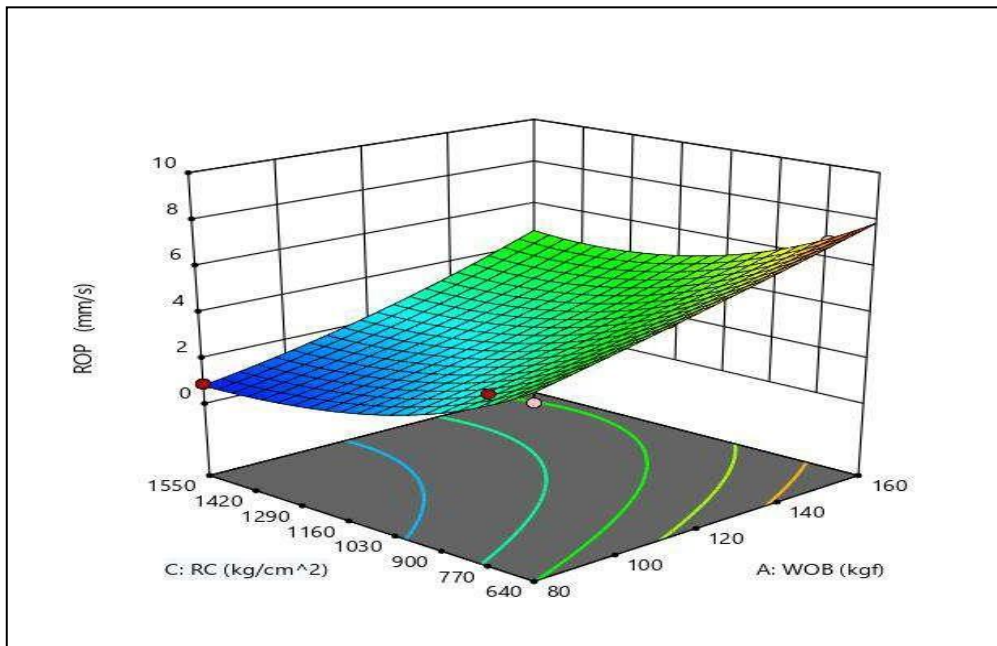


Figure V.6. Variation ROP en fonction de WOB et RC.

D'après la représentation on remarque que la variation de ROP est proportionnelle à la WOB et inversement proportionnelle au RC, où la valeur la plus grande de ROP est située aux conditions suivantes : (RC =640Kg/cm<sup>2</sup>), (WOB =160 kgf).

### c) L'Influence de WOB et de RC (WOB constant) :

De la même manière nous interprétons les deux surfaces en fonction de vitesse de rotation et la nature de roche à de poids sur l'outil constant.

Dans la figure (V.7), ROP est inversement proportionnelle au RC. Cependant dans ce dernier cas ROP est presque constant en fonction de RPM quel que soit en variant RC.

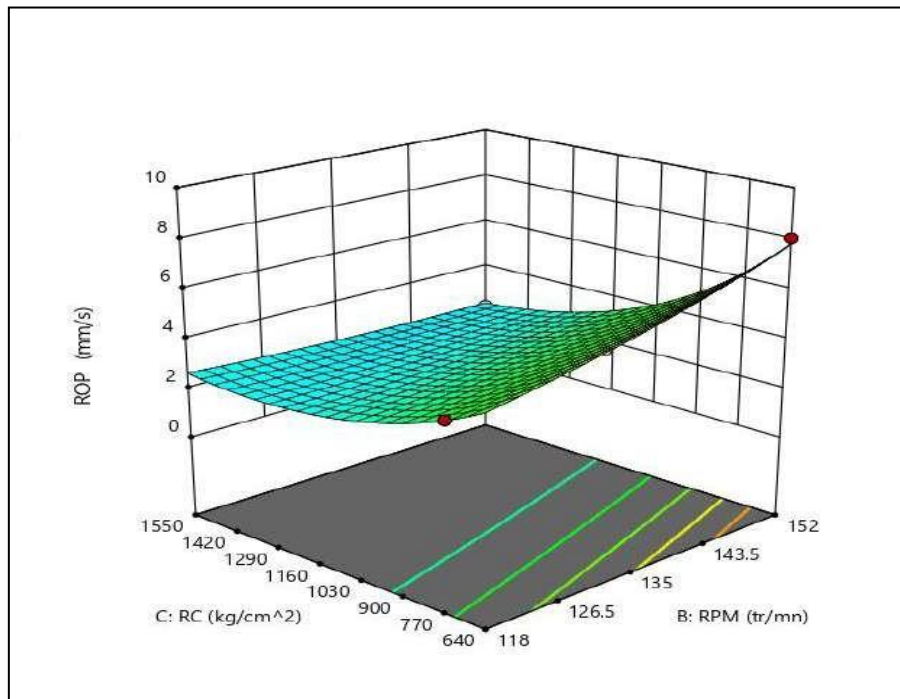


Figure V.7. Variation ROP en fonction de RPM et RC.

D'après la représentation on remarque que la variation de ROP est proportionnelle à la RPM et inversement proportionnelle au RC, où la valeur la plus grande de ROP est située aux conditions suivantes : (RC =640Kg/cm<sup>2</sup>), (RPM =152 tr/min).

### 3.2. L'optimisation d'une réponse (ROP) :

L'objectif de cette étude est de maximiser la portée du ROP, dans le but d'atteindre la valeur maximale accessible. Afin de déterminer la ROP maximale de plusieurs paramètres, il est nécessaire d'identifier tout point où les dérivées partielles sont nulles.

Si nous définissons la ROP comme la réponse prédite (y), et la WOB (X1), le RPM (X2) et le RC (X3) comme les facteurs, nous obtenons l'équation suivante :

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} (X_1, X_2, X_3) = 0, \frac{\partial y}{\partial x_2} (X_1, X_2, X_3) = 0, \frac{\partial y}{\partial x_3} (X_1, X_2, X_3) = 0$$

Les solutions de ce système sont les valeurs optimales qui conduisent à maximiser ROP. Les résultats de la résolution des équations par le logiciel Design-Expert 13.

WOB = 120 kgf.

RPM = 152 tr/min.

RC = 640 kg/cm<sup>2</sup>.

ROP = 8.4 mm/s.

#### 4. Conclusion :

L'analyse des données montre que les différents paramètres ont un impact remarquable sur le taux d'avancement de forage.

Après l'étude de l'influence des paramètres sur la ROP, selon la méthodologie RSM, on constate que la meilleure valeur du taux de pénétration. On peut interpréter ces résultats par l'augmentation de la surface arrachée de roche. L'application des surfaces de réponse a permis d'avoir un maximum d'information sur l'effet des paramètres opératoires avec le minimum des expériences.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

### Conclusion GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude est d'optimiser le taux de pénétration et d'analyser son impact sur le taux d'avènement, sur la base d'un modèle mathématique.

Le travail est divisé en deux sections. La première section de l'étude concerne l'appareil de forage et la détermination des paramètres de forage travail décrit les méthodes d'optimisation des paramètres de forage. La deuxième partie de l'étude concerne l'application de la méthode d'optimisation choisie (RSM) afin d'atteindre les objectifs suivants :

- ✚ Configuration des données statistiques.
- ✚ Développer un modèle mathématique permettant de déterminer l'effet de chaque facteur sur les valeurs du taux optimal prédit (POR) et déterminer les valeurs optimales pour atteindre le taux d'avancement optimal.

Les résultats démontrent que les différents paramètres de l'étude (WOB, RPM,  $R_c$ ,  $\beta$ ) exercent une influence sur le comportement du forage.

L'application de la méthode RSM valide le modèle développé comme un bon ajustement, et montre une forte corrélation entre les données prédites et expérimentales, conduisant à une prédiction précise du ROP.

# Bibliographie



## Bibliographie

---

- [1] Rapport expertise DMT consulting GmbH (étude de faisabilité bancaire) contrat N°14/SOMIPHOS/DMT Consulting GmbH/2013 date de distribution 19 Septembre 2017.
- [2] BRGM (1993) : Étude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique. Auteur ; BRIAN J.P. avec la collaboration de PH. CORTIAL.
- [3] CERAD : Rapport géologique des travaux de prospection et d'évaluation du gisement de phosphate de Bled El Hadba, Campagne 1998/1999.
- [4] EREM (1987) : Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates de la région de Bir El Ater, 1985-1987.
- [5] M. Pillet. « Les plans d. expériences par la méthode Taguchi ». Les Editions d'organisation. Paris, 1997.
- [6] Moreau .M ET Mathu A « statistique appliquée à l'expérimentation » ed eyrole Paris, 1979.
- [7] Choquin. « Paramètres et contrôle de forage ».
- [8] B. A Kennedy. «Surface mining». 2nd edition. Port city press. Baltimore Maryland USA, 1990.
- [9] Jean-Paul Nguyen. « Le Forage, techniques d'exploitation pétrolière Institut français du pétrole », 1993.
- [10] Trevor M. Hunt.T A Hunt, N. Vaughan. «The hydraulic Handbook», 1996.
- [11] William C. Lyons, Ph.D., P.E., Gary J Plisga. «Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering». BS 2nd édition, 2005.
- [12] Atlas-copco Roc L8. Fiche technique.
- [13] Atlas-copco roc L8 ref. «Operator's instructions» 2005.
- [14] Atlas-copco ref. «Drill bits », 2005.
- [15] Carlos Lopez Jimeno, Emilio Lopez Jimeno, Francisco Javier Ayala Carcedo. «Drilling and Blasting of Rocks», 1995.
- [16] B. A Kennedy. «Surface mining». 2nd edition. Port city press. Baltimore Maryland USA, 1990.
- [17] LINDER R., Les plans d'expériences un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris 2005.
- [18] BOUDISSA F., Influence des radiations micro-onde sur l'extraction de l'huile de grignon d'olive imprégné de margine. Thèse de magister : chimie de l'environnement. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.2011.

## Bibliographie

---

- [19] Jacques GOUPY, Tutoriel LES PLANS D'EXPERIENCES, Revue MODULAD, Numéro 34, 2006.
- [20] Myers R.H. Montgomery D.C. Response surface methodology, 2nd ed. Wiley & Sons (éditeurs), New York, NY, USA, (2002).
- [21] B. Abderrahmane, M. Faissal, Optimisation des paramètres mécaniques de forage pétrolier. Cas d'un outil PDC, Mémoire Master, UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA Faculté des sciences appliquées, 2020.
- [22] D. Brahim, A. SIDI, B. Kheireddine, OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUES DU FORAGE HORIZONTAL APPLICATION SUR LES Puits (MDZ491-MDZ492-MDZ501) , Mémoire MASTER , UNIVERSIT E KASDI MERBAH OUARGLA ,Faculté des sciences et de la technologie et sciences de la matière , 2013.
- [23] Edward, C (1976) ; Le forage du puits, édition EDI.
- [24] Harouna Issaka, A (2014). Sondage jour ; Abdou Moumouni de Niamey ; Niger.
- [25] Rabe Salissou garba ; M (2013) ; prévention de risque sur le lieu de travail ; mémoire de stage de l'EMIG.