



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tébessa
Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie des Mines



OPTIMISATION DU RÉGIME DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES DE FORAGE DANS LE CAS DE LA MINE DE DJEBEL-EL-ONK

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère
Spécialité Electromécanique Minière

Par
Rais Khaled

Dirigé par :

Dr. KARA Mohammed M C (A) à l'Université de Tébessa

Devant le jury

Président :

Pr. BOUNOUALA Mohamed Prof à l'Université de Annaba

Examineurs :

Dr. BOUKELLOUL Med Laid M C (A) à l'Université de Annaba

Dr. BOUZENADA Laid M C (A) à l'Université de Tébessa

Dr. LOUAFI. Messaoud M C (A) à l'Université de Tébessa

Janvier 2013

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى الروح الطاهرة التي طالما حلمت وقمت على الله ودعته أن يسر لي مواصلة رسالتي إلى والدي العزيز/ محمد رايس رحمه الله

إلى الروح الطاهرة التي احتضنتني وغمرتني بحب عظيم طوال عمري إلى أبي العزيز/ عبد العزيز الشنديدي رحمه الله

إلى أستاذاي ومعلمي إلى البقية الباقية من الحب والإخلاص والجزم إلى أبي العزيز الحاج /منصور الشنديدي أطل الله عمره

إلى صديق عمري وأستاذاي/ الدكتور العربي قدري

إلى أمي الغالية أطل الله عمرها وبارك في صحتها

إلى كل الاحبه في مصر والجزائر

إلى كل من آزرني بالدعاء

خالد رايس

Remerciements

Je remercie DIEU tout puissant de m'avoir donné la force et le courage d'achever ce travail.

D'abord je veux exprimer ma gratitude aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer à la soutenance de ce mémoire.

Je tiens à remercier le professeur BOUNOUALA Med, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Dr LOUAFI .M; Dr BOUKELLOUL MedL, Dr BOUZENADA L qui ont rempli la lourde charge et délicate de rapporteur de cette étude.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude au docteur KARA Mohamed d'avoir diriger ce travail et qui m'a toujours montré la voie la plus simple pour arriver à comprendre des phénomènes complexes.

Je tiens à remercier également l'ensemble des enseignants de la faculté de sciences et technologie et en particulier les enseignants du département de génie des mines.

Khaled Rais

ملخص

تمثل هذه الرسالة تحليلا إحصائيا للعوامل المختلفة لعملية الحفر المنجمى بمنجم الفوسفات بجبل العنق تبسه الجزائر .

كما وجهت الدراسات التجريبية نحو تغيير كل من ضغط الدوران وضغط الدفع على أداة الحفر في مختلف التكوينات الجيولوجية.

كما تم حكم عملية الضبط الخاصة بعوامل الحفر بطريقة مخطط التجارب .

كما تم تحديد مستوى أهمية العوامل الخاصة بالحفر باستخدام تحليل التباين كي نحصل على نموذج رياضي ممثل للظروف الخاصة بجبل العنق تبسة.

و هو أداة رياضية هامة لتشغيل المهندسين للتنبؤ بمعدل الاختراق وضبطه وفقا لاحتياجات العمل وتحقيق أقصى قدر من المرودية من ناحية آلة الحفر وكذلك للحد من عملية الاستهلاك السريع لأداة الحفر.

Résumé

Cette thèse présente une analyse statistique des paramètres du procédé de forage dans la mine de phosphate de Djebel-Onk Tébessa Algérie . Les études expérimentales ont été menées en vertu de varier la pression de rotation et de la pression de pousse sur l'outil de forage dans les différentes formations géologiques . Le réglage des paramètres de forage à été déterminé en utilisant la méthode de plans d'expériences. Le niveau d'importance des paramètres de forage est déterminé en utilisant l'analyse de la variance. On obtient un modèle mathématique représentatif pour les conditions de Djebel-Onk .

Ce dernier est un outil mathématique important pour les ingénieurs d'exploitation pour prédire le taux de pénétration et le régler selon les besoins du travail ainsi pour maximiser le rendement de la machine de forage d'une part et d'outre de minimiser l'usure de l'outil de forage par l'emploi d'un régime convenable dans les couches abrasives.

Summary

This submission presents a statistical analysis of process parameters of drilling in phosphate mine Djebel-Onk Tébessa Algeria. Experimental studies were conducted under varying rotation pressure and pushes pressure on the bit of drilling in different geological formations . Settings drilling parameters were determined by using the method of design of experiments. The level of importance of drilling parameters are determined using analysis of variance. We obtain a mathematical model for representative conditions of the phosphate mine of Djebel-Onk .

This is a mathematical tool important for operating engineers to predict the penetration rate and adjust according to the needs of work and to maximize the efficiency of the drilling machine in one side and also to minimize wear in the abrasive layer.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	xiv
1 LE FORAGE DANS LES MINES	1
1.1 Introduction	1
1.2 Principe du forage minier	2
1.3 Les modes de forage	3
1.3.1 Le mode de forage percutant	3
1.3.2 Le mode de forage rotatif	4
1.3.3 Le mode de forage roto-percutant	5
1.4 Les outils de forages	7
1.4.1 Classification des outils de forages	7
1.4.2 Outils PDC (Polycristalline Diamond Compact)	8
1.4.2.1 Les outils TSP(Thermally Stable Polycrystalline)	9
1.4.2.2 Les outils à molettes	9
1.4.2.3 Les outils DTH (down hole drill bits)	10
2 LE FORAGE DANS LES CONDITIONS DE LA MINE DE DJEBEL-ONK	12
2.1 Introduction	12
2.2 Cadre géologique de la mine de Djebel-Onk	12
2.2.1 La stratigraphie	12
2.3 Cadre géotechnique du massif de Djebel-Onk.	13
2.4 Essai Franklin (Résistance à la compression entre pointes)	14
2.5 Description des machines de forages dans les conditions de la mine de Djebel-Onk	15
2.5.1 Description générale de l'engin de forage Roc L8	16
2.5.2 Description technique (Le marteau fond du trou)	17
2.5.3 Châssis de chariot avec châssis de chenilles	18
2.5.4 Système de bras	18
2.5.5 Dépoussiéreur	18
2.5.6 Installation électrique	18
2.5.7 Circuit hydraulique	19
2.5.8 Système pneumatique	21
2.6 Transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique	21
2.6.1 Utilisations de l'énergie hydraulique	21

2.6.2	Système hydraulique	21
2.6.3	Assemblage	22
2.6.4	Principaux composants d'un système hydraulique	22
2.7	composants d'un système hydraulique	22
2.7.1	Groupe hydraulique (nommé aussi centrale hydraulique)	22
2.7.2	La pompe hydraulique	24
2.7.2.1	Rôle de la pompe dans un système hydraulique	24
2.7.2.2	Classification des pompes	24
2.7.2.3	Les pompes volumétriques	25
2.7.2.4	Les pompes à engrenages	25
2.7.3	Les moteurs hydrauliques	26
2.8	Description d'opération de forage	27
3	MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES	28
3.1	Historique sur la méthode des plans d'expériences	28
3.2	Introduction	28
3.3	Concepts généraux de la méthode des plans d'expériences	29
3.3.1	Définitions des variables	29
3.3.1.1	Réponses	29
3.3.1.2	Facteurs	30
3.3.1.3	Domaine d'étude (DE)	30
3.3.1.4	Nature du problème	30
3.3.2	Contraintes	30
3.3.3	Domaine d'étude possible (DEP)	31
3.4	Expériences	31
3.4.1	Expériences réelles	31
3.4.2	Expériences virtuelles	32
3.5	Modélisation par la méthode des plans d'expériences.	32
3.5.1	Modèles du premier degré (sans interaction)	33
3.5.2	Modèles avec toutes les interactions	34
3.6	Outils d'analyse statistique des données	35
3.6.1	Analyse de la variance	35
3.6.2	Variance résiduelle	37
3.6.3	Test de Fisher-Snedecor	38

4	OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE FORAGE DANS LES CONDITIONS DE MINE DE DJEBEL ONK	40
4.1	Introduction	40
4.2	Choix des facteurs et du domaine expérimental	41
4.3	Les paramètres de la machine et du terrain a traversé	41
4.3.1	Domaine d'étude possible (DEP)	42
4.4	Détermination des variables	42
4.5	les essais expérimentaux	42
4.5.1	Détermination des propriétés mécaniques des roches	42
4.5.2	Essais Sur La Machine De Forage ATLAS-COPCO ROC L8	43
4.5.3	Poussée variable vitesse constante	47
4.5.4	Vitesses de rotation variable pression constante	48
4.6	corrélation entre les variables	48
4.7	Corrélation des variable continues dans les conditions de la mine de Djebel-Onk	58
4.8	Optimisation des paramètres de forage par la méthode des plans d'expériences .	58
4.8.1	Détermination des facteurs	58
4.8.2	Détermination de la fonction objective	59
4.8.3	Analyse du modèle obtenu :	60
4.8.4	Analyse statistique de la fonction objective	61
4.9	Test de validité du model mathématique	63
4.9.1	Teste de Student.	63
4.9.2	Calcul de la variance répétitive	63
4.9.3	Teste de Fischer	65
4.9.4	Calcul de la variance résiduelle	65
4.9.5	Normalisations des variables	66
4.9.6	simplification du modèle physique :	67
4.9.7	La variation du taux de pénétration selon la pression de rotation X_1 . . .	69
4.9.8	La variation du taux de pénétration selon la pression de poussée X_2 . . .	70
4.9.9	La variation du taux de pénétration selon la resistance à la compression X_3 :	71
4.10	Vérification de la représentativité du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk :	72
4.11	L'application du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk	72
4.11.1	Régime optimale de fonctionnement de machine de forage pour la couche du calcaire phosphaté siliceux dont la résistance à la compression est de 60 MPa	73
4.11.2	Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire gypseux dont la résistance à la compression est de 10 MPa . .	75

4.11.3 Régime de fonctionnement de machine de forage dans la couche du phosphate dont la résistance à la compression est de 30 MPa	76
4.11.4 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire phosphate blanc dont la résistance à la compression est 20 MPa	77
4.11.5 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire phosphate noir dont la résistance à la compression est de 17 MPa	78
4.12 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans Les condition de la mine de Djebel-Onk	79
4.13 Comparaison des résultats obtenus avec l'état actuel dans la mine de Djebel-Onk.	80
4.13.1 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR1)	81
4.13.2 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR2)	83
4.13.3 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR3)	84
4.13.4 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR4)	85
4.14 Conclusion	86
CONCLUSION GÉNÉRALE	87
Bibliographie	89

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Les recommandations des modes de forage pour les différentes résistances des roches	7
2.1	la résistance a la compression pour différentes formations géologiques	15
4.1	résistance à la compression des différentes roches	43
4.2	Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les calcaires gypseux de résistance 10 MPa	44
4.3	Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Calcaires phosphatés blanc de résistance 20 MPa	44
4.4	Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Calcaires phosphatés noir de résistance 17 MPa	45
4.5	Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Phosphates de résistance 30 MPa	45
4.6	Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les P Calcaire phosphaté siliceux de résistance 60 MPa	46
4.7	variation de la poussée axiale sur l'outil de forage	47
4.8	variation de la vitesse de rotation de l'outil de forage	48
4.9	Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc	49
4.10	Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire gypseux	50
4.11	Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire phosphaté siliceux	51
4.12	Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté noire	52
4.13	Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de phosphate	53
4.14	Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de phosphate	54
4.15	Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc.	55
4.16	Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté siliceux	56
4.17	Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire gypseux	57

4.18	corrélation pour les différentes couches entre pression de rotation en bar et Taux de pénétration (m/min)	58
4.19	corrélation pour les différents couches entre pression de poussée en bar et Taux de pénétration (m/min)	58
4.20	les facteurs	59
4.21	matrice de planification	59
4.22	valeurs des variables statistiques traitées dans les condition de la mine de Djebel-Onk	62
4.23	teste des coefficients du model par la condition de Student.	64
4.24	Transfert des variables codées (modèle mathématique) en variables physiques(modèle physique)	66
4.25	vérification du modèle	72
4.26	récapitulatif des résultats pour les différentes formations rocheuses	80
4.27	Comparaison entre régime(PR1) et régime actuel(PR5)	81
4.28	Comparaison entre régime (PR2) et régime actuel (PR5)	83
4.29	Comparaison entre régime (PR3) et régime actuel(PR5)	84
4.30	Comparaison entre régime (PR4) et régime actue (PR5)l	85

TABLE DES FIGURES

1.1	schéma explicative du principe de forage des trous de mines	2
1.2	Schéma représentatif du forage rotatif	5
1.3	Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant	6
1.4	les phases du forage roto-percutant	7
1.5	Les différents outils PDC	8
1.6	Les différents outils TSP	9
1.7	les outils à molettes	10
1.8	les outils à DTH	10
2.1	stratigraphie visuelle (Djebel-Onk)	14
2.2	sondeuse atlas -copco Roc L8	16
2.3	les éléments de forage de la sondeuse ROC L8	17
2.4	Fonctions du système hydraulique	20
2.5	Principaux composants d'un système hydraulique	22
2.6	Principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique	23
2.7	schématique des systèmes hydrauliques	23
2.8	le cycle de transformation de l'énergie hydraulique	24
2.9	pompe a engrenage	25
2.10	Principaux de transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique	26
2.11	moteur hydraulique de rotation au sommet ROC L 8	26
4.1	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté blanc.	49
4.2	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire gypseux	50
4.3	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté siliceux	51
4.4	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté noire	52
4.5	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de phosphate.	53
4.6	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de phosphate.	54
4.7	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire phosphate blanc.	55
4.8	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire phosphaté siliceux	56

4.9 la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire gypseux	57
4.10 courbes de variation du taux de pénétration selon la pression de rotation X1 . .	69
4.11 courbes de variation du taux de pénétration selon la pression de poussée X2 . .	70
4.12 courbes de variation du taux de pénétration selon la résistance à la compression X3	71
4.13 la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire phosphate sillicieux	73
4.14 la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire gypseux	75
4.15 la variation du taux de pénétration dans la couche du phosphate	76
4.16 la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire phosphate blanc .	77
4.17 la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire phosphate noir . .	78
4.18 Histogramme de Comparaison entre régime(PR1) et régime actuel(PR5)	82
4.19 Histogramme de Comparaison entre régime(PR2) et régime actuel(PR5)	83
4.20 Histogramme de Comparaison entre régime(PR3) et régime actuel(PR5)	84
4.21 Histogramme de Comparaison entre régime(PR4) et régime actuel(PR5)	85

Introduction générale

L'optimisation des paramètres de forages dans les mines est la préoccupation majeure de l'ingénieur exploitant. Le coût important de la technique de forage dans les mines vu la diversité des formations rocheuses rencontrées ou cours de l'exploitation, rend le paramétrage des machines de forage pour chaque type de formation une tâche ardue pour les ingénieurs sur terrain .a cette fin une première initiative d'optimisation des paramètres de forage dans les conditions de la mine de Djebel-Onk fera l'objet principal de ce mémoire.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres qui traitent l'optimisation du régime de fonctionnement des machines de forage.

Le premier chapitre traite les différents principes de forage dans les mines, une étude bibliographique importante sur les différents modes de forage ainsi que les différents types d'outils utilisés dans le domaine minier.

Le deuxième chapitre traite le cas d'étude , qui est la mine de Djebel-Onk ,nous avons essayé de mettre en relief l'état actuel des techniques de forage utilisées dans les conditions de la mine ; la sondeuse (ATLAS-COPCO ROC L8)fera l'objet d'étude expérimentale dans notre cas d'étude.

Le troisième chapitre est consacré à une étude bibliographique détaillée sur la méthode des plans d'expériences qui traitent le problème d'optimisation dans les différents secteurs.

L'objectif est de déterminer la fonction objective caractérisant la variation des différents paramètres d'étude .a cette fin une optimisation sera possible ou pas du cas d'étude.

L'optimisation du régime de fonctionnement des machines de forage dans les conditions de la mine de Djebel-Onk fera l'objet du quatrième chapitre.

Problématique et but du travail

- Dans la mine de DJEBEL-ONK les formations rocheuses stratifiées ont des propriétés physico-mécaniques différentes ce qui pose un problème pour le foreur.
- comment faut-il réagir lorsque l’outil de forage passe d’une couche friable comme le calcaire gypseux vers une couche dure comme le calcaire phosphate siliceux ?.
- Est ce qu’il doit garder le même régime de fonctionnement de la machine de forage ou non et de quelle manière doit il changer ce régime ?.
- Le régime applique actuellement dans la mine de DJEBEL-ONK consiste à garder la pression de rotation a (50 bar) et la pression de poussée a (50 bar) pour les différentes formations rocheuses.
- Celà impose l’idée de libérer ce blocage dans le régime de fonctionnement de la machine de forage.
- Avec une grande compréhension et collaboration toutes l’équipe de forage dans l’entreprise de phosphate de DJEBEL-ONK nous a donner toutes les facilités pour effectuer des essais sur site nécessaires pour réaléser ce travail.

CHAPITRE 1

LE FORAGE DANS LES MINES

1.1 Introduction

Dans le domaine minier plusieurs processus sont utilisés pour l'extraction des roches du massif. Un des processus les plus importants dans cette chaîne est l'abattage de la masse rocheuse ; à cette fin la première étape est de creuser des trous de mines pour être remplis d'explosifs [47,55,56]. Cette tâche est assurée principalement par les machines de forage. Une distribution géométrique précise des trous de mine assurée par un schéma de tir préconçu ; afin d'assurer une bonne construction de la mine [40,41].

Le forage des trous nous donne une mise à jour sur les données géologiques du site minier au cours du creusement .

Les paramètres de construction des trous de mines se présentent comme suit :

Les paramètres géométriques :

- La profondeur du trou, limitée par la hauteur du gradin (H) en mètres.
- L'inclinaison du trou, pour assurer un angle du bord stable.
- Le diamètre du trou, pour assurer un remplissage adéquat d'explosifs.

Les paramètres des roches et de la machine :

Pour la roche :

- La résistance à la compression des roches.
- La dureté.
- L'abrasivité.
- L'humidité.

Pour la machine :

- Poussée sur l'outil exprimé en bar pour assurer l'avancement de l'outil de forage.
- Le couple de rotation exprimé en bar pour assurer la rotation de l'outil de forage.
- La quantité d'air comprimé pour assurer le nettoyage du trou et la percussion de l'outil de forage

Les paramètres de la roche sont dits non contrôlables ; à cause de leurs variétés sur le terrain. Par contre les paramètres de la machine sont des paramètres contrôlables ; nous allons alors nous intéresser dans le cadre de ce mémoire à l'optimisation des paramètres influençant sur le rendement des machines de forage dans les mines.

1.2 Principe du forage minier

Le principe fondamental du forage dans les mines consiste à creuser des trous de diamètre et de longueurs prédéfinis par le schéma de tir. L'outil est mis en contact directe sur la roche par une pression exercée sur sa tête, un couple de rotation lui est affecté pour assurer la pénétration[12,17,32] ; une fois l'outil pénètre dans la roche des débris remontent en surface sous l'action d'air comprimé afin d'assuré le nettoyage du trou[17].

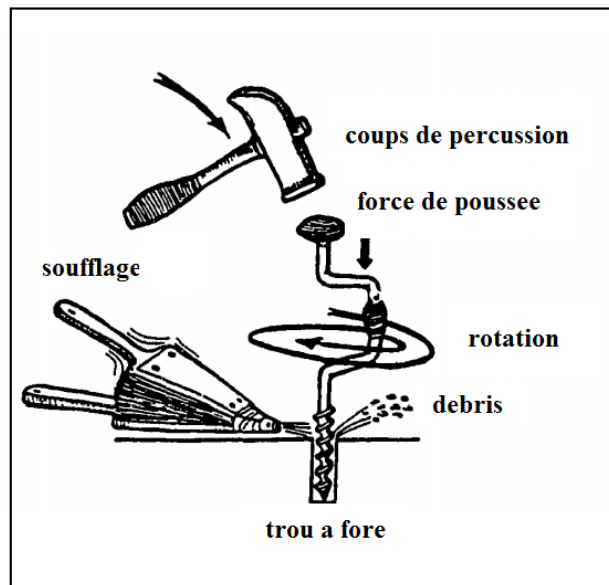


FIG. 1.1 – schéma explicative du principe de forage des trous de mines

Pour améliorer le processus de pénétration de l'outil dans la roche, les concepteurs de machine ont pensés à l'ajout d'une autre force de percussion sur la tête de l'outil. Le mode de forage est ainsi appelé forage roto percutant.

Le choix du mode de forage dépend essentiellement des propriétés mécaniques des roches dont on site principalement (dureté; abrasivité); ainsi que les conditions naturelles du site. D'autre part les dimensions géométrique des trous à forés (diamètre, la profondeur; inclinai-son).un autre créneau est indispensable à cité c'est le coût de main-d'œuvre et des équipements.[12].

1.3 Les modes de forage

Un appareil de Forage appelé " Sonde ou Rig " 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.

1.3.1 Le mode de forage percutant

Ce mode de forage est le plus Ancien, les Chinois, notamment, l'utilisaient depuis des temps très reculés pour la recherche d'eau. il consiste à soulever un outil lourd et à le laisser retomber sur la roche à perforer, ainsi la hauteur de chute et la fréquence des coups varient avec la dureté de la roche. Si le trépan est accroché directement au câble, ou sous une massette ce procédé est dit de Pennsylvanien. S'il se trouve fixé sous un train de tiges, ce procédé est dit Canadien, il est recommandé de monter une coulisse au-dessus de l'outil. Le battage au câble (Pennsylvanien), le mouvement alternatif peut être tout simplement opéré par le treuil sans aucun autre accessoire. En actionnant le levier de l'embrayage, le trépan est soulevé, puis en lâchant brusquement ce levier, l'outil redescend en chute libre au fond du trou[32].

Sur les machines plus importantes, le mouvement alternatif est produit par un balancier actionné 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 provoquent une rotation du trépan dont la partie coupante agit ainsi sur toute la section du trou. Après un certain avancement, il faut remonter le trépan et descendre une curette ou cuillère ou soupape, pour extraire les sédiments broyés.

- Dans l'appareillage le plus simple, la destruction de la roche et l'avancement du trou qui en résulte sont obtenus à l'aide d'un trépan suspendu à un câble, auquel un balancier ou un treuil à chute libre imprime un mouvement alternatif de haut en bas. C'est « le sondage au câble » ou « pennsylvanien »[32,12].
- Le trou est nettoyé périodiquement au moyen d'une soupape qui remonte les débris de roche, tandis que, dans les terrains non cohérents et éboulés, un tubage poussé à l'avancement (havage) assure la tenue des parois du forage et évite le coincement de l'outil, tout en permettant de connaître les cotes de prélèvement avec une meilleure précision.
- Dans les terrains non cohérents noyés, comme les alluvions sablo-graveleuses, le forage peut être exécuté uniquement à la soupape avec tubage à l'avancement, s'il n'y a pas d'éléments ou de bancs durs importants dans le terrain.
- Une variante du système consiste à effectuer le forage à l'aide d'un trépan-benne ou

hammergrab : celui-ci comporte à sa partie inférieure deux coquilles articulées jouant le rôle de trépan en position ouverte, et assurant la remontée des déblais en position refermée. Ce sont les systèmes Benoto et Casagrande, utilisés pour les forages d'eau et le rabattement de nappe[12].

1.3.2 Le mode de forage rotatif

La pénétration de l'outil s'effectue par abrasion et broyage du terrain, sans chocs, uniquement par rotation.

L'outil est fixé à la base de la ligne de sonde, composée, de bas en haut, des éléments suivants :

Outil : Tricône (rock-bits), trépan à lames (drag-bits),

Masses- tiges (drill-collars).

Train de tiges. (drill- pipes).

Tige carrée (Kelly).

Tête d'injection (swivel).

L'outil reçoit, de la ligne de sonde, le mouvement de rotation et une partie de son poids[61 :64].

Le réglage de ces deux éléments : vitesse de rotation et poids sur l'outil est de première importance[32], ensemble, ils constituent le paramètre de Forage. Le mouvement de rotation est transmis à la ligne de sonde par les moyens suivants :

Table de rotation et tige carrée.

Mandrin avec clavettes coulissantes pour Kelly cylindrique à cannelures.

Manchon agissant directement sur les tiges qui coulisent à l'intérieur et qui peut être rendues solidaires par des vis de blocage.

La tige carrée et la kelly sont creuses et laissent passer la boue de forage[12].

Elles sont suspendues au crochet du palan par la tête d'injection et qui, par un col de cygne, relie hydrauliquement l'intérieur de cette ligne de sonde avec le flexible de circulation et la pompe à boue.

Les pompe à boue doivent assurer un débit compatible avec le rendement optimal du trépan utilisé, le débit de circulation doit assurer une vitesse ascensionnelle minimal dans l'espace annulaire, une pompe à boue est toujours à double effet, elle aspire et refoule dans les deux sens de déplacement du piston, dans un sens le volume de la cylindrée est pleinement utilisé alors que dans l'autre la tige du piston diminue légèrement ce volume[32].

Sous la double action : rotation et pression (poids) que lui imprime la ligne de sonde, l'outil détache du terrain, au fond du trou, les sédiments "Cuttings", qui sont remontés au jour, en circuit continu, par l'action d'un liquide visqueux, la boue refroidit et lubrifie l'outil, la boue de forage, injectée à l'intérieur des tiges par la pompe à boue, traversant l'outil de forage et

remontant à la surface par l'espace annulaire entre la ligne de sonde et le terrain ou la colonne de tubages déjà en place[8..11].

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 cuttings, 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 1.2)[9] :

- Poids sur l'outil (poussée sur l'outil).
- Vitesse de rotation.
- Débit - Pression (air comprimé).[12,32.17]

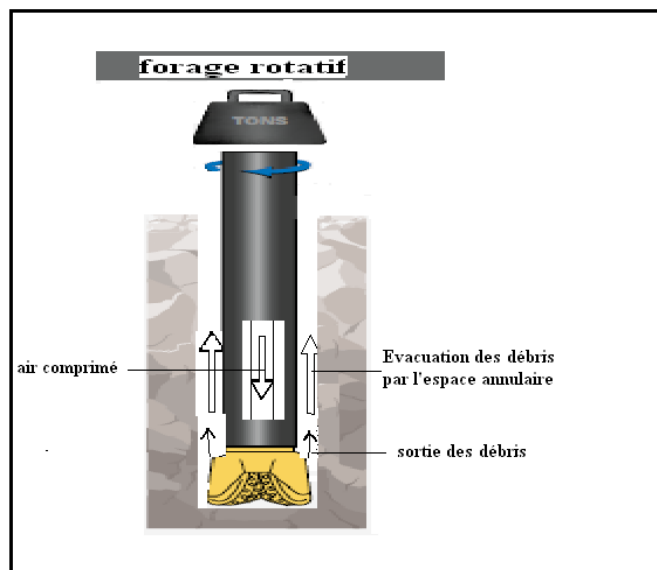


FIG. 1.2 – Schéma représentatif du forage rotatif

1.3.3 Le mode de forage roto-percutant

Ce mode de forage permet une percussion rapide, par un marteau pneumatique placé au "fond du trou", le principe consiste à animer le marteau par l'air provenant d'un compresseur, un mouvement vertical rapide de va et vient frappe la queue de l'outil dont le taillant reste en contact avec la roche au fond du trou[14]. Un marteau pneumatique est fixé en bas d'un train de tiges creuses, et actionne un outil, l'outil est un taillant, rechargé au carbure de tungstène ou taillant à boutons, il est alimenté en air comprimé à travers les tiges et une tête d'injection, l'air

détendu après son passage dans le marteau fond de trou remonte à grande vitesse entraînant les déblais "cuttings" dans l'espace annulaire entre les tiges et le trou. La frappe seule s'opère au fond du trou, la rotation étant transmise en haut du train de tiges. Comme pour le mode rotatif, les débris réduits à l'état de poussière, sortent du trou par l'air comprimé, amené au fond du trou par l'intérieur des tiges et remonté au jour a travers l'espace annulaire. C'est une technique qui donne de bons avancements dans les terrains très durs et stables[8].

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 1.3)[8.12.32]

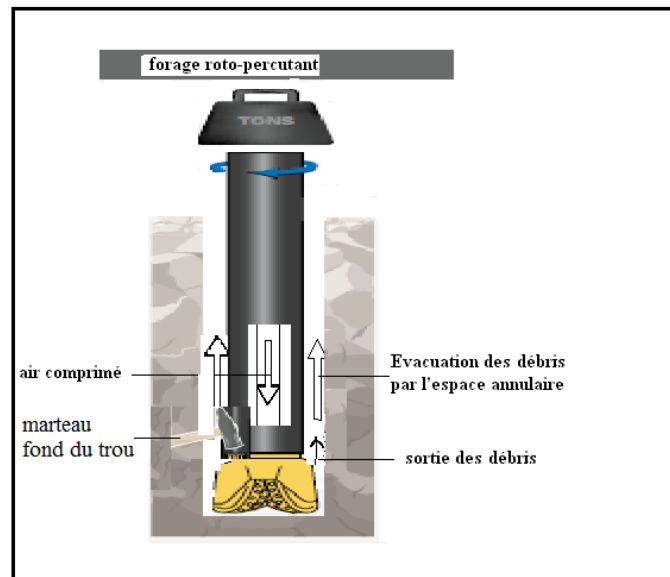


FIG. 1.3 – Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant

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 consolidés (grès, calcaires). Un taillant à boutons en carbure de tungstène fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain foré (figure 1.3)[8.12.16.17]. Le marteau fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé qui est délivré par un compresseur. Le flux d'air permet de remonter les débris (cutting) du terrain.

On distingue 2 phases, la percussion et le soufflage (figure 1.4).

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 du flux d'air s'écoule au travers du marteau sans le faire fonctionner et s'échappe dans l'espace annulaire[16.12.32]

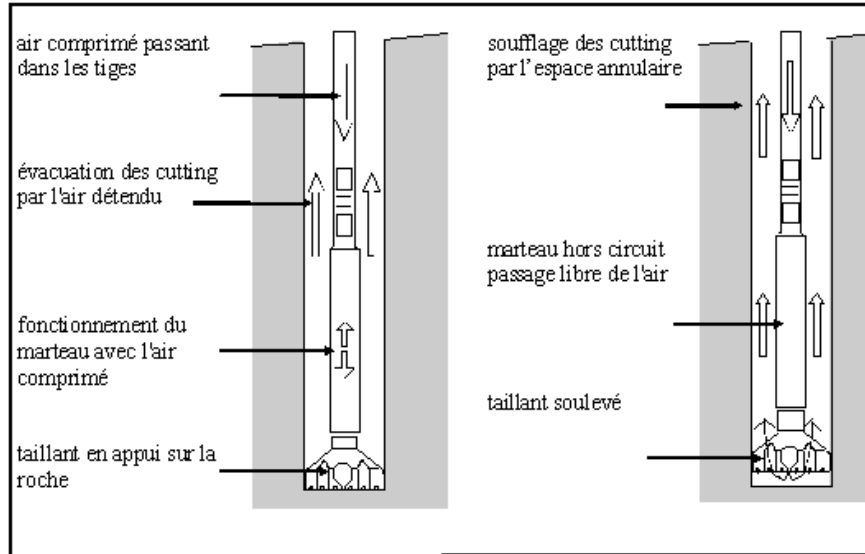


FIG. 1.4 – les phases du forage roto-percutant

Synthèse Le tableau 1 montre l'emploi des différents modes de forage dans les mines selon les propriétés des roches a forées.[12]

TAB. 1.1 – Les recommandations des modes de forage pour les différentes résistances des roches

Mode de forage	Tendre	Moyenne	Dur	Très dur
Rotary- tarière	X			
Rotary-a molettes	X	X		
Rotary-diamant	X	X	X	
Percutant	X	X	X	X

1.4 Les outils de forages

1.4.1 Classification des outils de forages

Choisir l'outil de forage fait partie intégrante de l'optimisation des opérations de forage car il est impératif de trouver l'outil qui accomplit au mieux sa tâche tout en forant le plus rapidement et le plus longtemps possible[56]. Dans certains cas, on préférera utiliser des outils bon marché en prenant le risque d'en user un grand nombre alors que dans d'autres, on consentira à un

surcoût sur l'outil pour maximiser sa durée de vie. Au fur et à mesure que l'usure se développe, la vitesse d'avance du forage, diminue. On utilise généralement un outil jusqu'à usure complète afin de retarder les longues manœuvres induites par un changement d'outil. Il existe une variété d'outils de forage , mais on distingue les classes suivantes :

1.4.2 Outils PDC (Polycristalline Diamond Compact).

La figure 1.5 présente les différents outils PDC

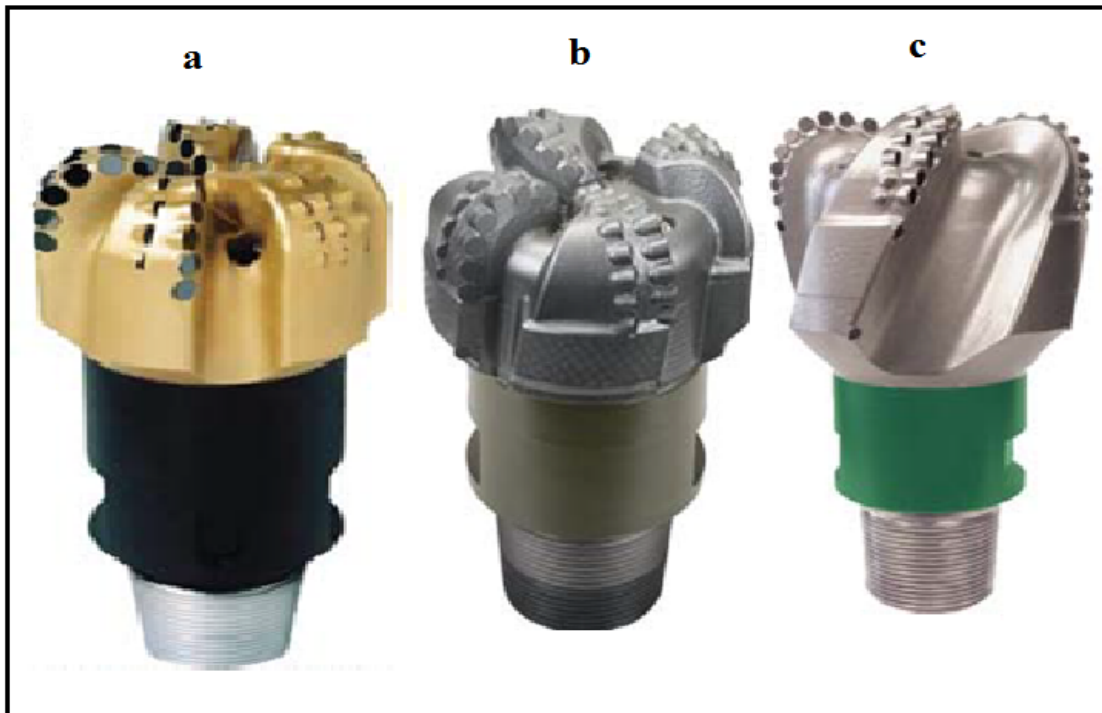


FIG. 1.5 – Les différents outils PDC

Les outils monoblocs, principalement représentés par les outils PDC (Polycristalline Diamond Compact)[32.17], constitués de taillants fixés sur le corps de l'outil (Fig1.5 a-c).

Ces outils travaillent à des profondeurs importantes et abattent la roche suivant un mécanisme souvent assimilé au cisaillement. Utilisé surtout dans le domaine pétrolier.[18]

1.4.2.1 Les outils TSP(Thermally Stable Polycrystalline)

La figure 1. 6 présente les différents outils TSP

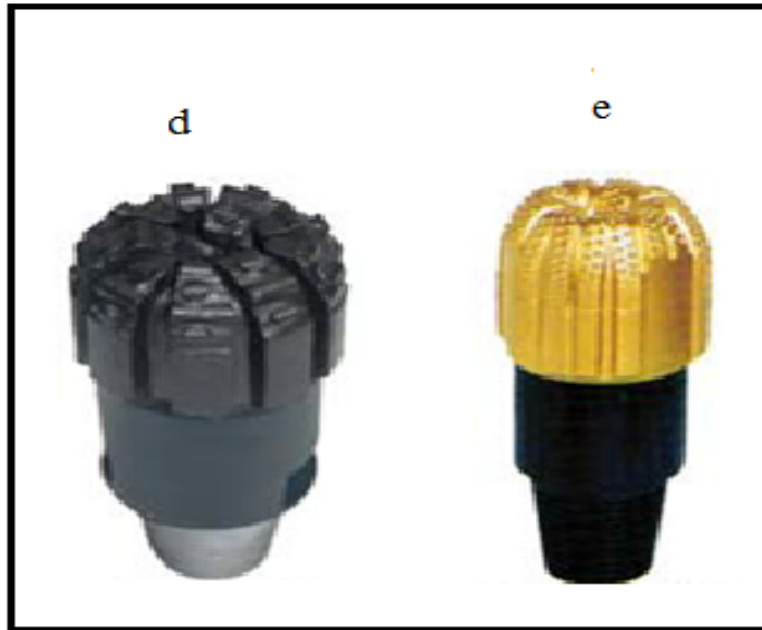


FIG. 1.6 – Les différents outils TSP

Les outils imprégnés (Fig.1.6 e) ou les outils à diamants (diamants naturels ou diamants synthétiques), aussi appelés TSP "Thermally Stable Polycrystalline", (Fig.1. 6, d)[8.12.17.32] sont conçus pour travailler à très faible pénétration dans la roche et abattent la roche par broyage. Ces outils sont utilisés généralement dans le domaine minier.

1.4.2.2 Les outils à molettes

les outils à molettes (roller-cones) sont constitués de molettes coniques sur lesquelles sont fixés des picots en carbure de tungstène (Fig.1.7, g)[4], ou bien de molettes coniques moulées sous forme de dents en acier (Fig.1.7,f)[32]. La rotation de la garniture entraîne les molettes dans un mouvement de roulement sans glissement, au cours duquel les inserts abattent la roche suivant un mécanisme de pénétration conduisant à l'éjection de débris de tailles variables (macro et microfragments).[64]

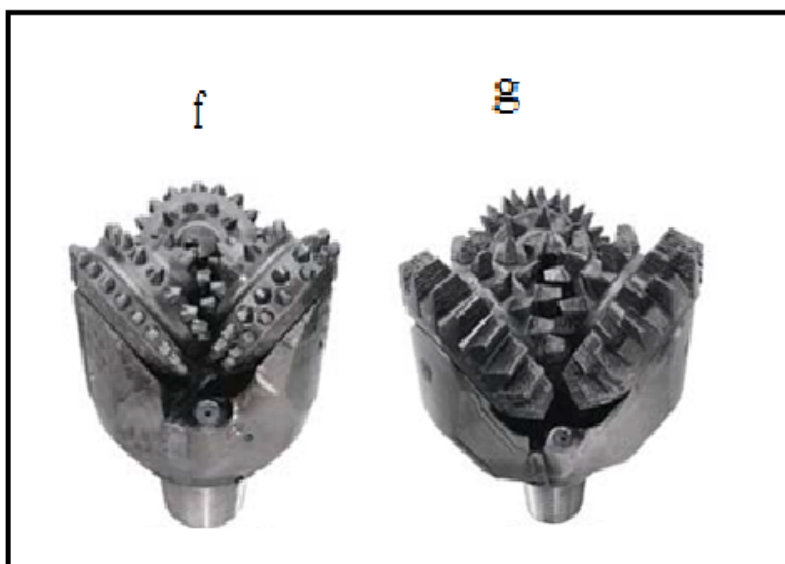


FIG. 1.7 – les outils à molettes

Ces outils sont utilisés généralement dans tous les domaines de forage.

1.4.2.3 Les outils DTH (down hole drill bits)

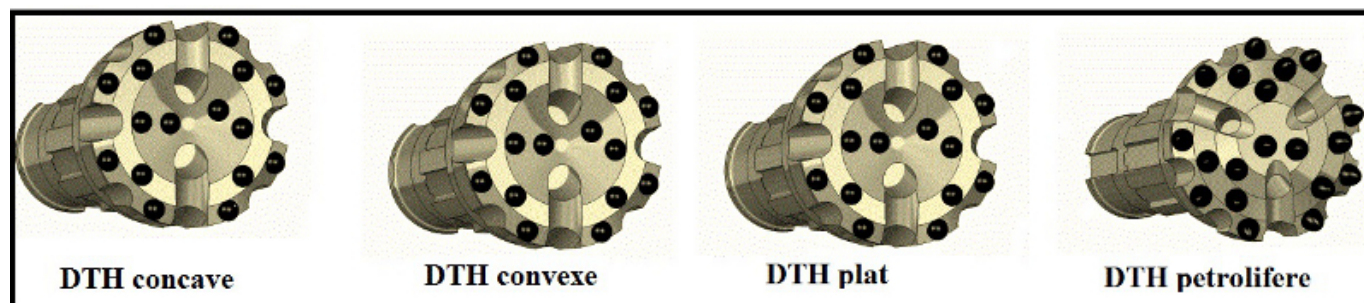


FIG. 1.8 – les outils à DTH

Face concave : cette forme est applicable dans les sols consolidés et dans les roches friables jusqu'au peut dure avec une abrasivité moyenne c'est la forme la plus largement utilisée.[9]

Face convexe : cette forme est applicable dans les conditions des roches de dureté moyenne sa donne un taux de pénétration plus important dans les couches abrasives mieux que celui de la forme concave.[9]

Face plat : cette forme est applicable dans les conditions des roches dures où une tête très durable est nécessaire. La forme de la face plane est très stable[64]

Face pétrolifère : sa forme est une combinaison de parties convexes et concaves, la tête d'outil pétrolifère fournit les avantages des deux dans toutes les applications. la jauge double

offre amplement d'espace pour les inserts supplémentaires pour assurer une longévité important. Cette forme est applicable surtout dans le domaine pétrolier d'où vient son nom.[9]

Synthèse

- Inventés au début du 20ème siècle, les outils à molettes ont conduit à l'essor du forage rotary. Ils sont particulièrement utilisés pour forer des roches dures et abrasives (picots petits et nombreux) mais il en existe pour des formations plus tendres (dents larges et profondes). Ils résistent bien à l'usure, mais 70, leur part de marché serait passée de 90 à 80 % de la distance mondiale forée dans les années leurs performances en avancement sont moyennes et leurs parties mobiles sont sensibles à la température et aux chocs. Alors que ces outils avaient quasiment le monopole jusqu'à la découverte des outils PDC dans les années 90. Puis, elle serait brutalement tombée dans les années 2000, de sorte qu'en 2006, elle serait estimée à 40 % de la distance mondiale forée[19] .
- Les outils PDC se sont vite imposés grâce à leur mode d'abattage plus efficace qui conduit à des vitesses d'avance bien supérieures. des études montrent que les outils à molettes sont 60 à 80 % plus lents que les outils PDC dans une variété de conditions opératoires. Les taillants PDC sont constitués de carbure de tungstène et recouverts d'une fine couche de diamant synthétique qui permet d'améliorer sensiblement la résistance à l'usure. Les taillants sont brasés sur le corps moulé de l'outil qui peut être composé d'acier ou de carbure de tungstène.[34]
- première solution est bon marché mais peu durable, tandis que la seconde, plus chère, présente une meilleure résistance à l'abrasion .
- Initialement conçus sur le modèle des outils à diamants, c'est-à-dire comportant un grand nombre de petits taillants, le design des outils PDC a évolué vers une exposition plus grande des taillants afin d'engager un maximum de roche et d'améliorer la vitesse d'avance, et vers un positionnement regroupé des PDC sur des lames de coupe permettant à la boue de forage de circuler plus efficacement . L'usage des outils PDC a longtemps été limité aux roches tendres à moyennement dures. Les roches dures étaient forées avec des outils à molettes, tandis que les roches très dures étaient forées avec des outils imprégnés ou avec des outils encore plus résistants, les outils à diamants, mais qui sont cependant peu performants du fait de leur mode d'abattage par abrasion.
- Des avancées technologiques importantes ont été accomplies dans la conception des matériaux constitutifs des taillants PDC, afin d'améliorer leurs résistances aux chocs et à l'abrasion, paramètres critiques dans les applications extrêmes . De ce fait, les outils PDC sont utilisés dans tous types d'applications.

CHAPITRE 2

LE FORAGE DANS LES CONDITIONS DE LA MINE DE DJEBEL-ONK

2.1 Introduction

La forabilité est un terme utilisé pour décrire l'influence d'un certain nombre de paramètres sur le rendement de la machine et l'usure de l'outil de forage. Dans cette évaluation, le terme de forabilité a été défini comme étant le taux de pénétration de l'outil de forage dans la roche[17].

La forabilité dépend principalement des :

- propriétés physico-mécaniques de la roche à forée.
- paramètres de la machine (percussions, pression de rotation, la force de poussée, etc.)
- modes de forage et dimension du trou à fore.

2.2 Cadre géologique de la mine de Djebel-Onk

La région de Bir El Ater est située au NE Algérien à la frontière Algéro-Tunisienne. Elle Est à 80 km au Sud Est de Tébessa. Elle englobe une superficie totale de 6 085 km², *lalatitudeESTN*34° 55' sa longitude est E07°57', l'altitude de la ville est de 1360 m, en moyenne. La Daira de Bir El Ater est limitée au nord par la Daira de Tébessa, à l'Est par la frontière Algéro - Tunisienne, à l'Ouest par les Daira de Cheria et la Wilaya de Khenchela et au Sud par la Wilaya de Biskra, La succession stratigraphique, de la région, va de l'âge crétacé supérieur (le Maestrichtien)[26] vers l'Eocène moyen (le Lutétien). Cette série marine, d'environ 500 m est recouverte, en discordance, par une épaisse série sablo-argileuse continentale d'âge miocène, puis quaternaire comblant les structures synclinales.

2.2.1 La stratigraphie

La colonne stratigraphique de la région débute à la fin du Campanien qui est confondu au Maestrichtien. La colonne présente les faciès suivants :

- Campanien-Maestrichtien : Ils sont localisés dans la partie axiale de Djebel-Onk, il s'agit calcaires blancs durs, qui s'alternent avec des marnes beiges. Reposant sur les marnes grises gypsifère.
- Danien : Présente une série argilo-marneuse.[15]
- Danien inf : Représenté par des argiles marneuses schisteuses grises foncées à brunes vertes intercalées de marno calcaires dures en bancs irréguliers. filonets de gypse.

- Danién sup : calcaires blancs à crémeux très fins durs alternant avec des marnes tendres argileuses schisteuses.[20]
- Montien : Série assez monotone de calcaires, calcaires détritiques à lumachelles avec intercalations de marnes et de domies.
- Thanétien : Se caractérise par de grandes variations :
Couches phosphatées peu épaisses, très argileuses,
Marnes noires avec des lits phosphatés très minces,
Couche de phosphate (30 m) : C'est la formation principale de Djebel- Onk[39].
- Yprésien inf : Il représenté par des calcaires à banc de silex avec une couche de phosphates intercalé, surmontés par des calcaires marneux blancs en plaquettes avec deux lits de silex phosphaté, à sa partie supérieure..
- Yprésien sup : Calcaires phosphatés ocres ou rougeâtres très ferrugineux, parfois silicifiés.
Calcaires à thérissite avec géode de quartz ou de calcite.
Calcaires à nodules de schistes fortement calcarifères et phosphatés.
Calcaires à rognons de silex, puis nodules de silex plus au moins quartzeux.
Calcaires blancs à quartz géodique[15].
- Lutétien inf :
Calcaires marneux blancs
Calcaires massifs blancs à nodules de silex.
Gypse intercalé de calcaires[15].

2.3 Cadre géotechnique du massif de Djebel-Onk.

Un des paramètres essentiel du forage réside, dans la détermination des paramètres physico-mécanique des différentes formations rocheuses à forées.

L'étude géologique détaillée dans ce chapitre montre la grande variation des formations rocheuses dans les conditions du massif de Djebel-Onk.

La pénétration de l'outil de forage dans une roche, nécessite la connaissance des paramètres suivants :

- la dureté.
- la résistance à la compression.
- l'abrasivité.

Ces paramètres doivent être mesurés au laboratoire.

Concernant l'abrasivité : l'étude géologique réalisée sur le massif de Djebel-Onk à montrée l'existence de la silice qui est très abrasive dans quelques formation rocheuses telle que Calaire phosphate silicieux et des couches qui contiennent des Bouilles de silex.

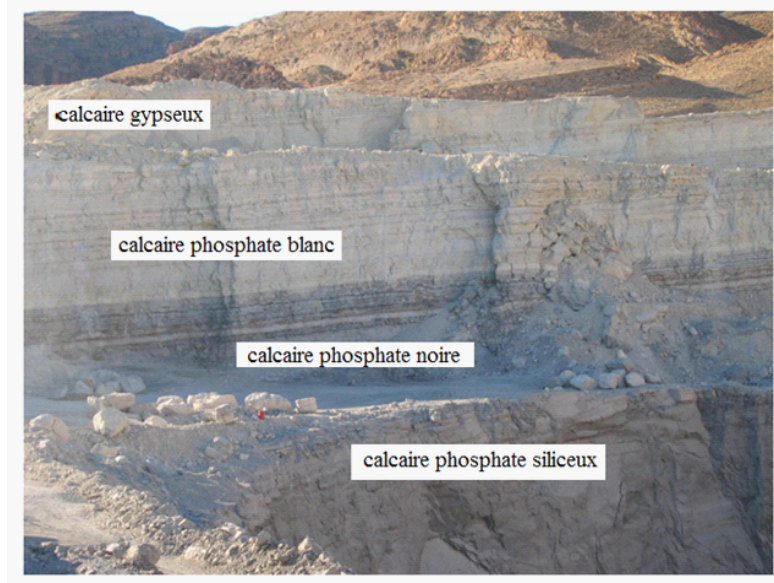


FIG. 2.1 – stratigraphie visuelle (Djebel-Onk)

La dureté : le massif étant formé de roches sédimentaire fissures de dureté égale de 4-7 sur l'échelle de Protodiaconov[15].

Concernant la résistance à la compression : nous avons testé plus de 50 échantillons sur les différentes formations rocheuses par l'essai de Franklin afin de déterminer la résistance à la compression des différentes roches à forées.

2.4 Essai Franklin (Résistance à la compression entre pointes)

L'essai Franklin est un essai de résistance qui consiste à rompre des fragments de roche de forme quelconque, ou provenant de carottages, entre deux pièces coniques à terminaison sphérique. L'épaisseur des échantillons entre ces deux pointes peut varier de 25 à 100 mm. On pratique généralement cet essai sur des morceaux de carottes de 50 mm de diamètre. Le résultat s'exprime sous forme d'un indice de résistance IS en MPa :

$$IS = F / D^2 \quad (2.1)$$

où F : charge de rupture

D : diamètre ou distance entre pointes

L'indice correspondant à un diamètre de 50 mm est noté IS50,

L'essai Franklin peut être réalisé avec un matériel très léger sur chantier ; par corrélation, il permet d'obtenir une évaluation de la résistance en compression uniaxiale de la roche :

$$20 IS 50 < \sigma_c < 27 IS 50 \quad (2.2)$$

Pour distinguer les différentes couches dans la mine de Djebel-Onk on détermine la résistance à la compression des différentes roches au niveau de laboratoire de science de la terre les résultats

sont regrouper au tableau suivant :

TAB. 2.1 – la résistance a la compression pour différentes formations géologiques

RC(MPa)	Essai de FranklinKN	Formation rocheuses
10	785	Calcaire gypseux
13.5	1150	Calcaire marneux blanc
15	1250	Calcaire marneux noir
60	5000	Calcaire phosphate siliceux
20	1785	Calcaire phosphate blanc
17	1350	Calcaire phosphate noir
30	2400	phosphate
90	7100	Bouilles de silex

Remarque : La présence des bouilles de silex dispersés dans la couche de calcaire phosphate siliceux pose des problèmes pour le processus de forage

2.5 Description des machines de forages dans les conditions de la mine de Djebel-Onk

L'exploitation à ciel ouvert consiste à enlever les stériles de recouvrement et à accéder au gisement à partir du jour[1]. Les gisements exploités à ciel ouvert se classent de la façon suivante :

Gisements plats de 0 à 10°,

Gisements inclinés de 10 à 30°,

Gisements dressant plus de 30°

Le gisement de phosphate de Djebel-Onk présente une inclinaison de 15°, donc il est classé comme un gisement incliné présentant un taux de découverte de 1.3-2.

Dans la mine de Djebel-Onk le volume de travaux planifié pour cette année 2012/2013 est de :

- 10 millions de tonnes de stérile.
- 2 millions de tonnes de phosphate.

Soit un volume de travail très important pour tout les processus de production.

les travaux préparatoires se résument comme suit :

- Les travaux d'abattage et de tir.
- Les travaux de chargement.
- Les travaux de transports.

Concernant les travaux d'abattages et de tir, qui nécessite le forage d'un très grand nombres de trous de mines pour assurer ce volume important de production planifiée pour les stériles et le minerai. A cette fin nous allons nous intéresser dans ce mémoire sur l'optimisation du régime de fonctionnement des machines de forage ; qui seront traités en détail dans les chapitres 3 et 4.

Dans la mine de Djebel-Onk il existe quatre sondeuses en service :

- Trois ATLASCOPCO ROC L8; ROC L6; ROC L9 sur chenils.
- Une sondeuse INGERSOLL ROUND Sur pneus dans notre cas on consacre l'étude sur la sondeuse ATLASCOPCO ROC L8.

2.5.1 Description générale de l'engin de forage Roc L8

L'engin de forage Roc L 8 est un engin hydraulique diesel conçu pour le forage dans des applications de surface, telles que carrières et sites d'installation.

Le mode roto-percutant, est appliqué dans ce type de machine.

La figure 2.2 : présente la description générale de l'engin de forage Roc L 8[11]

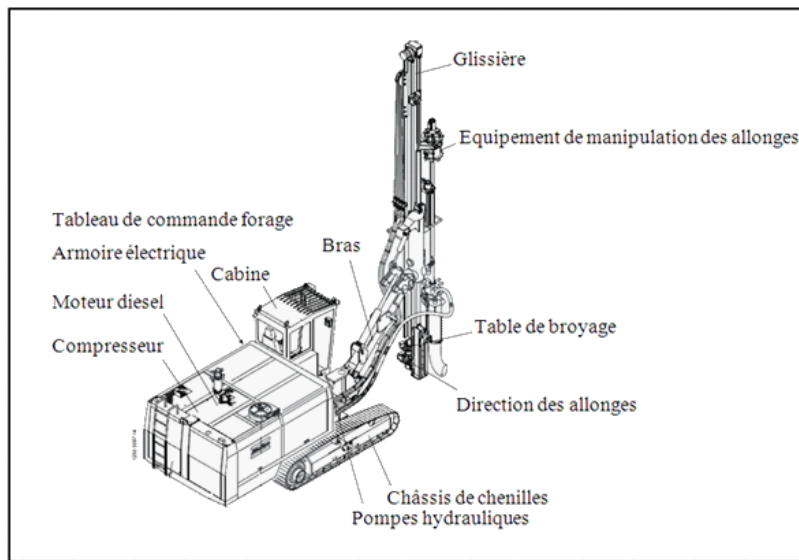


FIG. 2.2 – sondeuse atlas -copco Roc L8

Le marteau fond de trou est un marteau à percussion (Figure 2.3)[11]. Comme leur nom l'indique, il travaille au fond du trou, à l'extrémité du train de tiges, et le piston de percussion frappe directement la queue du taillant. L'air comprimé arrive au marteau par les tiges de forage. L'air d'échappement est évacué par le taillant et assure le soufflage du trou foré.

La rotation est assurée par un moteur rotatif hydraulique située sur la glissière et transmise au marteau par des tiges de forage. Les tiges de forage sont ?letées pour permettre l'allongement du train de tiges au fur et à mesure que le forage progresse et que le trou devient plus profond.

La poussée est également transmise au marteau par un moteur rotatif hydraulique au sommet du mat. L'un des avantages des marteaux fond de trou est que leur vitesse de pénétration est pratiquement indépendante de la profondeur du trou. Les marteaux fond de trou se caracté-

risent par une productivité élevée et conviennent à de nombreuses applications dans les mines, les carrières, les travaux publics et le forage d'eau.

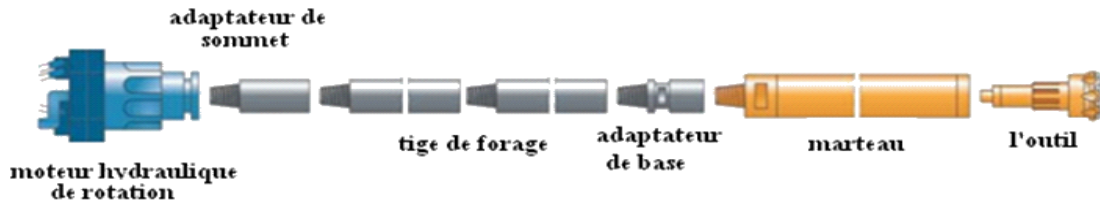


FIG. 2.3 – les éléments de forage de la sondeuse ROC L8

2.5.2 Description technique (Le marteau fond du trou)

Les marteaux fond de trou travaillent au fond du trou et sont solidaires du taillant. Les marteaux sont constitués d'une chemise extérieure où sont logés un clapet anti-retour, une bague de compression ou ressort à disque un piston de percussion, un tube central, une douille, une bague d'arrêt et une queue de taillant[11]. L'extrémité supérieure de la chemise est fermée par l'embout supérieur fileté. L'embout supérieur possède un filetage mâle pour le raccordement des tiges de forage et est pourvu d'une prise de clé. La douille d'entraînement se visse dans la partie avant de la chemise. Elle permet d'engager la queue de taillant et, ainsi, de transmettre la rotation au taillant. La bague d'arrêt fendue limite le jeu axial du taillant[11]. Le clapet anti retour empêche l'eau de pénétrer dans le marteau par la douille d'entraînement lorsque l'alimentation en air comprimé est arrêtée. Lorsqu'une poussée est appliquée, la queue du taillant rentre dans le marteau et le taillant vient en butée contre la douille d'entraînement. Le piston de percussion frappe directement la queue du taillant. Le passage de l'air comprimé dans le marteau s'effectue par le piston et le tube central, qui sont tous deux munis de conduits de régulation. La chambre d'amortissement intégrée amortit le choc en retour du piston et augmente la fréquence de percussion. Lorsque l'air comprimé a transmis la plus grande partie de son énergie au piston, il est évacué par le clapet de pied L dans le trou de soufflage central du taillant[16]. L'air d'échappement assure le soufflage par les trous disposés dans la tête du taillant, ce qui permet d'évacuer efficacement les débris de forage à l'extérieur du trou foré. Lorsque le marteau est soulevé du fond du trou, le piston peut se placer en position soufflage seul. Dans ce cas, la percussion est arrêtée et l'air comprimé sert uniquement au soufflage, c'est à dire qu'une grande quantité d'air circule directement à travers le marteau et le taillant. Ceci se produit chaque fois que le taillant n'est plus en contact avec le fond du trou. Le marteau se remet en percussion dès que le taillant est à nouveau plaqué contre la douille d'entraînement. Le

soufflage seul est utilisé lorsque le trou nécessite une évacuation importante de débris et dans des conditions de forage difficiles .Lorsque les conditions de forage sont particulièrement difficiles, il est possible de disposer d'un soufflage renforcé en changeant le clapet de l'embout supérieur. Ce soufflage renforcé est recommandé lorsqu'il y a d'importantes venues d'eau dans le trou, ou une grande différence entre le diamètre du taillant et celui des tiges ou encore lorsque les taux de pénétration sont anormalement élevés .Les frottements entre les tiges et les parois du trou peuvent parfois réduire légèrement le taux de pénétration. Cette réduction peut être limitée par une augmentation de la pression d'air, ce qui permet d'obtenir une plus grande puissance de percussion et une pénétration plus rapide[10].

2.5.3 Châssis de chariot avec châssis de chenilles

Le moteur diesel, la caisse, le dépoussiéreur, le circuit hydraulique, le circuit pneumatique et le système de bras sont installés sur le châssis de chariot.

Le châssis de chenilles est composé d'un châssis avec une cabine

plate-forme conducteur montée du côté gauche. Les commandes de déplacement et de forage sont

Installées dans la cabine

Les châssis de chenilles sont montés sur des tourillons fixés au châssis de chariot.

Deux vérins de compensation équilibrent l'engin de forage lors du déplacement sur un terrain accidenté[11].

2.5.4 Système de bras

Le système de bras est composé d'éléments intérieurs/extérieurs de bras, d'une tête de bras, d'un support de glissière et de vérins hydrauliques associés. Le système de bras commandé par des distributeurs permet de positionner le marteau-perforateur à différentes distances et dans différentes directions[11].

2.5.5 Dépoussiéreur

Le dépoussiéreur à commande hydraulique avec fonction d'auto-nettoyage est composé d'une unité de filtrage, d'un pré séparateur, d'un cyclone d'aspiration et d'un flexible d'aspiration[12]

2.5.6 Installation électrique

Le circuit électrique de 24 V est alimenté par un alternateur et deux batteries.

L'installation électrique est composée des éléments suivants : équipement de démarrage, éclairage de travail, commandes électriques de manipulation et dispositifs de sécurité.

Les boutons d'arrêt d'urgence et le câble d'arrêt d'urgence sont montés en série avec le système

de mise hors tension du moteur diesel. Dès qu'un bouton/câble d'arrêt d'urgence est actionné, le moteur diesel est coupé immédiatement. Réarmer les boutons d'arrêt d'urgence avant de redémarrer le moteur. Il est impossible de démarrer le moteur avec un des arrêts d'urgence actionné[11].

2.5.7 Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique comporte six pompes hydrauliques, un refroidisseur d'huile, un réservoir d'huile, des distributeurs, des flexibles, etc.

Les six pompes créent une pression hydraulique comme suit :

Table de pompes hydrauliques.

Le réservoir d'huile hydraulique est situé sur le côté gauche de l'engin de forage.

Les refroidisseurs sont placés à l'arrière du chariot.[11]

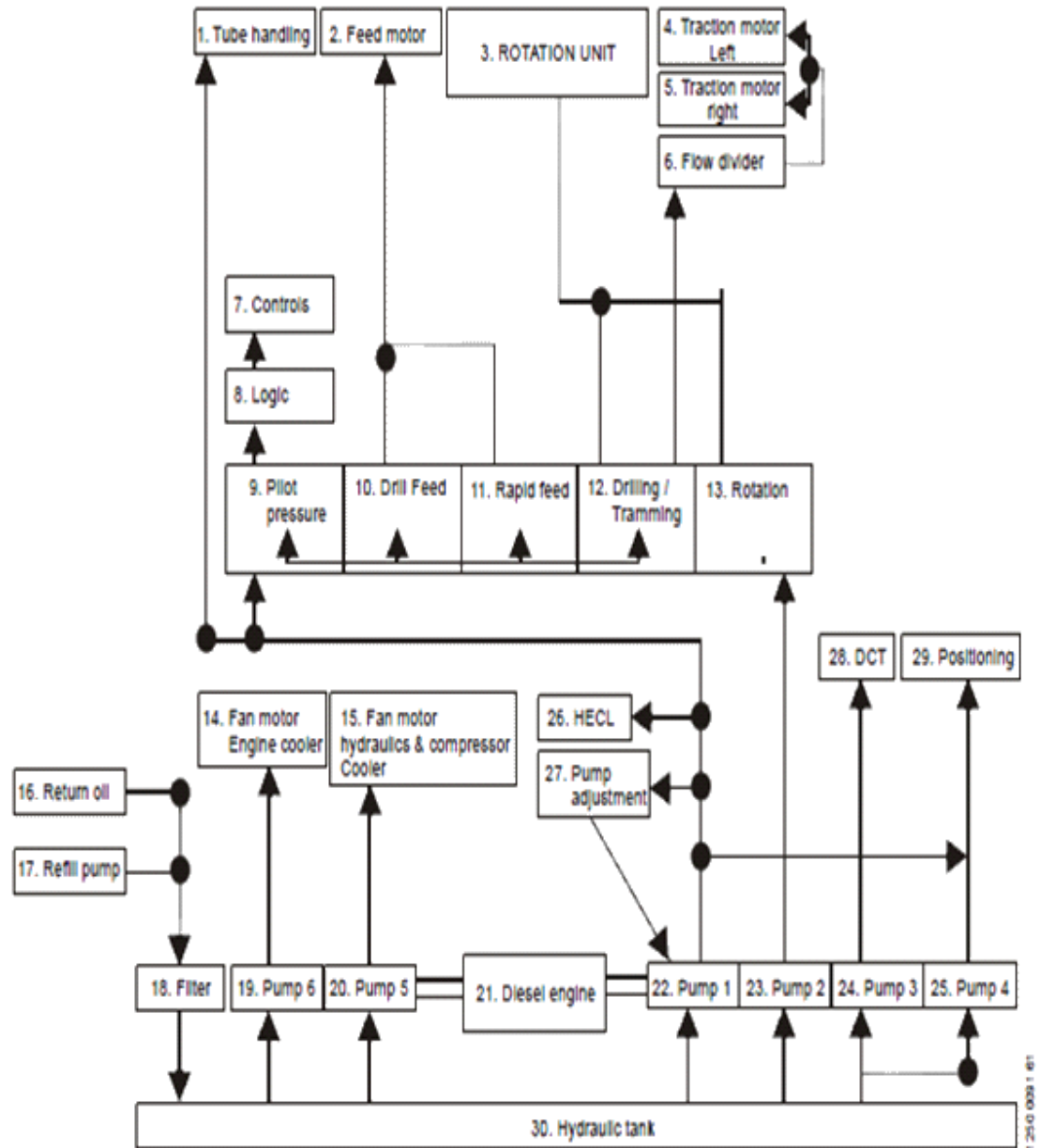


FIG. 2.4 – Fonctions du système hydraulique

2.5.8 Système pneumatique

Le circuit pneumatique comprend un compresseur avec séparateur d'huile, des flexibles et des vannes.

Le compresseur est directement entraîné par le moteur diesel.

L'unité compresseur est graissée par un mélange d'air et d'huile. La séparation du mélange d'air et d'huile s'effectue dans le séparateur d'huile.

Le circuit pneumatique fournit de l'air pour le soufflage du trou de forage, le nettoyage du filtre du dépoussiéreur et le graisseur de ligne HECL du marteau-plongeur.

2.6 Transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chute, cours d'eau, courant marin, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique[31].

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique dans le cas des courants marins ou des cours d'eau, des marées, des vagues, et une énergie potentielle dans le cas des chutes d'eau et barrages.

2.6.1 Utilisations de l'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique peut être directement utilisée sous forme d'énergie mécanique, par exemple :

- L'eau d'un ruisseau fait tourner la roue d'un moulin à eau.
- L'énergie hydraulique peut également être convertie en énergie hydroélectrique, pour la production d'électricité :
- Une centrale hydroélectrique utilise l'énergie de la hauteur de chute et du débit d'un cours d'eau.
- Une centrale marémotrice utilise l'énergie des marées.
- Une hydrolienne utilise celle des courants marins.
- L'énergie des vagues peut aussi être exploitée[31].

2.6.2 Système hydraulique

Un système hydraulique, en hydromécanique, est un assemblage de composants fonctionnant de manière unitaire et souvent en interaction afin d'utiliser un fluide sous pression pour effectuer un travail mécanique. Un tel système peut aussi être appelé installation hydraulique. Son principal élément est une centrale hydraulique[48].

Comme un système pneumatique, un système hydraulique est basé sur une différence de pression entre 2 zones, qui crée une force, puis un mouvement. Mais un système hydraulique utilise un

fluide non compressible, un liquide, alors qu'un système pneumatique s'appuie sur un fluide compressible, un gaz[2].

2.6.3 Assemblage

Il est souvent lié avec l'électricité, l'automatisme, mécanique industrielle, construction mécanique ou machine spéciale, à partir d'une énergie souvent électrique ou thermique (moteur diesel par exemple), un système hydraulique permet de produire une énergie hydraulique tout en respectant les normes environnementales et de sécurité[48].

2.6.4 Principaux composants d'un système hydraulique

Un circuit hydraulique est constitué de 3 zones (figure 2.5)[48] :

1^{ère} zone : Source d'énergie : c'est un générateur de débit. (Centrale hydraulique)

2^{ème} zone : Récepteur hydraulique : transforme l'énergie hydraulique en énergie mécanique. (Vérin, moteur hydraulique)

3^{ème} zone : Liaison entre les deux zones précédentes. On peut trouver dans cette zone :

- Des éléments de distribution (distributeur).
- Des éléments de liaison (tuyaux).
- Des accessoires (appareils de mesure, de protection et de régulation).

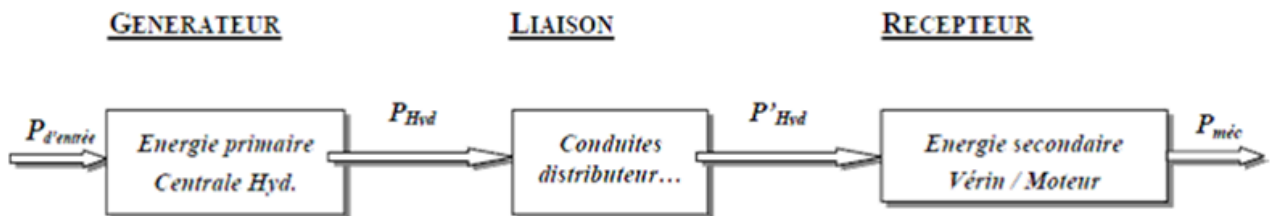


FIG. 2.5 – Principaux composants d'un système hydraulique

2.7 composants d'un système hydraulique

2.7.1 Groupe hydraulique (nommé aussi centrale hydraulique)

La centrale hydraulique (appelé aussi groupe hydraulique) est un générateur de débit et pas de pression. La pression augmente lorsqu'il y a résistance à l'écoulement.

Elle est constituée essentiellement d'un réservoir d'huile, d'un moteur et d'une pompe et d'un système de filtration (figure 2.7) et (figure 2.6).

Avec le réservoir, le groupe moto pompe est le cœur du système hydraulique[61].

- Système de filtration de l'huile et de l'air.
 - Accumulateur (réserve d'énergie selon le choix technique)
 - Réservoir permet le stockage de l'huile, protection contre des éléments qui peuvent le polluer, et le refroidissement ;
 - Système de filtration utilisé pour éliminer les impuretés et les particules solides du fluide ;
- Pompe consiste à :
- Générer un débit de liquide ;
 - Mettre sous pression l'huile sous forme d'énergie hydraulique[2].

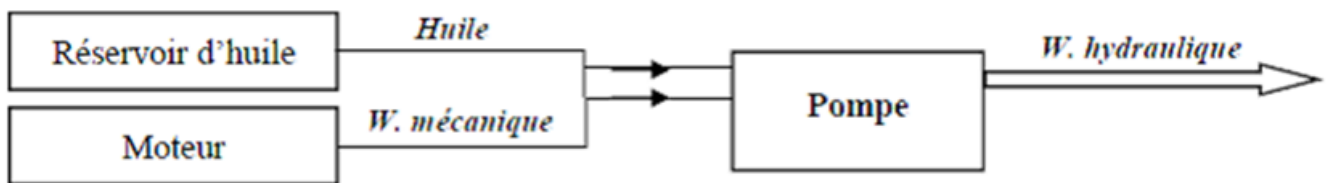


FIG. 2.6 – Principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie hydraulique

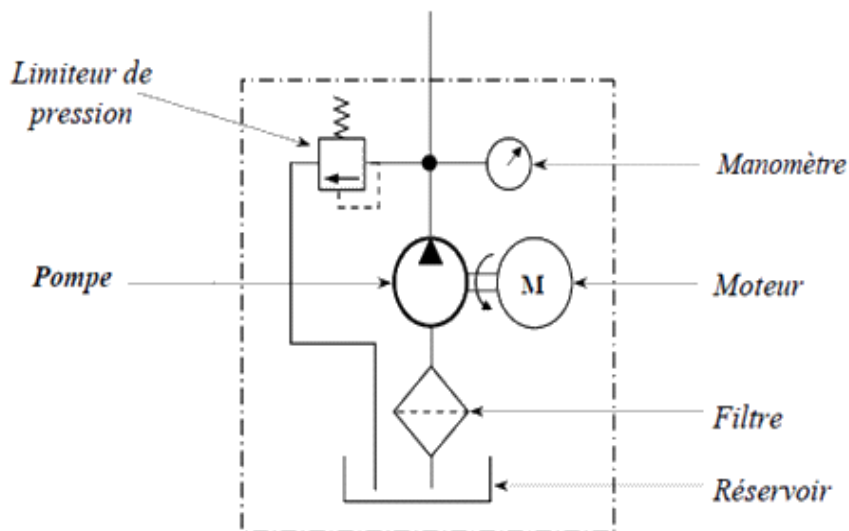


FIG. 2.7 – schématisation des systèmes hydrauliques

Le cycle complet de transformation de l'énergie hydraulique est présente dans la (figure 2.8).

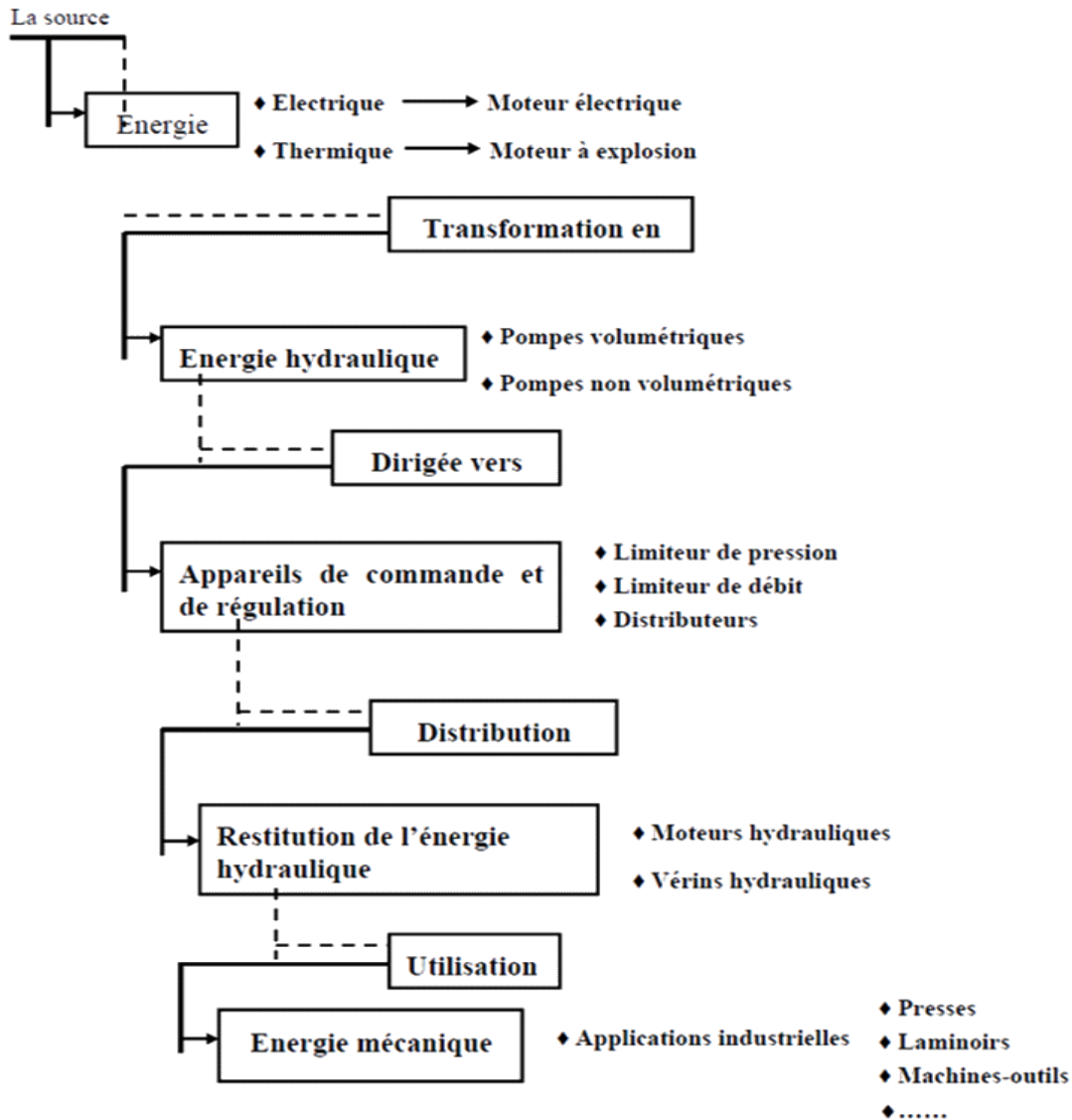


FIG. 2.8 – le cycle de transformation de l'énergie hydraulique

2.7.2 La pompe hydraulique

2.7.2.1 Rôle de la pompe dans un système hydraulique

La pompe est destinée à transformer une énergie mécanique fournie par un moteur, en énergie hydraulique. Son rôle se limite à aspirer l'huile de réservoir et de la refouler. La pompe fournit un débit. Elle est donc un générateur de débit.

2.7.2.2 Classification des pompes

On classe les pompes en deux grandes familles :

1. Les pompes non volumétriques ; dans les quelles la chambre d'admission et la Chambre

de refoulement où le fluide est expulsé ne sont pas séparées l'une de l'autre par des pièces mécaniques rigides[28].

2. Les pompes hydrodynamiques (volumétriques)[48], dans lesquelles la chambre d'admission est séparée par des pièces mécaniques rigides de la chambre de refoulement, ce qui assure l'étanchéité entre ces deux chambres.

2.7.2.3 Les pompes volumétriques

a. Principe

- Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos (stator) à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté participant à la circulation du fluide à l'intérieur de la pompe. Ce déplacement est cyclique. D'autres éléments mobiles destinés à mettre en mouvement les éléments précédents[35].

- Pendant un cycle, un volume de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé.

b. Description

Un volume de fluide V_0 (équivalent à la cylindrée) est emprisonné dans un espace donné et contraint à se déplacer, de l'entrée vers la sortie de la pompe à chaque cycle. Le volume V_0 est prélevé sur le fluide contenu dans la conduite d'aspiration, d'où une dépression qui fait avancer le fluide vers la pompe, assurant ainsi son amorçage (autoamorçage)[48].

Remarque

La pression ne doit pas s'abaisser en dessous de la pression de vapeur saturante du liquide, pour éviter son ébullition et l'apparition du phénomène de cavitation

2.7.2.4 Les pompes à engrenages

Elle est constituée de deux engrenages tournant à l'intérieur du corps de pompe (figure 2.9)[48]. Le principe consiste à aspirer le liquide dans l'espace compris entre deux dents consécutives et à le faire passer vers la section de refoulement (La rotation d'un pignon entraîne la rotation en sens inverse de l'autre, ainsi une chambre se trouve à l'aspiration, l'autre au refoulement)[48].

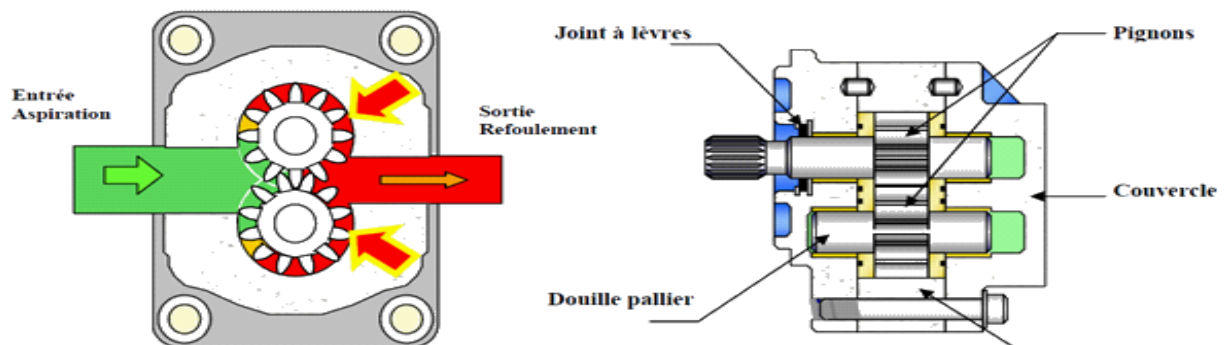


FIG. 2.9 – pompe à engrenage

2.7.3 Les moteurs hydrauliques

Définition

Dans ce type d'actionneur, l'énergie hydraulique fournie par un fluide sous pression est transformée en énergie mécanique. Il en résulte un mouvement de rotation de l'arbre de sortie.

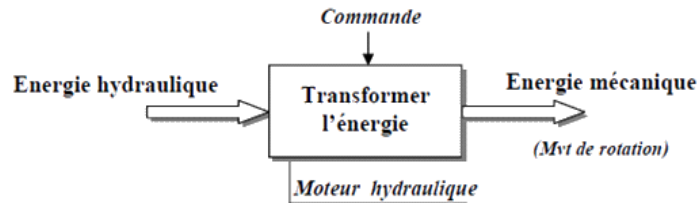


FIG. 2.10 – Principaux de transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique

Les moteurs hydrauliques présentent deux caractéristiques : le couple moteur et la vitesse de rotation. la (figure 2.11) présente le moteur hydraulique de rotation de la sondeuse ROC L 8[11]

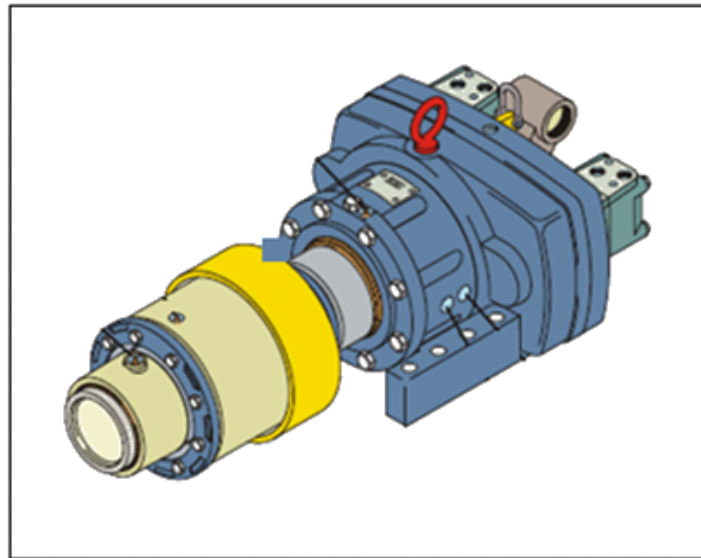


FIG. 2.11 – moteur hydraulique de rotation au sommet ROC L 8

Remarque

Ces moteurs entraînent des systèmes mécaniques. Si le couple résistant devient trop important, la pression monte. Quand elle atteint la valeur de réglage du limiteur de pression, le débit

retourne au réservoir. Leur avantage c'est qu'ils développent une grande puissance pour un encombrement réduit.

2.8 Description d'opération de forage

- La première opération de forage est de positionner la machine sur la plateforme de travail et d'assurer la position horizontale grâce aux trois vérins de positionnement. L'orientation de forage doit être respectée ; l'outil est mis en contact directe avec le sol soigneusement par l'opérateur, l'opération de forage commence alors lentement jusqu'à ce que l'outil emprunte le trou de forage, dans ces conditions l'opérateur augmente la vitesse et la pression d'avancement.
- La rotation est générée par deux moteurs hydrauliques fixés sur un cadre (Ensemble de la tête du moteur) qui peut coulisser le long de la longueur du mât (figure 2.11). Les moteurs entraînent d'une broche secondaire qui se connecte à une tige d'acier par l'intermédiaire d'enfilage à une extrémité, l'extrémité filetée a l'outil. L'ensemble tête de forage moteur est tiré vers le haut et vers le bas par des chaînes d'alimentations alimentées par un moteur hydraulique. La force déroulant est contrôlée en ajustant la pression d'alimentation à des vérins hydrauliques. La force résultante verticale au niveau de l'outil le poids sur l'outil. Lorsque la tige pénètre dans le trou sur toute sa longueur, le conducteur la dévisse sous broche par rotation des moteurs dans le sens inverse. Il déplace ensuite le carrousel dans la position de chargement pour ajouter une autre tige au dessus de la précédente et reprend ensuite le forage. La colonne composée d'un ou plusieurs tiges sur l'outil est dénommée train de tiges.
- L'opérateur de forage permet de régler la vitesse de rotation et la pression d'alimentation pour permettre une production maximale tout en essayant de sécuriser la vie de l'outil le plus long temps possible et de garder des coûts au minimum ainsi que temps d'arrêt d'entretien. La réaction du conducteur est principalement basée sur l'information visuelle de jauge de commande de vitesse de rotation, la pression d'alimentation, de la pression de rotation (qui est responsable de la génération du couple), la pression d'air comprimé

CHAPITRE 3

MÉTHODE DES PLANS D'EXPÉRIENCES

3.1 Historique sur la méthode des plans d'expériences

Nous nous intéresserons à l'aspect historique des PE en ne considérant presque exclusivement que la période postérieure aux années 1920 . La notion d'expérimentation est bien sûr quant à elle antérieure à cette date .

Le point de départ des principes modernes de l'expérimentation est souvent fixé à 1919, date de l'engagement du statisticien (également biologiste évolutionnaire et généticien)

Ronald A.

Fisher (1890 - 1962) par la Rothamsted Experimental Station (Centre de recherche agronomique) dans le cadre d'études agronomiques. Très rapidement, les travaux de Fisher font apparaître les notions de répétition, de répartition au hasard ou randomisation, de constitution de blocs, d'expériences factorielles, d'effets principaux et d'interactions, de confusions des effets [Fisher,

1925, 1926]. En 1931, Fisher est rejoint par Frank Yates (1902 – 1993). De leur collaboration résultent de nouveaux développements théoriques tels que les expériences factorielles fractionnaires, les notions d'expériences en blocs aléatoires incomplets [Yates, 1935, 1936, 1937].

Deux autres noms peuvent être cités : William G. Cochran (1909 – 1980) et David J. Finney (1917 -). On doit notamment à ces deux chercheurs des contributions importantes concernant les expériences croisées et portant aussi sur les expériences factorielles fractionnaires.

A partir des années 1935-1940, les notions d'expérimentation interviennent également dans le secteur industriel. Des concepts nouveaux apparaissent alors, tels que les plans de Plackett et Burman (1946), la notion de surface de réponse (1952), les plans optimaux (1959) et les plans Taguchi (1959, 1960, 1987) .

Depuis, les PE ont pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul qui l'accompagne.

3.2 Introduction

Une démarche visant à comprendre et synthétiser un processus quelconque, inconnu a priori. La réalisation d'expériences donne alors la possibilité d'initier un processus de traduction en termes logiques, voire mathématiques de ce phénomène[49].

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables[37] :

La réponse : grandeur physique étudiée ;

Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influé sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux.

Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plans d'expériences[37], correspondant à la réalisation d'une série de (N) expériences, qui sont toutes :

Déterminées a priori ; obligatoirement réalisables ; indépendantes entre elles.

La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. Une relation de modélisation en est alors déduite.

3.3 Concepts généraux de la méthode des plans d'expériences

Dans cette partie sont synthétisées et résumées les différentes hypothèses entrant en jeu dans l'utilisation de la technique des plans d'expériences. Ces considérations entreront bien entendu en compte dans les développements ultérieurs plus spécialisés décrivant l'optimisation par utilisation de la méthode des plans d'expériences (MPE)[32,42 :46].

3.3.1 Définitions des variables

On fait correspondre des variables mathématiques à des grandeurs physiques (mécaniques, électriques, thermiques, ...) supposées intervenir dans le problème[37,50,51]. Nous définissons les termes suivants :

3.3.1.1 Réponses

Ce sont les grandeurs étudiées ou grandeurs de sortie.

Dans le cadre des processus d'optimisation, la grandeur étudiée dont on recherche les meilleures valeurs est généralement appelée fonction objectif ou fonction réponse On définit également les fonctions de contrainte qui définissent les expériences non réalisables. Les fonctions objectives et de contrainte peuvent être une réponse particulière ou une combinaison de plusieurs réponses du système étudié.

3.3.1.2 Facteurs

les facteurs impliquent principalement la spécification des dimensions du domaine d'étude par la détermination des bornes inférieure $b(\text{inf})$ et supérieure $b(\text{sup})$.

Les facteurs et les réponses sont les seules variables à intervenir dans l'écriture des plans d'expériences[32].

3.3.1.3 Domaine d'étude (DE)

Etant donnée la définition des variables de type facteur, il devient naturel de définir un espace k dimensionnel, dans lequel chaque point représente une combinaison des valeurs possibles des k facteurs.

Cet espace est appelé domaine d'étude (DE)[32]. On trouve également l'appellation espace de recherche, montrant un lien plus fort avec les futures optimisations prenant place dans cet espace.

Les points intérieurs à ce domaine sont les points d'expériences, car ils sont la traduction mathématique, par leurs coordonnées, des combinaisons de valeurs des grandeurs physiques leur correspondant.

Le DE est obligatoirement de forme hyper-rectangulaire, ses dimensions étant imposées par les plages de variation des k facteurs[30].

3.3.1.4 Nature du problème

Le domaine d'étude est a priori un ensemble infini de valeurs, toute fonction définie sur cet espace étant continue. Cependant, le cas discret peut également être rencontré.

Problème continu : Dans cette hypothèse, toutes les variables sont supposées prendre n'importe quelle valeur dans le domaine d'étude. x est donc un élément de $R^k \cap DE \dots$ Ainsi, dans la relation $y=f(x)$, f est une fonction continue de la variable x [37].

Problème discret : Dans un problème discret, les réponses sont étudiées relativement à des facteurs discrets ou qualitatifs. Cependant, cette définition peut être rendue plus générale, dans la mesure où certains facteurs continus peuvent être discrétisés.

3.3.2 Contraintes

Aux limites inférieures et supérieures de chaque facteur, viennent souvent s'ajouter les contraintes, c'est-à-dire des conditions pratiques particulières pour lesquelles il est exclu de réaliser des expériences. Il peut s'agir d'impossibilités manifestes ou plus simplement de limites imposées par l'expérimentateur. Elles se traduisent alors par la définition implicite de zones du DE pour lesquelles aucune expérience ne doit être menée. Elles sont mathématiquement définies par les fonctions de contrainte[32].

Contraintes en position

- Les contraintes en position sont celles qui ne concernent que les facteurs.
- Elles lient dans la majorité des cas les facteurs entre eux.
- Elles ont l'avantage d'être connues avant la réalisation des expériences, et donc de participer à la définition du domaine d'étude possible.

Il s'agit souvent de contraintes traduisant davantage des impossibilités réelles que des limites imposées dans le cadre d'optimisations.

La présence de contraintes en position, actives à l'intérieur du domaine d'étude est problématique car elle interdit souvent la réalisation de plans « classiques » possédant des propriétés connues et parfois optimales.

Contraintes en valeurs atteintes[37].

Les contraintes en valeurs atteintes font intervenir les réponses, en plus des facteurs.

De la même façon, il est courant que pour de telles contraintes, les réponses soient mutuellement liées. C'est ainsi le cas lors de contraintes définies comme modalités d'un processus d'optimisation. On peut par exemple vouloir que les conditions optimales soient recherchées pour une réponse donnée, tout en imposant que les valeurs d'une seconde réponse ne dépassent pas un certain seuil [37].

Dans ces cas précis, ces contraintes ne décrivent donc pas des zones d'expérimentation impossibles, mais des espaces exclus parce que placés sous conditions. La définition de telles contraintes est en outre délicate. Les « réponses » considérées précédemment peuvent en effet correspondre : aux réponses mesurées directement ; aux réponses calculées, par l'utilisation d'une modélisation particulière à définir. Ce choix est laissé à l'expérimentateur[32].

Cependant la première alternative ne peut être utilisée lors de processus d'optimisation, puisque dans ce cas, on pourrait être amené à réaliser des expériences donnant des valeurs de réponse invalidées par ces mêmes contraintes...C'est ainsi que ces espaces ainsi exclus ne sont définis qu'après les expériences réalisées et les modèles calculés.

3.3.3 Domaine d'étude possible (DEP)

On définit le domaine d'étude possible (DEP) comme étant le domaine d'étude (DE) soumis aux contraintes de position. Il s'agit donc de l'espace des expériences réalisables.

De la même façon que pour le DE, on peut réaliser la distinction entre les problèmes continus et les autres discrets, modifiant de fait structurellement les ensembles de valeurs des facteurs.

3.4 Expériences

3.4.1 Expériences réelles

Classiquement, les expériences considérées par la MPE sont des processus réels pour lesquels il y a modification effective des conditions expérimentales.

Les expériences réelles sont soumises aux erreurs expérimentales et aux erreurs de mesure[37].

Ces dernières peuvent être définies comme suit.

L'erreur expérimentale traduit l'erreur imputable à la conception et à la réalisation des expériences. Elle n'est donc liée qu'à l'expérimentation[32].

L'erreur de mesure traduit la variabilité des réponses du fait de la prise en compte des résultats donnés à l'issue du processus d'expérimentation. Elle peut ainsi s'ajouter a posteriori à l'erreur expérimentale.

3.4.2 Expériences virtuelles

Il est ainsi possible à présent de réaliser des calculs complexes sur tout type de structures, dans de nombreux domaines physiques (mécanique, hydrodynamique, électromagnétisme, etc.). Dans tous les cas, l'objet étudié doit être renseigné informatiquement, c'est-à-dire modélisé[30].

Ces simulations sont considérées comme des expériences relevant d'un caractère virtuel (ou expériences virtuelles).

L'objet étudié n'existe pas physiquement mais ses propriétés physiques peuvent être calculées par des outils numériques. Les expériences virtuelles ne sont soumises qu'aux erreurs expérimentales.

Pour ces raisons, deux personnes disposant de moyens différents n'aboutiront pas au même résultat pour la réalisation d'une simulation identique. En d'autres termes, réaliser deux fois la même simulation donnera toujours la même réponse. Mais concevoir deux fois un processus expérimental pour la réalisation d'une même expérience peut conduire à deux résultats différents.

L'apport de l'outil statistique reste donc primordial : les variables utilisées sont aléatoires par nature, au sens mathématique du terme[32].

Synthèse

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse). Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale.

3.5 Modélisation par la méthode des plans d'expériences.

Le but est la recherche de l'expression d'un modèle polynomial décrivant les variations de la fonction réponse y relativement aux valeurs de k facteurs x_1, x_2, \dots, x_k . [53.54] La relation mathématique reliant ces variables sera de la forme :

$$\begin{aligned}
 y_{mod} = & b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + \dots + b_k.x_k + \dots \\
 & b_{11}.x_1^2 + b_{22}.x_2^2 + \dots + b_{kk}.x_k^2 \dots \\
 & b_{12}.x_1.x_2 + \dots + b_{1k}.x_1.x_k + \dots + b_{2k}.x_2.x_k + \dots \\
 & b_{111}.x_1^3 + b_{222}.x_2^3 + \dots + b_{kkk}.x_k^3 \dots \\
 & b_{123}.x_1.x_2.x_3 + \dots + b_{12k}.x_1.x_2.x_k + \dots
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

On remarquera la différence faite entre :

y : valeur de réponse mesurée (issue d'une expérience) ;

y_{mode} : valeur de réponse calculée (issue d'un modèle des variations de la réponse y).

Tous les monômes sont pondérés. Dans le cas d'un nombre élevé de facteurs, le nombre de coefficients (p) devient alors excessif. Ainsi, les monômes dépassant un certain ordre o sont souvent ignorés.

On désignera par la suite « modèle d'ordre o » ou « modèle de degré o » tout modèle polynomial dont le monôme de degré le plus élevé est de degré o . y_{mod} peut toujours être transcrit matriciellement comme une multiplication de 2 vecteurs [32 :34,36 :39]

$$y_{mod}(x) = f(x) \cdot \beta \tag{3.2}$$

Cette relation est de portée générale, par utilisation des notations suivantes :

$$f(x) = [1x_1x_2 \dots x_kx_1^2x_2^2 \dots x_k^2x_1.x_2 \dots x_1.x_k \dots x_2.x_k \dots] ;$$

$\beta = [b_0b_1b_2 \dots b_kb_{11}b_{22} \dots b_{kk}b_{12} \dots b_{1k} \dots b_{2k} \dots]'$ le vecteur de p coefficients de la modélisation polynomiale de la réponse [32,50,51].

Le coefficient b_0 représente toujours la moyenne des réponses mesurées y des N expériences du plan

$$b_0 = \bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y^{(i)} \tag{3.3}$$

3.5.1 Modèles du premier degré (sans interaction)

Pour tout point d'expérience de coordonnées $x = [x_1x_2 \dots x_k]'$ la valeur de la réponse y se déduit de la relation matricielle :

$$y_{mod} = b_0 + x' \cdot b \tag{3.4}$$

b_0 est donc la valeur de la réponse au point origine des axes ([00. . . . 0]).

De par la forme de l'équation, le vecteur b des coefficients du modèle ($b = [b_1b_2 \dots b_k]'$) indique également la direction de plus grande augmentation de la fonction réponse

$y_{mode}(x)$. Les valeurs des coefficients du modèle sont données par celles des éléments du vecteur β , qui peut notamment adopter l'écriture particulière[36,50,51]

$$\beta = [b_0 b_1 b_2 \dots b_k]' \quad (3.5)$$

Pour 3 facteurs, l'équation peut s'écrire :

$$\begin{aligned} y_{mod} &= b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_3.x_3 \\ &= b_0 + [x_1 x_2 x_3] \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Ce type de modèle est typiquement utilisé dans le cadre de la méthodologie des surfaces de réponse. Il peut également être employé pour le screening avec certains plans où les interactions entre facteurs ne sont pas gérées (plans de Plackett-Burman, certains plans de Taguchi, ...)[32].

3.5.2 Modèles avec toutes les interactions

Le précédent modèle ne prend pas en compte les interactions entre les k facteurs. Si celles-ci doivent être considérées, on peut utiliser un modèle du type suivant (exemple pour 3 facteurs)[33] :

$$\begin{aligned} y_{mod} &= b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_3.x_3 + b_{11}.x_1.x_2 + b_{13}.x_1.x_3 + b_{23}.x_2.x_3 + b_{123}.x_1.x_2.x_3 \\ &= fx(x) . \beta \end{aligned} \quad (3.7)$$

Avec dans cet exemple :

$$fx(x) = [1 \quad x_1 x_2 x_3 \quad x_1 . x_2 \quad x_1 . x_3 \quad x_2 . x_3 \quad x_1 . x_2 . x_3] \quad (3.8)$$

$$\beta = [b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_{12} \quad b_{13} \quad b_{23} \quad b_{123}]' \quad (3.9)$$

Dans ce type de polynôme, chaque monôme de degré n est toujours la multiplication de n valeurs de facteurs principaux. Par exemple, il ne peut exister de terme de la forme $x_1 . x_2^2$

Le terme $fx(x)$ est un vecteur ligne dont les éléments comprennent les valeurs des k facteurs ainsi que leurs combinaisons possibles par multiplications mutuelles. Le vecteur β est le vecteur colonne des coefficients correspondants[33].

Ce modèle est implicitement associé au plan factoriel complet (screening), pour lequel toutes les interactions entre tous les facteurs sont calculées[36].

3.6 Outils d'analyse statistique des données

3.6.1 Analyse de la variance

Les plans présentés plus haut donnent la définition des expériences dans le domaine d'étude. Les valeurs des réponses en ces points doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur les variations constatées de la réponse. La principale méthode répondant à cet objectif est l'analyse de la variance.

L'analyse de la variance est appelée « Analysis of Variance » dans la littérature anglo-saxonne ; son appellation est couramment abrégée en ANOVA.

« D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième. »[32].

Les composantes factorielle et résiduelle seront mathématiquement représentées par des carrés moyens, c'est-à-dire des variances. En définitive, l'intérêt de l'analyse de variance est de pouvoir tester de manière absolue l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée[33].

La variance des facteurs s'obtient en calculant la somme des carrés des écarts (SCE) que l'on divise par le nombre de degrés de liberté (ddl) associé au facteur f considéré. Le nombre de degrés de liberté ddl_f associé à un facteur f est le nombre de niveaux (de valeurs distinctes) qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1. On a donc dans tous les cas :

$$ddl_i = Nn_i - 1 \quad (3.10)$$

Dans le cas des plans factoriels complets, on a l'égalité :

$$\prod_{i=1}^k Nn_i = N \quad (3.11)$$

La somme des carrés des écarts associée au facteur f vaut :

$$SCE_f = \gamma_f \cdot \sum_{i=0}^{Nn_f} (E_f|_{f=i})^2 = \gamma_f \cdot \sum_{i=0}^{Nn_i} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

Avec :

1. $\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses ;
2. $\gamma_f = \frac{N}{Nn_f}$ le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ses Nn_f niveaux (γ_f est identique pour tous les niveaux du facteur pour les plans orthogonaux) ;
3. \bar{y}_i la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son i^{eme} niveau.

Pour les interactions mettant en jeu les facteurs f et g , la somme des carrés des écarts vaut :

$$SCE_{fg} = \delta_{fg} \cdot \sum_{i=1}^{Nn_i} \sum_{j=1}^{Nn_j} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 \quad (3.13)$$

Avec :

1. $\delta_{fg} = \frac{N}{Nn_f \cdot Nn_g}$ le nombre d'expérience pour lesquelles le facteur f prend un de ses Nn_f niveaux et lorsque le facteur g adopte un de ses Nn_g niveaux ;
2. \bar{y}_{ij} la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son i^{eme} niveau, et où le facteur g prend son j^{eme} niveau ; lorsqu'il n'y a que 2 facteurs et aucune répétition d'expérience, on a $\bar{y}_{ij} = y_{ij}$.

Le calcul des degrés de liberté d'une interaction est le produit des ddl des facteurs mis en jeu dans cette interaction.

La généralisation aux interactions d'ordre supérieur se fait de la même façon.

On déduit alors la valeur des carrés moyens, associés au facteur ou à l'interaction considéré(e) x , comme étant :

$$S_{er}^2 = \frac{SCE_x}{ddl_x} \quad (3.14)$$

Pour 2 facteurs, on peut écrire la décomposition suivante :

$$y_{ij} - \bar{y} = (\bar{y}_i - \bar{y}) + (\bar{y}_j - \bar{y}) + (y_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}) \quad (3.15)$$

On réalise alors une somme sur i et j , des 2 côtés de l'égalité mis préalablement au carré. La somme se fait ainsi sur les niveaux de tous les facteurs. On aboutit alors à l'équation de variance, démontrant l'additivité des sommes des carrés des écarts (membre de droite) :

$$SCE_t = \sum_{i=1}^{Nn_i} \sum_{j=1}^{Nn_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum SCE_x \quad (3.16)$$

Avec :

1. SCE_t la somme des carrés des écarts totale ;
2. SCE_x (x désignant un facteur ou une interaction) la somme des carrés factorielle.

Enfin, notons la relation donnant entre autre la valeur de ddl_t : le nombre de degrés de liberté total :

$$ddl_t = \sum_{facteurs} ddl_i + \sum_{interactions} ddl_i \quad (3.17)$$

Il y a donc également additivité des ddl .

Pour les plans orthogonaux, on a $ddl_t = N - 1$.

3.6.2 Variance résiduelle

Lorsqu'il existe une erreur expérimentale non nulle, l'équation de variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément variance résiduelle (SCE_r) :

$$SCE_t = \sum SCE_x + SCE_r \quad (3.18)$$

La détermination de SCE_r est nécessaire puisqu'elle intervient dans les tests composant l'analyse de variance. En effet, c'est à cette variance résiduelle que les SCE_x sont comparées afin de déterminer les caractères significatifs des facteurs et des interactions x .

La variance résiduelle est un point de comparaison. Elle doit traduire une variation des valeurs de réponse, dont l'amplitude est arbitrairement considérée comme faible. Tout facteur influent doit donc posséder des caractéristiques fortement différenciées de celles de cette composante.

Dans le cas des expériences réelles, la variance résiduelle est prise comme étant un estimateur de la variance expérimentale, qui traduit la variabilité inhérente des résultats sur plusieurs réalisations d'expériences identiques. Cependant, l'utilisation d'expériences virtuelles exclut cette possibilité[32].

Dans le même temps, l'équation de variance doit toujours être vérifiée : la variance résiduelle (SCE_r) est dans tous les cas une composante de la somme des carrés des écarts totale (SCE_t).

La variance résiduelle est le plus souvent calculée comme étant la somme des carrés des résidus, i.e. des écarts entre réponses mesurées (y) et réponses calculées (y_{mod}) correspondantes . Il s'agit donc de :

$$SCE_r = \sum_{i=1}^N (y^{(i)x} - y_{mod}^{(i)x})^2 \quad (3.19)$$

${}^i x$ est le vecteur des coordonnées du $i^{ème}$ point d'expérience du plan.

Le nombre de degrés de liberté ddl_r associé vaut $N-p$. On comprend en effet que les résidus n'existent que grâce aux $N-p$ (>0) expériences réalisées en plus des p simulations absolument nécessaires au calcul des p coefficients du modèle.

On calcule donc un carré moyen résiduel tel que :

$$S_{res}^2 = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y^{(i)x} - y_{mod}^{(i)x})^2 \quad (3.20)$$

Calculer SCE_r de cette manière permet en définitive de tester le caractère significatif des facteurs et des interactions et dans le même temps d'évaluer la qualité du modèle utilisé (y_{mod}). Cette solution n'est pas applicable lors de l'utilisation de plans saturés (plans factoriels par exemple). Dans ces cas précis, certains auteurs ,proposent la construction de la variance résiduelle à partir des interactions dont les variances (carrés moyens) sont les plus faibles ; leurs valeurs doivent être du même ordre de grandeur[32].

Le calcul de la variance résiduelle (ou carrés moyens résiduels) peut alors s'écrire comme :

$$S_{res}^2 = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{\sum_i SCE}{\sum_i ddl} \quad (3.21)$$

Les sommes des carrés des écarts (SCE) et les nombres de degrés de liberté (ddl) se rapportant aux interactions choisies. Cette solution permet de retrouver la première écriture de l'équation de variance vue précédemment :

$$SCE_r = \sum SCE_x \quad (3.22)$$

$$= \sum SCE_{x'} + \underbrace{\sum SCE_{x''}}_{SCE_r} \quad (3.23)$$

De manière générale, si une telle variance résiduelle ne peut être construite, il est inutile de calculer l'ANOVA : ses résultats seraient inexploitable. Par exemple, si les effets des interactions sont du même ordre de grandeur que ceux des facteurs principaux, ce dernier mode de construction de SCE_r devient inapplicable car il n'est alors plus possible d'assimiler la variance construite à une composante résiduelle ou de bruit.

3.6.3 Test de Fisher-Snedecor

Le test de Fisher-Snedecor permet de comparer 2 variances, par utilisation de la loi statistique dite de Fisher (ou loi F). Celle-ci travaille sur un quotient de variances et prend en compte le nombre de degrés de liberté de chacune d'elles. Les variances concernées doivent être celles de variables aléatoires à distribution normale et à variances constantes. On calcule alors le ratio suivant, pour le facteur considéré

$$F = \frac{S_{res}^2}{S_{er}^2} \quad (3.24)$$

La variance associée au facteur ou à l'interaction étudié(e) S_{res}^2 peut être considérée comme égale à la variance résiduelle S_{er}^2 si le rapport F_{obs} est faible, On définit ainsi l'hypothèse statistique H_0 , selon laquelle l'affirmation précédente est vraie. Si c'est le cas[50,51], F_{obs} est alors une valeur observée d'une variable F de Fisher-Snedecor, à ddl_f et ddl_r degrés de liberté. L'hypothèse H_0 doit être rejetée au niveau α , lorsque :

$$P(F \geq F_{obs}) \leq \alpha \quad (3.25)$$

Ou, de manière équivalente, quand :

$$F_{obs} < F_{fisher,\alpha} \quad (3.26)$$

Dans ce cas le modèle mathématique est acceptable est peut décrire le phénomène en étude[50,51].

Synthèse

- L'analyse de la variance évalue la probabilité que les variances des termes à évaluer soient significativement différentes de la variance résiduelle.
- Ces résultats permettent donc de déterminer les facteurs et les interactions dont les probabilités sont inférieures à un niveau fixé arbitrairement. Selon ce niveau de signification, ces termes peuvent être rejetés, c'est-à-dire supprimés de l'étude.
- Cette opération est importante, car en diminuant le nombre de dimensions du problème, elle autorise et favorise l'utilisation de démarches coûteuses et généralement dépendantes du nombre de facteurs : il s'agit principalement de l'analyse de RSM et des optimisations par plans d'expériences.
- Le test de Fisher opéré dans l'ANOVA étant réalisé en prenant la variance résiduelle comme référence, ses résultats en dépendent. Ainsi, le nombre de facteurs rejetés peut être différent suivant le modèle calculé, et par voie de conséquence suivant le plan de screening réalisé.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DE FORAGE DANS LES CONDITIONS DE MINE DE DJEBEL ONK

4.1 Introduction

- Dans le langage scientifique, expérience signifie, fait attendu ou provoqué de manière à vérifier une hypothèse, une loi, un modèle et parvenir ainsi à une connaissance théorique de la façon dont se déroulent des phénomènes. Lors d'études expérimentales multiparamétriques, le nombre de variables peut être élevé. Les stratégies couramment employées pour mener à bien ces expérimentations sont souvent informelles, parfois quelque peu inutiles, et elles peuvent conduire à un nombre de résultats difficile à exploiter[37].
- Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, le scientifique peut avoir intérêt à recourir à des méthodes telles que les Plans d'Expériences (PE)[19].
- Le principe général des PE consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental sous investigation, tout en réussissant pourtant à appréhender le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Une difficulté importante de la méthodologie réside alors dans la manière de choisir les points d'études de façon optimale. Dans l'industrie, la connaissance de la méthode des PE apparaît aujourd'hui comme un préalable d'une part à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés[22], et d'autre part à la réduction des temps de développement. La méthode des PE permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. En résumé, les avantages les plus reconnus des PE sont :
 - L'efficacité, car seules les expériences indispensables sont réalisées.
 - L'exactitude : pour un effort expérimental donné, la plus grande exactitude possible sera atteinte.
 - Les interactions : les synergies existant entre les différents paramètres étudiés sont identifiées et mieux comprises[23].

D'une manière générale, un PE consiste à mettre en évidence et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

- Le facteur : une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié.
 - La réponse : la grandeur mesurée afin de connaître les effets des facteurs sur le système.
- Il convient bien sûr que la réponse soit représentative du phénomène observé.

La réponse du modèle de l'expérimentation ne pourra théoriquement pas être extrapolée à des

valeurs de paramètres situées en dehors du domaine d'étude.

Les valeurs quantitatives des réponses seront liées à des configurations particulières de l'expérimentation, et ne seront pas non plus forcément extrapolables à d'autres conditions de fonctionnement (par exemple, cas d'un changement de machine)[18].

4.2 Choix des facteurs et du domaine expérimental

C'est l'étape la plus importante dans la conduite d'un plan d'expérience[20]. Il faut :

- Sélectionner les paramètres, choisir les modalités et les interactions à étudier.
- Recenser les paramètres pouvant influencer la réponse.
- Identifier les interactions susceptibles d'être recherchées.
- Dissocier les facteurs principaux des facteurs bruits.
- Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs.

Dans les conditions de la mine de Djebel-Onk , les paramètres recensés influant sur le rendement des travaux de foration, sont multiples a savoir les propriétés divers des formations rocheuses(l'abrasivité, la dureté, humidité,...etc) ainsi que les paramètres de réglage de la machine de forage(couple de rotation, poussée axiale. Percussion, le soufflage des trous).

Dans le cadre de ce mémoire nous allons prendre trois paramètres juges comme les plus influant sur le rendement de la machine de forage.

Les paramètres en question sont :

- la pression de rotation de l'outil de forage (bar).
- la pression de poussée sur l'outil de forage (bar).
- la résistance a la compression de la roche (Mpa).

4.3 Les paramètres de la machine et du terrain a traversé

Dans les conditions de la mine de Djebel-Onk ; la machine de forage utilisée est de type Atlascopco. Roc L8 Dans ce type de machine le couple de rotation est contrôlé par le conducteur par un système de commande détaillé dans le chapitre précédant. La pression de ce couple de rotation varie entre 0-250 bar. De même la poussée exercée sur l'outil varie de 0-250 bar, alors que la résistance a la compression de la roche pour les différentes formations géologiques varie de 10-60 MPa. Les deux premiers paramètres sont considérer comme étant des variables contrôlables car ils font parties du mécanisme de commende de la machine, le conducteur peut ajuster le couple de rotation et la poussée exercée sur l'outil quand il considérera utile, le troisième est non contrôlable car il s'agit de la nature de terrain à forer ; les paramètres intrinsèques des roches sont constants.

- la pression de rotation de l'outil de forage [0..250] (bar).
- la pression de poussée sur l'outil de forage[0..250] (bar).
- la résistance a la compression de la roche [10..60] (Mpa)

Dans l'opération de forage et après le positionnement de la machine de forage l'outil commence la foration lorsque la pression de rotation et celui de poussée atteint 30 bar, et sa présente la limite inférieure (min) pour la pression de rotation ainsi que la pression de poussée tandis que pour des mesures de sécurité pour la machine de forage on prend comme limite supérieure 70 bar pour la pression de la rotation, mais pour la pression de poussée la limite supérieure est de 110 bar

4.3.1 Domaine d'étude possible (DEP)

le domaine d'étude (DE) soumis aux contraintes de position la où on peut réaliser les expériences est dans :

- la pression de rotation de l'outil de forage [30..70] (bar).
- la pression de poussée sur l'outil de forage [30..110] (bar).
- la résistance à la compression de la roche [10..60] (Mpa)

4.4 Détermination des variables

La détermination des différents paramètres de forage a été faite expérimentalement sur le site d'étude. Une campagne d'essais sur la machine de forage Roc L8, en considérant deux paramètres variables qui sont la poussée et la rotation. A cette fin plus de 40 trous de forage ont été réalisés sur les différentes formations rocheuses existantes soit plus de 600 mètres forés.

Concernant les roches du site plus de 50 échantillons ont été testés au laboratoire de géotechnique pour la détermination des paramètres mécaniques des différentes formations géologiques rencontrées.

Un paramètre important que nous avons négligé dans notre étude est la pression d'air comprimé de soufflage et de percussion, sa valeur est fixée à 18 bar dans tous les tests qu'on a réalisés.

4.5 les essais expérimentaux

4.5.1 Détermination des propriétés mécaniques des roches

La résistance à la compression des roches varie de 10-60 MPa, obtenue suite aux essais réalisés au laboratoire de géotechnique par essai de Franklin; le tableau suivant illustre les valeurs de résistances à la compression pour chaque type de roches.

TAB. 4.1 – résistance à la compression des différentes roches

RC(MPa)	Essai de FranklinKN	Formation rocheuses
10	785	Calcaire gypseux
60	5000	Calcaire phosphate siliceux
20	1785	Calcaire phosphate blanc
17	1350	Calcaire phosphate noir
30	2400	Phosphate

4.5.2 Essais Sur La Machine De Forage ATLAS-COPCO ROC L8

Suite a l'étude géologique réalisée dans les conditions de la mine de djebel-onk montrant une stratigraphie des différentes couches a fore.de ce fait nous allons procéder aux calcul du taux de pénétration de l'outil de forages pour chaque strate .on changeant la pression de rotation avec une pression de poussée constante dune part et d'autre part on variant la pression de poussée avec une pression de rotation constante.

Le taux de pénétration de l'outil de forage est calcule par la formule suivante,

$$PR = \frac{H}{t} = \frac{\text{profondeur foree}}{\text{le temps}} \quad (m/\text{min}) \quad (4.1)$$

La foreuse a été équipée par un outil de type D.T.H de 165 mm de diamètre et des tubes de forage de diamètre extérieur de 90 mm et de longueur de 6 m.Le temps de forage a été mesuré en utilisant un chronomètre.

Les résultats obtenus sont mentionnées dans les tableaux suivants

TAB. 4.2 – Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les calcaires gypseux de résistance 10 MPa

Rotation(bar)	Poussée(bar)	épaisseur de la couche(m)	Temps de pénétration(sec)	PR(m/min)
30	110	3	72	2.5
30	110	3.5	91	2.3
30	110	3	75	2.4
30	70	8	331	1.45
30	110	4.8	98	2.95
50	110	4	81	2.95
50	70	7	194	2.17
70	70	3.5	72	2.9
70	110	5	86	3.5
70	30	5	136	2.2
70	30	4.5	117	2.3
70	30	4.5	113	2.4

TAB. 4.3 – Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Calcaires phosphatés blanc de résistance 20 MPa

Rotation(bar)	Poussée(bar)	épaisseur de la couche(m)	Temps de pénétration(sec)	PR(m/min)
50	70	4.5	132	2.05
50	90	5.5	137	2.41
30	70	4	173	1.39
30	90	6	197	1.83
70	90	5	100	2.99
70	30	4.5	126	2.14
70	50	4.6	102	2.71
70	70	5.8	106	3.28

TAB. 4.4 – Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Calcaires phosphatés noir de résistance 17 MPa

Rotation(bar)	Poussée(bar)	épaisseur de la couche(m)	Temps de pénétration(sec)	PR(m/min)
30	30	4.5	540	0.5
30	70	4	171	1.4
30	110	3.4	88	2.31
30	90	5.5	177	1.86
50	90	5	122	2.46
50	70	5	107	2.8
70	90	5	98	3.05
70	30	4.5	124	2.18
70	50	3.8	83	2.76
70	70	7	152	2.76

TAB. 4.5 – Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les Phosphates de résistance 30 MPa

Rotation(bar)	Poussée(bar)	épaisseur de la couche(m)	Temps de pénétration(sec)	PR(m/min)
30	30	6	720	0.5
30	70	6	271	1.33
30	110	6	167	2.16
30	90	6	206	1.75
50	90	6	159	2.27
70	90	6	129	2.79
70	30	6	187	1.92
70	50	6	143	2.52

TAB. 4.6 – Optimisation du régime de fonctionnement de la sondeuse ATLAS-COPCO Roc L8 dans les P Calcaire phosphaté siliceux de résistance 60 MPa

Rotation(bar)	Poussée(bar)	épaisseur de la couche(m)	Temps de pénétration(sec)	PR(m/min)
30	30	6	720	0.5
30	70	5.5	284	1.16
30	110	5	165	1.82
30	110	4	130	1.84
30	110	5	142	2.11
30	110	5	142	2.11
30	110	5	167	1.8
30	90	7	282	1.49
50	90	5.5	180	1.83
70	90	6.8	188	2.17
70	30	7	280	1.5
70	50	6.8	209	1.95
70	70	3	90	2

4.5.3 Poussée variable vitesse constante

Le tableau 4.7 présente les différentes valeurs de pénétration de l'outil dans les différentes formations rocheuses, on variant la vitesse de rotation.

TAB. 4.7 – variation de la poussée axiale sur l'outil de forage

PR(m/min)avec une variation de pression de rotation			Poussée(bar)	Resistancede la roche(MPa)
Rotation(70bar)	Rotation(50bar)	Rotation(30bar)		
2.3	1.4	0.5	30	10
2.9	2.7	1.45	70	10
3.5	2.95	2.4	110	10
2.8	1.34	0.5	30	17
2.76	2.08	1.4	70	17
3.34	2.83	2.31	110	17
2.14	1.32	0.5	30	20
2.71	2.05	1.39	70	20
3.28	2.78	2.28	110	20
1.92	1.24	0.5	30	30
2.52	1.92	1.33	70	30
3.06	2.61	2.16	110	30
1.5	1	0.5	30	60
1.95	1.55	1.16	70	60
2.4	2.11	1.82	110	60

4.5.4 Vitesses de rotation variable pression constante

Le tableau 4.8 présente les différentes valeurs de pénétration de l'outil dans les différentes formations rocheuses, on variant la vitesse de rotation.

TAB. 4.8 – variation de la vitesse de rotation de l'outil de forage

PR(m/min)avec une variation de pression de poussée			Rotation(bar)	Resistancede la roche(MPa)
poussée(110bar)	poussée(90bar)	poussée(70bar)		
2.4	1.92	1.45	30	10
2.95	2.50	2.17	50	10
3.5	3.2	2.9	70	10
2.31	1.86	1.4	30	17
2.83	2.46	2.08	50	17
3.34	3.05	2.76	70	17
2.28	1.83	1.39	30	20
2.78	2.41	2.05	50	20
3.28	2.99	2.71	70	20
2.16	1.75	1.33	30	30
2.61	2.27	1.92	50	30
3.06	2.79	2.52	70	30
1.82	1.49	1.16	30	60
2.11	1.83	1.55	50	60
2.4	2.17	1.95	70	60

4.6 corrélation entre les variables

Pour trouver une corrélation entre les variables utilisées dans les différentes expériences qu'on a menée sur terrain, la loi de PEARSON est un outil efficace pour confirmer cette corrélation, la formule suivante nous donne le coefficient de corrélation (r) :

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (4.2)$$

Corrélation entre la pression exercée sur l'outil (Bar) et Taux de pénétration (m/min) pour les différentes roches (r') : C'est la valeur de référence prise du tableau de PEARSON.

La condition de corrélation de PEARSON : il faut que $(r) > (r')$

Corrélation entre la pression de poussée(x) et le taux de pénétration(y) dans la couche de calcaire phosphaté blanc.

TAB. 4.9 – Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc

N°	x	y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	50.000	1.370	-30.000	-0.399	900.000	0.159	11.957
2	60.000	1.780	-20.000	0.011	400.000	0.000	-0.229
3	70.000	1.730	-10.000	-0.039	100.000	0.001	0.386
4	80.000	1.760	0.000	-0.009	0.000	0.000	0.000
5	90.000	1.800	10.000	0.031	100.000	0.001	0.314
6	100.000	1.930	20.000	0.161	400.000	0.026	3.229
7	110.000	2.010	30.000	0.241	900.000	0.058	7.243
Σ	560.000	12.380			2800.000	0.246	22.900

x : Pression exercée sur l'outil (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=80$ $\bar{y} = 1.769$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.873$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON $r' = 0.754$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure 1.

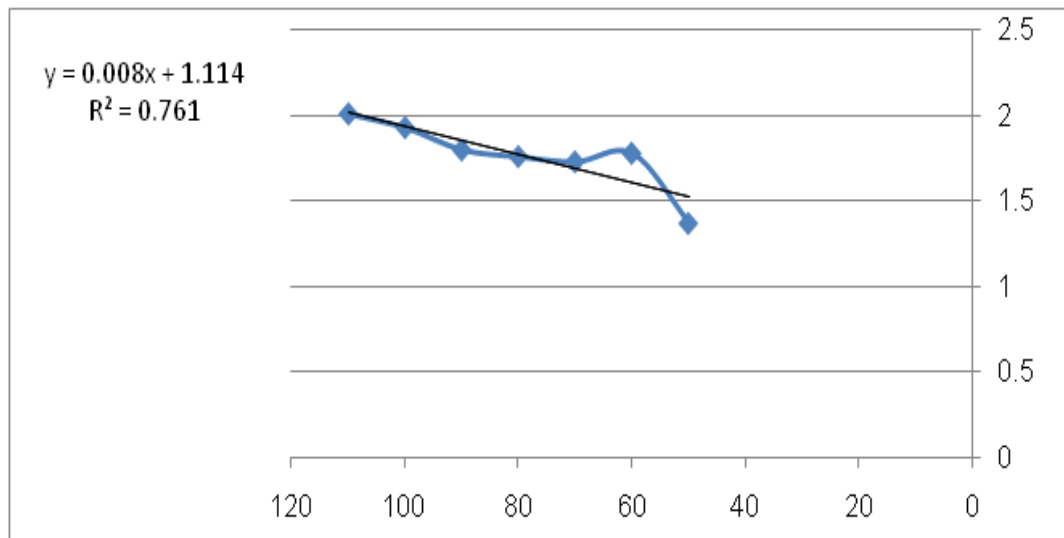


FIG. 4.1 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté blanc.

Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire gypseux

TAB. 4.10 – Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire gypseux

N°	x	y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	50.000	1.720	-30.000	-0.611	900.000	0.374	18.343
2	60.000	2.000	-20.000	-0.331	400.000	0.110	6.629
3	70.000	2.400	-10.000	0.069	100.000	0.005	-0.686
4	80.000	1.900	0.000	-0.431	0.000	0.186	0.000
5	90.000	1.800	10.000	-0.531	100.000	0.282	-5.314
6	100.000	3.000	20.000	0.669	400.000	0.447	13.371
7	110.000	3.500	30.000	1.169	900.000	1.366	35.057
Σ	560.000	16.320			2800.000	2.769	67.400

x : Pression exercée sur l'outil (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=80$ $\bar{y} = 2.331$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.785$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON $r' = 0.754$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure 2.

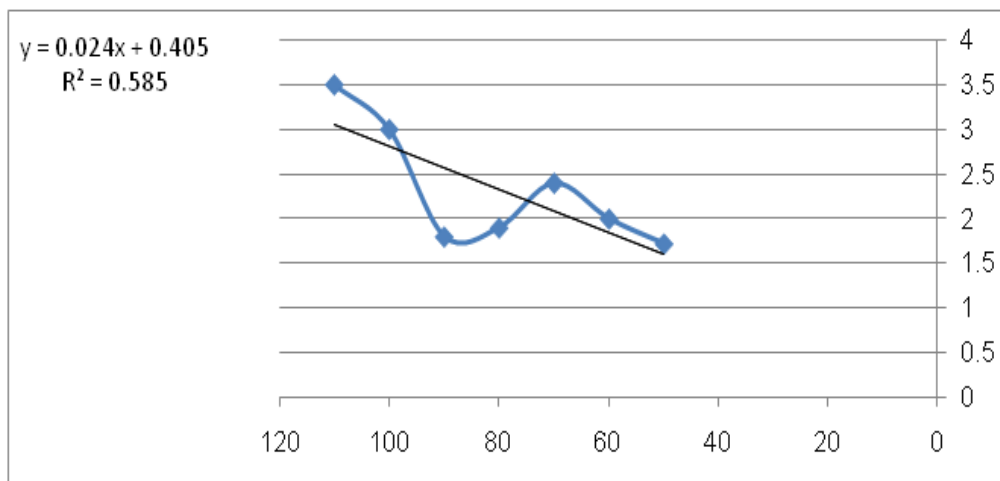


FIG. 4.2 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire gypseux

Corrélation entre la pression de poussée (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de Couche de calcaire phosphaté siliceux

TAB. 4.11 – Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire phosphaté siliceux

N°	X	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	30.000	1.690	-30.000	-0.417	900.000	0.174	12.514
2	40.000	1.900	-20.000	-0.207	400.000	0.043	4.143
3	50.000	2.370	-10.000	0.263	100.000	0.069	-2.629
4	60.000	1.980	0.000	-0.127	0.000	0.016	0.000
5	70.000	2.370	10.000	0.263	100.000	0.069	2.629
6	80.000	2.000	20.000	-0.107	400.000	0.011	-2.143
7	90.000	2.440	30.000	0.333	900.000	0.111	9.986
Σ	420.000	14.750			2800.000	0.494	24.500

x : Pression exercée sur l'outil (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=60$ $\bar{y} = 2.107$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.659$.

Cette valeur est inférieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON

$r' = 0.754$. Qui ne vérifie pas la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure 3.

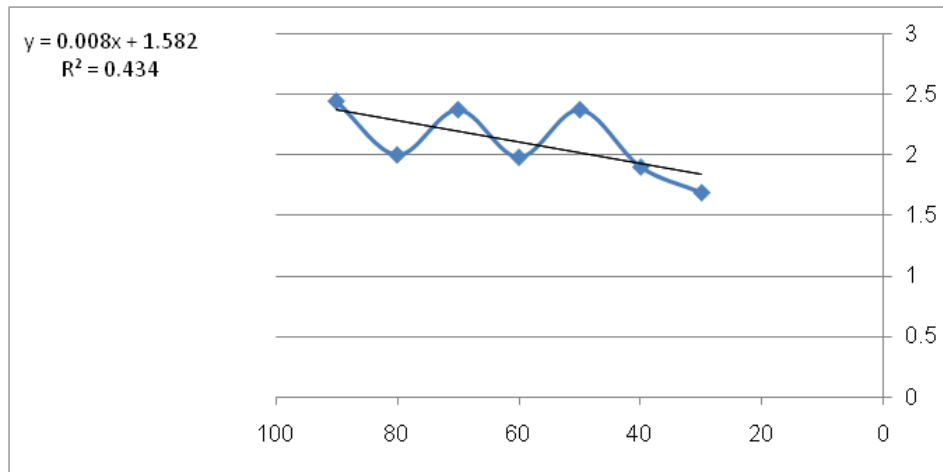


FIG. 4.3 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté siliceux

Corrélation entre la pression de poussée(x) et le taux de pénétration(y) dans la couche de calcaire phosphaté noire.

TAB. 4.12 – Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté noire

N°	X	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	30.000	0.500	-25.000	-0.805	625.000	0.648	20.125
2	40.000	0.600	-15.000	-0.705	225.000	0.497	10.575
3	50.000	1.440	-5.000	0.135	25.000	0.018	-0.675
4	60.000	1.800	5.000	0.495	25.000	0.245	2.475
5	70.000	1.800	15.000	0.495	225.000	0.245	7.425
6	80.000	1.690	25.000	0.385	625.000	0.148	9.625
Σ	330.000	7.830			1750.000	1.802	49.550

x : Pression exercée sur l'outil (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=55$ $\bar{y} = 1.3050$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.882$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON

$r' = 0.811$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure4.

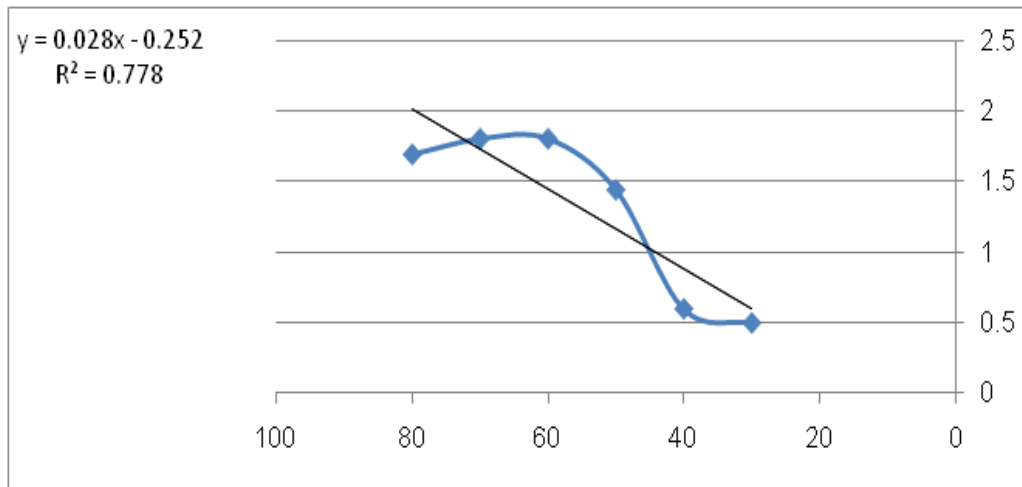


FIG. 4.4 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté noire

Corrélation entre la pression de poussée (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de phosphate.

TAB. 4.13 – Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de phosphate

N°	X	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	35.000	1.250	-19.286	-0.590	371.939	0.348	11.379
2	40.000	1.670	-14.286	-0.170	204.082	0.029	2.429
3	45.000	1.660	-9.286	-0.180	86.224	0.032	1.671
4	50.000	1.990	-4.286	0.150	18.367	0.023	-0.643
5	60.000	1.900	5.714	0.060	32.653	0.004	0.343
6	70.000	1.910	15.714	0.070	246.939	0.005	1.100
7	80.000	2.500	25.714	0.660	661.224	0.436	16.971
Σ	380.000	12.880			1621.429	0.876	33.250

x : Pression exercée sur l'outil (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=54.286$ $\bar{y} = 1.840$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.882$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON $r' = 0.811$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure5.

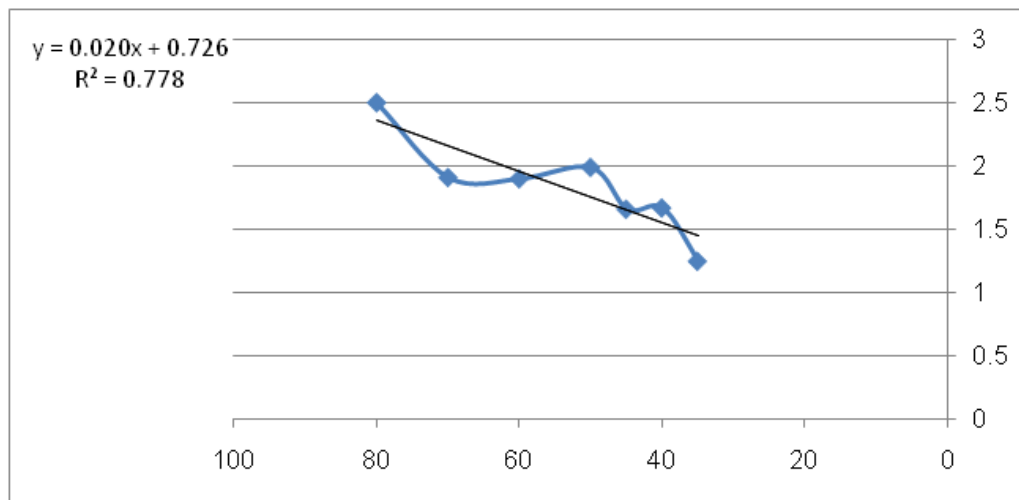


FIG. 4.5 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de phosphate.

Corrélation entre la vitesse de rotation (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de phosphate.

TAB. 4.14 – Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de phosphate

N°	X	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	35.000	1.250	-15.000	-0.677	225.000	0.458	10.150
2	40.000	1.770	-10.000	-0.157	100.000	0.025	1.567
3	45.000	1.760	-5.000	-0.167	25.000	0.028	0.833
4	50.000	1.990	0.000	0.063	0.000	0.004	0.000
5	60.000	1.990	10.000	0.063	100.000	0.004	0.633
6	70.000	2.800	20.000	0.873	400.000	0.763	17.467
Σ	300.000	11.560			850.000	1.281	30.650

x : pression de rotation en (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=50$ $\bar{y} = 1.927$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.929$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON

$r' = 0.811$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure6

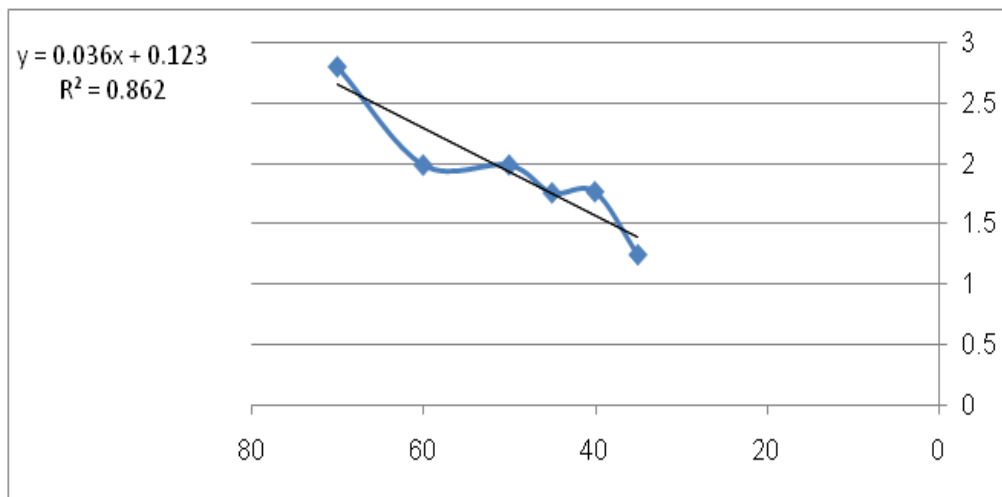


FIG. 4.6 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de phosphate.

Corrélation entre la vitesse de rotation (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de calcaire phosphaté blanc

TAB. 4.15 – Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc.

N°	x	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	30.000	0.500	-20.000	-1.028	400.000	1.057	20.560
2	40.000	1.440	-10.000	-0.088	100.000	0.008	0.880
3	50.000	1.800	0.000	0.272	0.000	0.074	0.000
4	60.000	1.900	10.000	0.372	100.000	0.138	3.720
5	70.000	2.000	20.000	0.472	400.000	0.223	9.440
Σ	50.000	1.528			1000.000	1.500	34.600

x : pression de rotation en (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=50$ $\bar{y} = 1.528$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.893$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON

$r' = 0.878$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure7

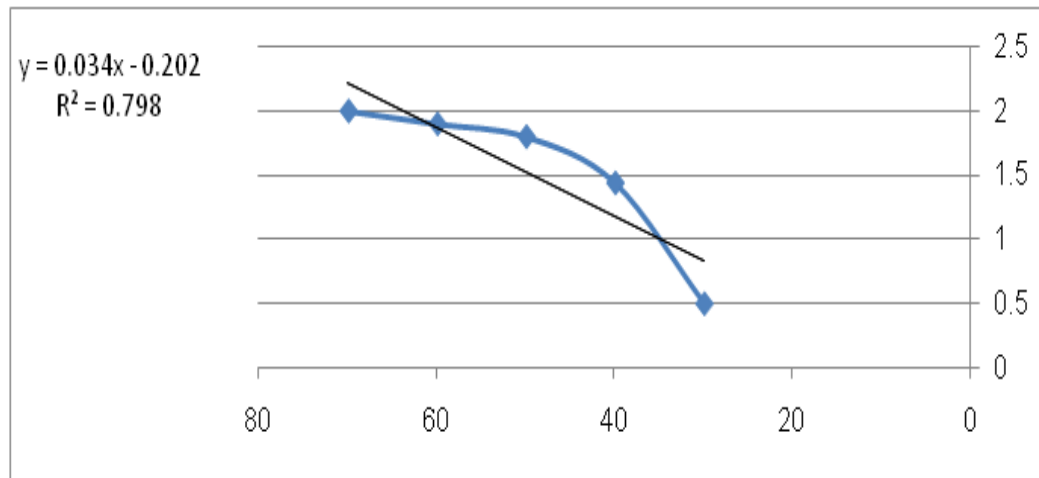


FIG. 4.7 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire phosphate blanc.

Corrélation entre la vitesse de rotation (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de calcaire phosphaté siliceux

TAB. 4.16 – Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté siliceux

N°	x	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	30.000	1.690	-20.000	-0.108	400.000	0.012	2.160
2	40.000	2.370	-10.000	0.572	100.000	0.327	-5.720
3	50.000	1.930	0.000	0.132	0.000	0.017	0.000
4	60.000	1.500	10.000	-0.298	100.000	0.089	-2.980
5	70.000	1.500	20.000	-0.298	400.000	0.089	-5.960
Σ	250.000	8.990			1000.000	0.534	-12.500

x : pression de rotation en (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=50$ $\bar{y} = 1.798$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.541$

Cette valeur est inférieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON

$r' = 0.878$. Qui ne vérifie pas la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure8

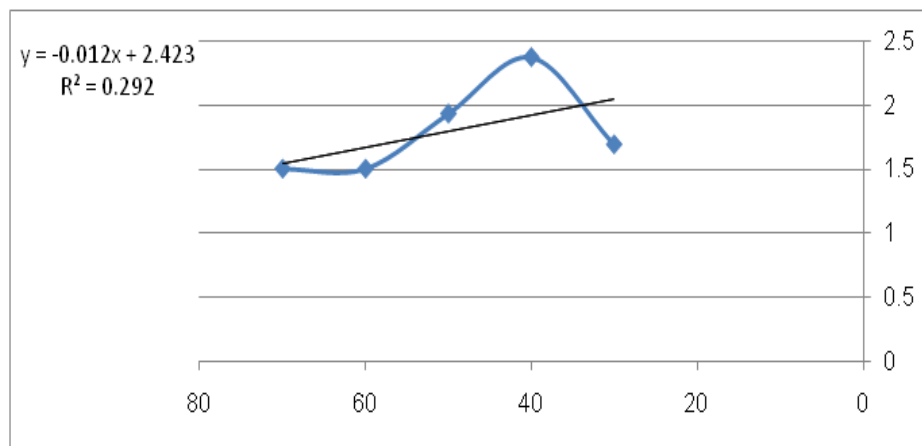


FIG. 4.8 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire phosphaté siliceux

Corrélation entre la vitesse de rotation (x) et le taux de pénétration (y) dans la couche de calcaire gypseux

TAB. 4.17 – Corrélation entre la vitesse de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire gypseux

N°	X	Y	$x - \bar{x}$	$y - \bar{y}$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	30.000	1.780	-20.000	-1.044	400.000	1.090	20.880
2	40.000	2.920	-10.000	0.096	100.000	0.009	-0.960
3	50.000	2.920	0.000	0.096	0.000	0.009	0.000
4	60.000	3.000	10.000	0.176	100.000	0.031	1.760
5	70.000	3.500	20.000	0.676	400.000	0.457	13.520
Σ	50.000	14.120			1000.000	1.596	35.200

x : pression de rotation en (bar)

y : Taux de pénétration (m/min)

Avec : $\bar{x}=50$ $\bar{y} = 2.824$

D'où la valeur du coefficient de corrélation $r = 0.880$.

Cette valeur est supérieure à la valeur de référence prise du tableau de PEARSON $r' = 0.878$. Qui vérifie la condition de corrélation linéaire de PEARSON figure9

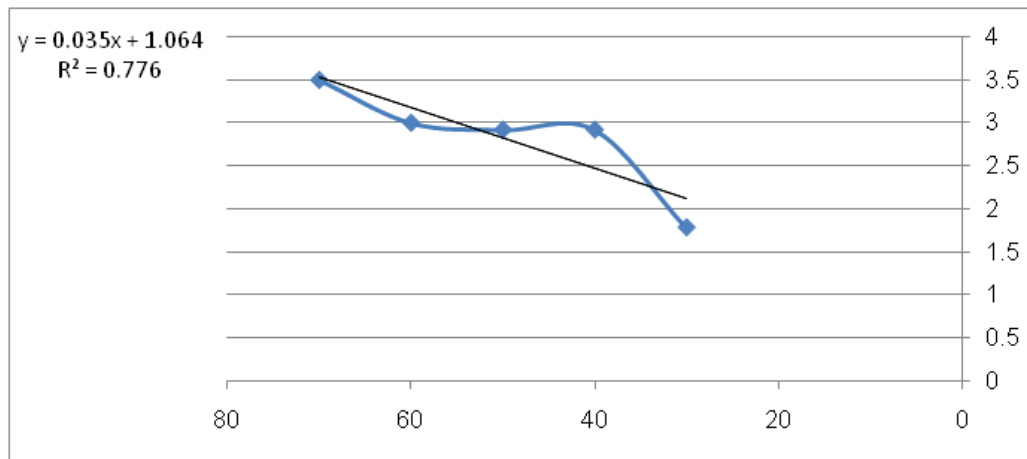


FIG. 4.9 – la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation dans la couche de calcaire gypseux

4.7 Corrélation des variable continues dans les conditions de la mine de Djebel-Onk

Le tableau suivant nous donne la corrélation des variables continues avec le taux de pénétration considéré comme fonction objective dans notre cas d'étude, dans les deux cas cités ci-dessus (vitesse variable-pression constante et pression variable-vitesse constante).

TAB. 4.18 – corrélation pour les différentes couches entre pression de rotation en bar et Taux de pénétration (m/min)

Couche	(r)	(r')	Corrélation
calcaire phosphate	0.873	0.754	<u>Oui</u>
calcaire gypseux	0.765	0.754	<u>Oui</u>
calcaire phosphate siliceux	0.659	0.754	<u>Non</u>
calcaire phosphate	0.882	0.811	<u>Oui</u>
phosphate	0.882	0.811	<u>Oui</u>

TAB. 4.19 – corrélation pour les différents couches entre pression de poussée en bar et Taux de pénétration (m/min)

Couche	(r)	(r')	Corrélation
calcaire phosphate	0.893	0.878	<u>Oui</u>
calcaire gypseux	0.881	0.878	<u>Oui</u>
calcaire phosphate siliceux	-0.541	0.878	<u>Non</u>
calcaire phosphate	0.929	0.811	<u>Oui</u>
phosphate	0.882	0.811	<u>Oui</u>

4.8 Optimisation des paramètres de forage par la méthode des plans d'expériences

Les résultats obtenues suite aux expériences réalisées sur terrain ne peuvent être significatives que si un model est défini. A cette fin nous allons essayer d'établir un model mathématique pour faciliter l'optimisation des paramètres de forage dans les conditions de la mine de Djebel-Onk.[60 :65]

4.8.1 Détermination des facteurs

Le tableau 4.20 : présente les différents facteurs pris en considération dans les conditions de la mine de Djebel-Onk[32].

TAB. 4.20 – les facteurs

Facteurs	niveau du domaine	
	Min= -1	Max= +1
pression de rotation en bar (X_1)	30	70
pression exercée sur l'outil Bar (X_2)	30	110
La résistance a la compression MPa (X_3)	10	60

TAB. 4.21 – matrice de planification

	X_0	FACTEURS			INTERACTIONS				REPONCESY	B
		X_1	X_2	X_3	$X_1..X_2$	$X_1..X_3$	$X_2..X_3$	$X_1..X_2..X_3$		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0.5	1.865
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	2.3	0.56
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	2.4	0.665
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	3.5	-0.31
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0.5	-0.14
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1.5	-0.165
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1.82	-0.11
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2.4	0.035

4.8.2 Détermination de la fonction objective

La fonction objective que nous allons adoptée pour les conditions de la mine de Djebel-Onk, est de maximiser le taux de pénétration de l'outil de forage le y_{mod} .

$$y_{mod} = b_0 + b_1.x_1 + b_2.x_2 + b_3.x_3 + b_{11}.x_1.x_2 + b_{13}.x_1.x_3 + b_{23}.x_2.x_3 + b_{123}.x_1.x_2.x_3 \quad (4.3)$$

La première étape de calcul est la détermination des réponses $y^{(ix)}$ à partir des essais réalisés sur terrain, montrées dans les tableaux ci-dessus.

La deuxième étape de calcul est la détermination des différents coefficients (b_i) de la fonction objective

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^{(ix)} \quad (4.4)$$

$$b_0 = 0.5 + 2.3 + 3.5 + 2.4 + 1.82 + 2.4 + 1.5 + 0.5 = 1.865$$

$$b_1 = -0.5 - 2.3 + 3.5 - 2.4 + 1.82 - 2.4 + 1.5 - 0.5 = 0.56$$

$$b_2 = -0.5 - 2.3 + 3.5 + 2.4 - 1.82 - 2.4 + 1.5 + 0.5 = 0.665$$

$$b_3 = -0.5 - 2.3 - 3.5 - 2.4 + 1.82 + 2.4 + 1.5 + 0.5 = -0.31$$

$$b_4 = 0.5 - 2.3 - 3.5 + 2.3 + 1.82 - 2.4 - 1.5 + 0.5 = -0.14$$

$$b_5 = 0.5 - 2.3 + 3.5 - 2.4 - 1.82 + 2.4 - 1.5 + 0.5 = -0.165$$

$$b_6 = 0.5 + 2.3 - 3.5 - 2.4 - 1.82 - 2.4 + 1.5 + 0.5 = -0.11$$

$$b_7 = -0.5 + 2.3 + 3.5 - 2.4 + 1.82 - 2.4 - 1.5 + 0.5 = 0.035$$

b_0 : la moyenne des réponses mesurées y des N expériences du plan

x_1 : la valeur codée de la variable continue (identificateur de la pression de rotation) (bar)

x_2 : la valeur codée de la variable continue (identificateur de la pression sur l'outil) (bar)

x_3 : la valeur codée de la variable discrète (identificateur de la nature des roches à forer)

Y_i : La valeur du taux de pénétration pour la $i^{\text{ème}}$ combinaison (la réponse) (m/min)

B_i : Les coefficients de corrélation

y_{mod} : La fonction objective (c'est le taux de pénétration de l'outil de forage) (m/min)

La fonction objective dans les conditions de la mine de Djebel-Onk s'écrit comme suit :

$$y_{\text{mod}} = 1.865 + 0.56.x_1 + 0.665.x_2 - 0.31.x_3 - 0.14.x_1.x_2 - 0.165.x_1.x_3 - 0.11.x_2.x_3 + 0.035.x_1.x_2.x_3 \quad (4.5)$$

4.8.3 Analyse du modèle obtenu :

L'examen du modèle mathématique obtenu formule (4.5), montre que la valeur quantitative de b_0 caractérise la valeur de la variable fictive X_0 tandis que les valeurs quantitatives de b_1, b_2 et b_3 nous montrent la force d'influence des variables X_1, X_2 et X_3 sur le taux de pénétration de l'outil de forage respectivement. Les coefficients b_{11}, b_{13}, b_{23} et b_{123} montrent la force d'influence de l'interaction des variables X_1 et X_2, X_1 et X_3, X_2 et X_3 et x_1, X_2 et X_3 . Le signe « plus » signifie que l'augmentation d'un facteur « xi » entraîne celle du taux de pénétration de l'outil de forage. Le signe « moins » témoigne de l'effet contraire.

Dans le cas envisagé c'est b_1 et b_2 qui ont les valeurs quantitatives les plus grandes (0.56 et 0.665). Donc, suivant l'augmentation de la pression de rotation et la pression sur l'outil, le taux de pénétration de l'outil de forage s'accroîtra très vivement. L'augmentation de la nature des roches à forer X_3 affectée d'un coefficient négatif b_3 (-0.31), entraînera la diminution du taux de pénétration de l'outil de forage. Les valeurs des coefficients des interactions ($X_1.X_2, x_1.X_3$ et $X_2.X_3$) sont deux fois approximativement plus grandes que b_3 c'est-à-dire, l'accroissement de l'effet de l'interaction entraînera la diminution du taux de pénétration de l'outil de forage deux fois moins grand que l'augmentation de la nature des roches. L'accroissement de l'interaction

X_1, X_2, X_3 entrainera l'augmentation du taux de pénétration de l'outil de forage, mais ce facteur n'influe sur le taux de pénétration de l'outil de forage que dans une mesure faible.

4.8.4 Analyse statistique de la fonction objective

L'opération principale dans le plan d'expérience est de procéder à des répétitions des essais dans les mêmes conditions pour minimiser les erreurs expérimentales. A cette fin nous avons réalisé trois expériences parallèles pour chaque essai. La formule suivante donne la valeur moyenne arithmétique pondérée des essais parallèles[50,51].

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \times D_i)}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (4.6)$$

n : nombre d'expériences parallèles $i=1..3$.

N : nombre de combinaison.

D_i : La profondeur forée de la $i^{\text{ème}}$ couche.

y_i : Le taux de pénétration mesuré sur la $i^{\text{ème}}$ couche.

y_{mod} : Le taux de pénétration calculé à partir de la fonction objective.

TAB. 4.22 – valeurs des variables statistiques traitées dans les condition de la mine de Djebel-Onk

N	n	y_i	D	$y_i \times D$	$y_i - \bar{y}$	\bar{y}	$(y_i - \bar{y})^2$	y_{mod}	$(y_i - y_{mod})^2$
1	1	0.7	3.5	2.45	0.24	0.46	0.0576	0.53	0.0289
	2	0.5	3	1.5	0.04	0.46	0.0016	0.53	0.0009
	3	0.3	6	1.8	-0.16	0.46	0.0256	0.53	0.0529
	\sum	-	12.5	5.75	-	-	0.0848	-	0.0827
2	1	2.2	5	11	-0.0964286	2.29642857	0.009298469	2.27	0.0049
	2	2.3	4.5	10.35	0.00357143	2.29642857	1.27551E-05	2.27	0.0009
	3	2.4	4.5	10.8	0.10357143	2.29642857	0.010727041	2.27	0.0169
	\sum	-	14	32.15	-	-	0.020038265	-	0.0227
3	1	3.2	3.5	11.2	-0.3103448	3.51034483	0.096313912	3.53	0.1089
	2	3.8	4	15.2	0.28965517	3.51034483	0.083900119	3.53	0.0729
	3	3.5	7	24.5	-0.0103448	3.51034483	0.000107015	3.53	0.0009
	\sum	-	14.5	50.9	-	-	0.180321046	-	0.1827
4	1	2.5	3	7.5	0.10526316	2.39473684	0.011080332	2.37	0.0169
	2	2.3	3.5	8.05	-0.0947368	2.39473684	0.008975069	2.37	0.0049
	3	2.4	3	7.2	0.00526316	2.39473684	2.77008E-05	2.37	0.0009
	\sum	-	9.5	22.75	-	-	0.020083102	-	0.0227
5	1	1.84	4	7.36	0.02142857	1.81857143	0.000459184	1.85	0.0001
	2	1.82	5	9.1	0.00142857	1.81857143	2.04082E-06	1.85	0.0009
	3	1.8	5	9	-0.0185714	1.81857143	0.000344898	1.85	0.0025
	\sum	-	14	25.46	-	-	0.000806122	-	0.0035
6	1	2	3	6	-0.5741935	2.57419355	0.329698231	2.37	0.1369
	2	2.2	4.5	9.9	-0.3741935	2.57419355	0.140020812	2.37	0.0289
	3	3	8	24	0.42580645	2.57419355	0.181311134	2.37	0.3969
	\sum	-	15.5	39.9	-	-	0.651030177	-	0.5627
7	1	1.5	7	10.5	-0.0047619	1.5047619	2.26757E-05	1.53	0.0009
	2	1.6	7.5	12	0.0952381	1.5047619	0.009070295	1.53	0.0049
	3	1.4	6.5	9.1	-0.1047619	1.5047619	0.010975057	1.53	0.0169
	\sum	-	21	31.6	-	-	0.020068027	-	0.0227
8	1	0.5	5.8	2.9	-0.0028902	0.50289017	8.3531E-06	0.53	0.0009
	2	0.4	5.5	2.2	-0.1028902	0.50289017	0.010586388	0.53	0.0169
	3	0.6	6	3.6	0.09710983	0.50289017	0.009430318	0.53	0.0049
	\sum	-	17.3	8.7	-	-	0.020025059	-	0.0227

4.9 Test de validité du model mathématique

Pour que le model mathématique soit représentatif, il faut qu'il soit testé statistiquement par le teste de Student et le teste de Fischer. A cette fin nous allons calculer la variance répétitive et la variance résiduelle.

4.9.1 Teste de Student.

Le test t, ou test de Student désigne un ensemble de tests d'hypothèse paramétriques où la statistique calculée suit une loi de Student lorsque l'hypothèse nulle est vraie. Un test t peut être utilisé notamment pour tester statistiquement l'hypothèse d'égalité de deux moyennes

$$t_{bI} = \frac{|b_I|}{S_{bI}} > t_{t(q,f)} \quad (4.7)$$

4.9.2 Calcul de la variance répétitive

$$S_{er} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{(n-1) \times N}} \quad (4.8)$$

Avec :

n : Le nombre de répétition $n = 3$.

N : Le nombre de combinaisons dans le plan d'expérience $N = 8$.

y_i : la réponse mesurée du $i^{\text{ème}}$ répétition.

\bar{y} : C'est la moyenne arithmétique pondérée.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \times D_i)}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (4.9)$$

D_i : L'épaisseur de la couche à forée dans la $i^{\text{ème}}$ répétition de l'essai.

Donc la variance répétitive calculée à partir des données statistiques est de :

$$S_{er} = 0.24964622$$

Calcul de la dispersion des coefficients du model

$$S_{bI}^2 = \frac{S_{er}^2}{N \times n} \quad (4.10)$$

Ou

$$S_{bI} = \sqrt{\frac{S_{er}^2}{N \times n}} \quad (4.11)$$

$$S_{bI} = 0.050958822$$

Condition du teste de Student [50,51]

$$t_{bI} = \frac{|b_I|}{S_{bI}} > t_{t(q,f)} \quad (4.12)$$

t_{bI} : Rapport entre les coefficients du model et la dispersion des coefficients du modèle

$t_{t(q,f)}$: Valeur de référence tirée du tableau de Student.

$$q = 0.05\%$$

f : Le degré de liberté

$$f = (N \times n) - m [50,51]$$

$$f = (8 \times 3) - 4 = 24 - 4 = 20$$

$m = k + 1 = 3 + 1 = 4$ avec k : c'est le nombre de facteurs.

$$t_{t(q,f)} = 2.08 \text{ avec } q = 0 : 05; f = 20 \quad \text{D'après le tableau de Student}$$

Le tableau suivant nous donne le degré de signification des coefficients du model par le teste de Student .

TAB. 4.23 – teste des coefficients du model par la condition de Student.

	S_{er}	S_{bI}	bI	t_{bI}	$t_{t(q,f)}$	$t_{bI} > t_{t(q,f)}$
b_0	0.24964622	0.05095882	1.865	36.5981771	2.08	Significatif
b_1	0.24964622	0.05095882	0.56	10.989265	2.08	Significatif
b_2	0.24964622	0.05095882	0.665	13.0497522	2.08	Significatif
b_3	0.24964622	0.05095882	0.31	6.08334311	2.08	Significatif
b_4	0.24964622	0.05095882	0.14	2.74731624	2.08	Significatif
b_5	0.24964622	0.05095882	0.165	3.23790843	2.08	Significatif
b_6	0.24964622	0.05095882	0.11	2.15860562	2.08	Significatif
b_7	0.24964622	0.05095882	0.035	0.68682906	2.08	Non Significatif

Synthèse

b_7 n'est pas Significatif donc on néglige l'interaction des facteurs $X_1X_2X_3$ du modèle.

Le modèle devient :

$$y_{mod}=1.865+0.56.x_1+0.665.x_2 - 0.31.x_3 - 0.14.x_1.x_2 - 0.165.x_1.x_3 - 0.11.x_2.x_3 \quad (4.13)$$

4.9.3 Teste de Fischer

Le test de Fisher, ou test F, est un test d'hypothèse statistique qui permet de tester l'égalité de deux variances en faisant le rapport des deux variances et en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique que l'on cherche dans la table de Fisher.

Remarque : on place au numérateur la plus grande des deux variances.

Le résultat peut être exprimé en pourcentage. Par exemple un F de 94 % ou 0,94 signifie que les deux variances sont très proches. Si F est plus grand que la valeur théorique, on rejette l'hypothèse d'égalité des deux variances [50,51] :

Donc il faut que :

$$F_{obs} < F_{fisher} \quad (4.14)$$

4.9.4 Calcul de la variance résiduelle

$$S_{res}^2 = \frac{n}{f} \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - y_{mod})^2 \quad (4.15)$$

$$S_{res}^2 = 0.13836$$

$$S_{er}^2 = 0.06232$$

Test de Fischer

$$F = \frac{S_{res}^2}{S_{er}^2} = \frac{0.13836}{0.06232} = 2.22$$

Ou :

$$F_{fisher} [q.f.t]$$

avec $q=0.05$ pour le niveau choisi (dans les recherches technologiques on choisi $q=5\%$)

$$f=20$$

f : Degré de liberté pour le numérateur

$$t = N(n - 1)[50,51]$$

$$t = 8(3 - 1) = 16$$

t : Degré de liberté pour le dénominateur

$F_{fisher} [20..16] = 2.27$ donc :

$$F_{obs} < F_{fisher}$$

Le modèle mathématique satisfait la condition de Fisher

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56 \cdot x_1 + 0.665 \cdot x_2 - 0.31 \cdot x_3 - 0.14 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.165 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.11 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4.16)$$

4.9.5 Normalisations des variables

Le résultat du plan d'expérience est l'obtention d'un modèle codé. L'opération suivante réside dans le remplacement des valeurs codées par des valeurs physiques mesurées dans l'expérience réalisée sur terrain, à cette fin nous allons utiliser la formule suivante[50] :

$$X_i = \frac{X_i - 0.5 (X_{i \max} + X_{i \min})}{0.5 (X_{i \max} - X_{i \min})} \quad (4.17)$$

X_i : La $i^{ème}$ variable normalisée du modèle.

TAB. 4.24 – Transfert des variables codées (modèle mathématique) en variables physiques(modèle physique)

Variables codées			Variables physiques			Variables normalisées
(Sans unité)	Min	Max	(bar)	Min(bar)	Max(bar)	$X_i = \frac{X_i - 0.5(X_{i \max} + X_{i \min})}{0.5(X_{i \max} - X_{i \min})}$
X_1	-1	+1	X_1	30	70	$\frac{X_1 - 50}{20}$
X_2	-1	+1	X_2	30	110	$\frac{X_2 - 70}{40}$
X_3	-1	+1	X_3	10	60	$\frac{X_3 - 35}{25}$

On remplaçant les variables codées par les variables normalisées dans la formule du modèle.

Formule codée (modèle mathématique) :

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56X_1 + 0.665X_2 - 0.31X_3 - 0.14X_1X_2 - 0.165X_1X_3 - 0.11X_2X_3 \quad (4.18)$$

La fonction (Sans unité)

Formule normalisée (modèle physique) :

$$\begin{aligned}
 y_{mod} = & 1.865 + 0.56 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) + 0.665 \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) - 0.31 \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \quad (4.19) \\
 & - 0.14 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) - 0.165 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \\
 & - 0.11 \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \quad (m/min)
 \end{aligned}$$

y_{mod} : représente dans notre cas d'étude le taux de pénétration (PR) de l'outil de forage dans le trou en (m/min)

$$\begin{aligned}
 PR = & 1.865 + 0.56 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) + 0.665 \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) - 0.31 \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \quad (4.20) \\
 & - 0.14 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) - 0.165 \left(\frac{1}{20}X_1 - 2.5 \right) \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \\
 & - 0.11 \left(\frac{1}{40}X_2 - 1.75 \right) \left(\frac{1}{25}X_3 - 1.4 \right) \quad (m/min)
 \end{aligned}$$

4.9.6 simplification du modèle physique :

Pour bien étudier la fonction objective PR on doit la simplifier pour bien comprendre sa variation lorsqu'on varie les paramètres de forage

Formule simplifiée (modèle physique) :

$$\begin{aligned}
 PR = & -1.72425 + 0.05180X_1 + 0.029225X_2 + 0.01180X_3 \quad (4.21) \\
 & - 0.000175X_1X_2 - 0.00033X_2X_3 - 0.00011X_1X_3 \quad (m/min)
 \end{aligned}$$

Formule simplifie en fonction de X_1

$$PR = (0.051800 - 0.000175X_2 - 0.00033X_3) X_1 - 1.72425 + 0.029225X_2 + 0.01180X_3 - 0.00011X_2X_3 \text{ (m/min)} \quad (4.22)$$

Formule simplifie en fonction de X_1 pour $X_2 = 110$ (max), $X_3 = 60$ (max)

$$PR_1 = 1.47250 + 0.01275X_1 \text{ (m/min)} \quad (4.23)$$

Formule simplifie en fonction de X_1 pour $X_2 = 110$ (max), $X_3 = 10$ (min)

$$PR_2 = 1.48750 + 0.02925X_1 \text{ (m/min)} \quad (4.24)$$

Formule simplifie en fonction de X_1 pour $X_2 = 30$ (min), $X_3 = 10$ (min)

$$PR_3 = -0.76250 + 0.04325X_1 \text{ (m/min)} \quad (4.25)$$

Formule simplifie en fonction de X_1 pour $X_2 = 30$ (min), $X_3 = 60$ (max)

$$PR_4 = -0.33750 + 0.02675X_1 \text{ (m/min)} \quad (4.26)$$

4.9.7 La variation du taux de pénétration selon la pression de rotation X_1

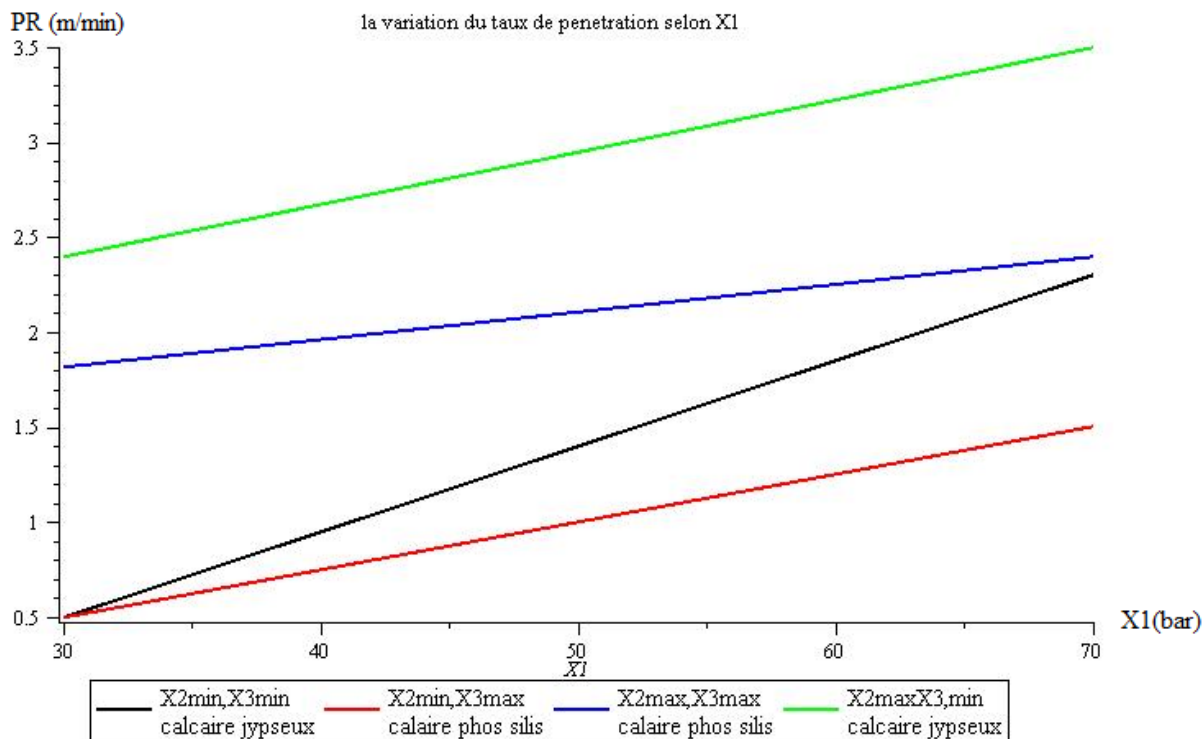


FIG. 4.10 – courbes de variation du taux de pénétration selon la pression de rotation X_1

Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction strictement croissante, en variant la pression de rotation du niveau minimal « $X_1 = 30$ bar » au niveau maximal « $X_1 = 70$ bar » dans toutes les formations rocheuses.

Formule simplifiée en fonction de X_2 pour $X_1 = 30$ (*min*), $X_3 = 60$ (*max*)

$$PR_1 = -0.21250 + 0.23750X_2 \text{ (m/min)} \quad (4.27)$$

Formule simplifiée en fonction de X_2 pour $X_1 = 30$ (*min*), $X_3 = 10$ (*min*)

$$PR_2 = 1.16250 + 0.01125X_2 \text{ (m/min)} \quad (4.28)$$

Formule simplifiée en fonction de X_2 pour $X_1 = 70$ (*max*), $X_3 = 60$ (*max*)

$$PR_3 = 1.850 + 0.0150X_2 \quad (m/min) \quad (4.29)$$

Formule simplifiée en fonction de X_2 pour $X_1 = 70$ (max), $X_3 = 10$ (min)

$$PR_4 = 0.00500 + 0.01650X_2 \quad (m/min) \quad (4.30)$$

4.9.8 La variation du taux de pénétration selon la pression de poussée X_2

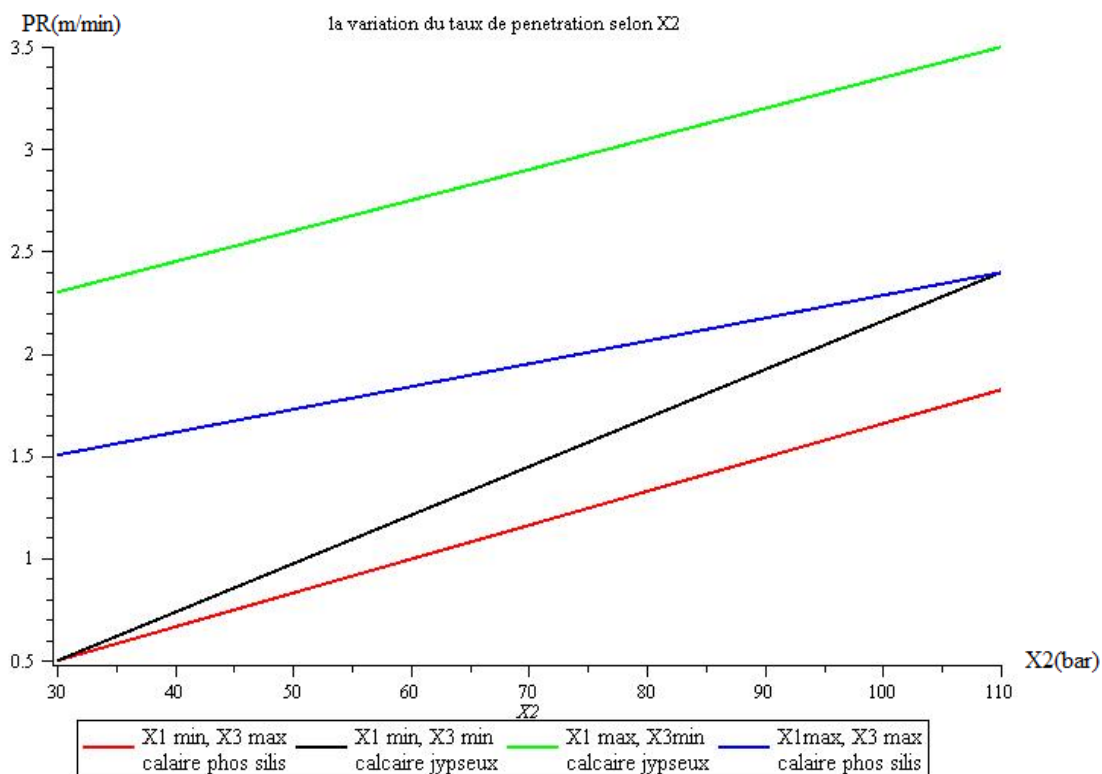


FIG. 4.11 – courbes de variation du taux de pénétration selon la pression de poussée X_2

Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction strictement croissante, en variant la pression de poussée du niveau minimal « $X_1 = 30$ bar » au niveau maximal « $X_1 = 110$ bar » dans toutes les formations rocheuses.

4.9.9 La variation du taux de pénétration selon la resistance à la
compression X_3 :

Formule simplifie en fonction de X_3 pour $X_1 = 70$ (*max*), $X_2 = 110$ (*max*)

$$PR_1 = 3.720 - 0.0220X_3 \text{ (m/min)} \quad (4.31)$$

Formule simplifie en fonction de X_3 pour $X_1 = 70$ (*max*), $X_2 = 30$ (*min*)

$$PR_2 = 2.516 - 0.0116X_3 \text{ (m/min)} \quad (4.32)$$

Formule simplifie en fonction de X_3 pour $X_1 = 30$ (*min*), $X_2 = 60$ (*max*)

$$PR_3 = 2.460 - 0.1160X_3 \text{ (m/min)} \quad (4.33)$$

Formule simplifie en fonction de X_3 pour $X_1 = 30$ (*min*), $X_2 = 10$ (*min*)

$$PR_3 = 0.5000 \text{ (m/min)} \quad (4.34)$$

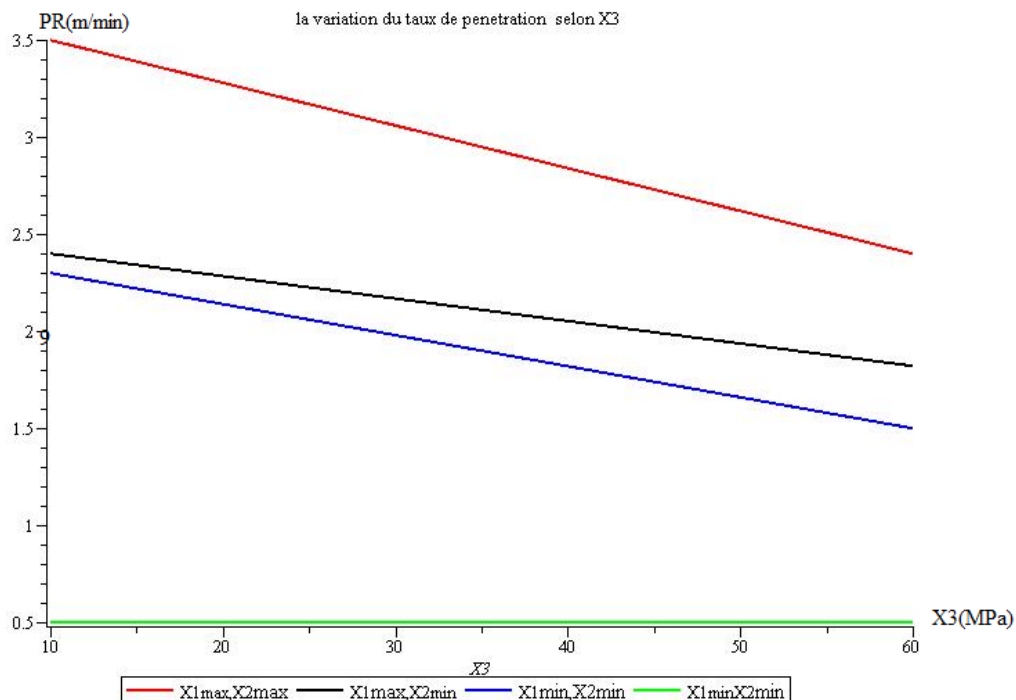


FIG. 4.12 – courbes de variation du taux de pénétration selon la resistance à la compression X_3

Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction strictement décroissante, en variant la résistance à la compression du niveau minimal « $X_3 = 10 \text{ MPa}$ » au niveau maximal « $X_3 = 60 \text{ MPa}$ » dans toutes les formations rocheuses

dans le cas de l'utilisation d'une pression de rotation minimale (30bar) avec une pression minimale de poussée (30bar) l'expérience a donné une valeur constante malgré la variation du X_3

4.10 Vérification de la représentativité du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk :

La procédure de vérification du modèle mathématique obtenu par le plan d'expérience, ce fait suite au calcul des résidus obtenus en faisant la différence entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Si le résidu est inférieur à 30% [50,51] le modèle physique est admissible. Dans notre modèle le résidu est inférieur à 6% donc notre modèle est un modèle représentatif pour les conditions de la mine de Djebel Onk

TAB. 4.25 – vérification du modèle

N^0	X_1	X_2	X_3	Y Mesuré (m/min)	PR calculé (m/min)	résidus	%
1	-	-	-	0.5	0.53	0.03	6
2	+	-	-	2.3	2.27	-0.03	-6
3	-	+	-	2.4	2.37	-0.03	-6
4	+	+	-	3.5	3.53	0.03	6
5	-	-	+	0.5	0.53	0.03	6
6	+	-	+	1.5	1.53	0.03	6
7	-	+	+	1.82	1.85	0.03	6
8	+	+	+	2.4	2.37	-0.03	-6

4.11 L'application du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk

Nous allons appliquer dans ce qui suit le modèle validé précédemment pour l'optimisation du régime de fonctionnement des machines de forages dans les conditions de la mine de Djebel Onk pour les différentes formations rocheuses.

4.11.1 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage pour la couche du calcaire phosphaté siliceux dont la résistance à la compression est de 60 MPa

La variation du PR pour la couche du calcaire phosphate siliceux

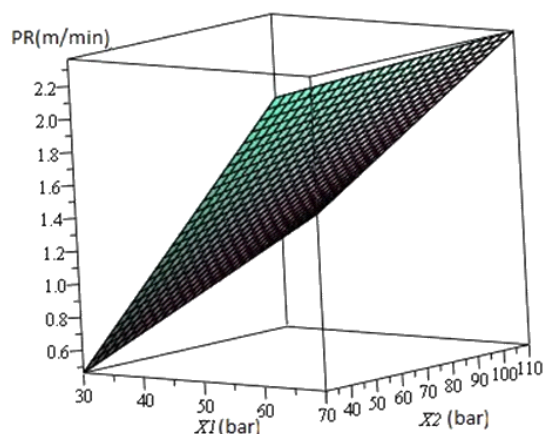


FIG. 4.13 – la variation du taux de penetration dans la couche du calcaire phosphate silicieux

La figure ci-dessus représente la variation du taux de pénétration de l'outil de forage on faisant la variation de la pression de rotation et la pression de poussée. Quatre cas d'étude seront présentés pour l'optimisation du régime de fonctionnement de la machine de forage dans les formations calcaires phosphatées silicieux.

$$PR = 0.5 \text{ m/min pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 1.82 \text{ m/min pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 1.50 \text{ m/min pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 2.40 \text{ m/min pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse 1 :

- Le passage du taux de pénétration de 1.82 m/min jusqu' a 2.4 m/min donne un écart de 0.62 m/min.
- La présence de la silice dans cette formation rocheuse favorise l'usure rapide de l'outil, donc il est recommandé de diminuer la vitesse de rotation de l'outil et augmenté la pression de poussée.
- Le régime optimum pour la couche de calcaire phosphate siliceux est de garder la pression de rotation au niveau minimal de 30 bar et augmenter la pression sur l'outil au niveau maximal de 110 bar.

Synthèse 2 :

Le régime minimal est exclu dans tous les cas d'étude.

4.11.2 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire gypseux dont la résistance à la compression est de 10 MPa

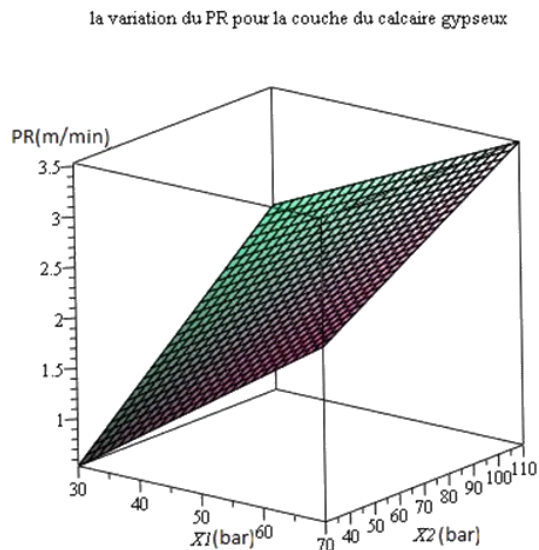


FIG. 4.14 – la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire gypseux

$$PR = 0.50 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de poussee} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 2.30 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de poussee} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 2.40 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rptation} = 70 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de poussee} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR = 3.5 \text{ m/MIN} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de poussee} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse

- Le passage du taux de pénétration de 2.3 m/min jusqu' a 3.5 m/min donne un écart de 1.2 m/min.

- Cette formation rocheuse et tendre et non abrasive ; donc l’augmentation de la valeur des deux paramètres de forage (vitesse de rotation, pression de poussée) n’influent pas sur l’usure rapide de l’outil.
- le régime optimal pour la couche de calcaire gypseux, une pression de rotation maximal de 70 bar et une poussée sur l’outil est maximal de 110 bar.

4.11.3 Régime de fonctionnement de machine de forage dans la couche du phosphate dont la résistance à la compression est de 30 MPa

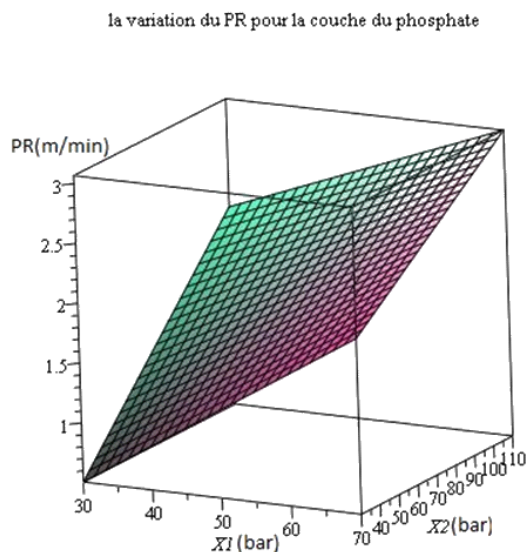


FIG. 4.15 – la variation du taux de pénétration dans la couche du phosphate

$$PR_1 = 0.50 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_2 = 2.16 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_3 = 1.97 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_4 = 3.10 \text{ m/min} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse

- Le passage du taux de pénétration de 1.97 m/min jusqu' a 3.10 m/min donne un écart de 1.4 m/min.
- Cette formation rocheuse et dure et non abrasive; donc l'augmentation de la valeur des deux paramètres de forage (vitesse de rotation, pression de poussée) n'influent pas sur l'usure rapide de l'outil.
- le régime optimal pour la couche de phosphate, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.

4.11.4 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire phosphate blanc dont la résistance à la compression est 20 MPa

la variation du PR pour la couche du calcaire phosphate blanc

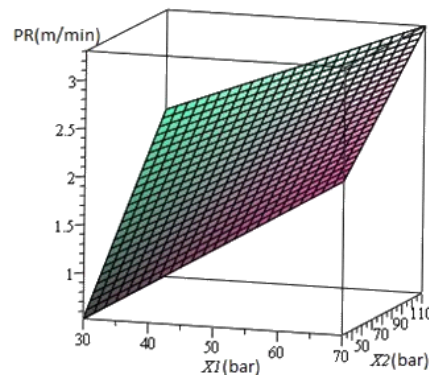


FIG. 4.16 – la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire phosphate blan

$$PR_1 = 0.50 \text{ m/min} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_2 = 2.26 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_3 = 2.11 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_4 = 3.30 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse

- Le passage du taux de pénétration de 2.11m/min jusqu' a 3.30 m/min donne un écart de 1.19 m/min.
- Cette formation rocheuse et dure et non abrasive; donc l'augmentation de la valeur des deux paramètres de forage (vitesse de rotation, pression de poussée) n'influent pas sur l'usure rapide de l'outil.
- le régime optimal pour la couche de calcaire phosphaté blanc, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.

4.11.5 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans la couche du calcaire phosphate noir dont la résistance à la compression est de 17 MPa

la variation du PR pour la couche du calcaire phosphate noir

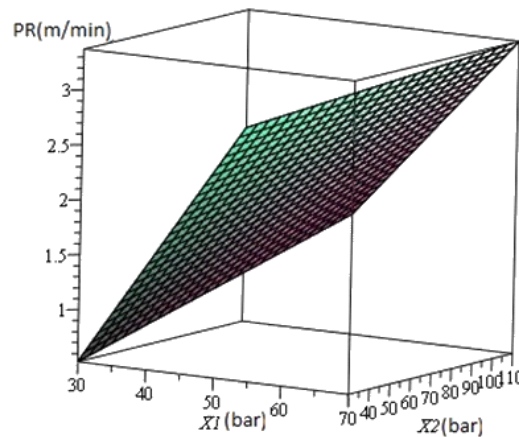


FIG. 4.17 – la variation du taux de pénétration dans la couche du calcaire phosphate noir

$$PR_1 = 0.50 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_2 = 2.29 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 30 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_3 = 2.16 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 30 \text{ bar} \end{cases}$$

$$PR_4 = 3.37 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 70 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 110 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse

- Le passage du taux de pénétration de 2.16m/min jusqu' a 3.37 m/min donne un écart de 1.21 m/min.
- Cette formation rocheuse et dure et non abrasive ; donc l'augmentation de la valeur des deux paramètres de forage (vitesse de rotation, pression de poussée) n'influent pas sur l'usure rapide de l'outil.
- le régime optimal pour la couche de calcaire phosphate noir, une pression de rotation maximal de 70 bar et une poussée sur l'outil est maximal de 110 bar

4.12 Régime optimale de fonctionnement de machine de forage dans Les condition de la mine de Djebel-Onk

Nous allons présenter en fin un récapitulatif d'optimisation du bon fonctionnement de la machine de forage dans Les condition de la mine de Djebel-Onk. Le tableau 26 présente les valeurs d'optimisation pour les différentes formations rocheuses.

TAB. 4.26 – récapitulatif des résultats pour les différentes formations rocheuses

Type de roche	PR1	PR2	PR3	PR4	Valeur optimale
Calcaire phosphaté gypseux	0.50	2.30	2.40	3.50	PR2, PR3
Phosphate	0.50	2.16	1.97	3.10	PR2, PR3, PR4
Calcaire phosphaté blanc	0.50	2.26	2.11	3.30	PR2, PR3, PR4
Calcaire phosphaté noir	0.50	2.29	2.16	3.37	PR2, PR3, PR4
Calcaire marneux blanc	0.50	2.32	2.21	3.45	PR2, PR3, PR4

PR1 = PR(30,30) : le taux de pénétration de l'outil de forage avec une pression de rotation de 30 bar et une pression de poussée de 30 bar

PR2 = PR(30,110) : le taux de pénétration de l'outil de forage avec une pression de rotation de 30 bar et une pression de poussée de 110 bar

PR3 = PR(70,30) : le taux de pénétration de l'outil de forage avec une pression de rotation de 70 bar et une pression de poussée de 30 bar

PR4 = PR(70,110) : le taux de pénétration de l'outil de forage avec une pression de rotation de 70 bar et une pression de poussée de 110 bar

4.13 Comparaison des résultats obtenus avec l'état actuel dans la mine de Djebel-Onk.

Le régime actuel de forage dans les conditions de la mine de Djebel Onk est constant.

La pression de rotation est 50 bars et la pression de poussée est de 50 bars pour toutes les formations rocheuses est dans toutes les conditions.

Nous avons calculé le taux de pénétration (PR₅) actuel pour toutes les formations rocheuses, puis nous les comparerons avec les résultats obtenus par notre modèle.

Calcaire gypseux

$$PR_5 = 1.78 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 50 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Phosphate

$$PR_5 = 1.58 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 50 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Calcaire phosphate blanc

$$PR_5 = 1.68 \text{ m/min} \text{ pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rptation} = 50 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Calcaire phosphaté siliceux

$$PR_5 = 1.27/\text{min} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 50 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Calcaire phosphate noir

$$PR_5 = 1.71\text{m}/\text{min} \quad \text{pour} \quad \begin{cases} X1 \text{ pression de rotation} = 50 \text{ bar} \\ X2 \text{ pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Synthèse

- Le taux de pénétration actuel varie entre 1.27 jusqu'à 1.73 (m/min). tandis que le taux de pénétration obtenu par notre modèle varie entre 0.5 jusqu'à 3.5 (m/min).
- Soit un ordre d'intervalle entre l'état actuel de 0.47 (m/min) et 3 (m/min) pour notre model d'optimisation du régime de fonctionnement forage.

4.13.1 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR1)

TAB. 4.27 – Comparaison entre régime(PR1) et régime actuel(PR5)

Type de roche	PR1	PR5	PR1- PR5
Calcaire phosphate siliceux	0.5	1.27	-0.77
Calcaire phosphate gypseux	0.5	1.78	-1.28
Phosphate	0.5	1.58	-1.08
Calcaire phosphate blanc	0.5	1.68	-1.18
Calcaire phosphate noir	0.5	1.71	-1.21
Calcaire marneux blanc	0.5	1.73	-1.23

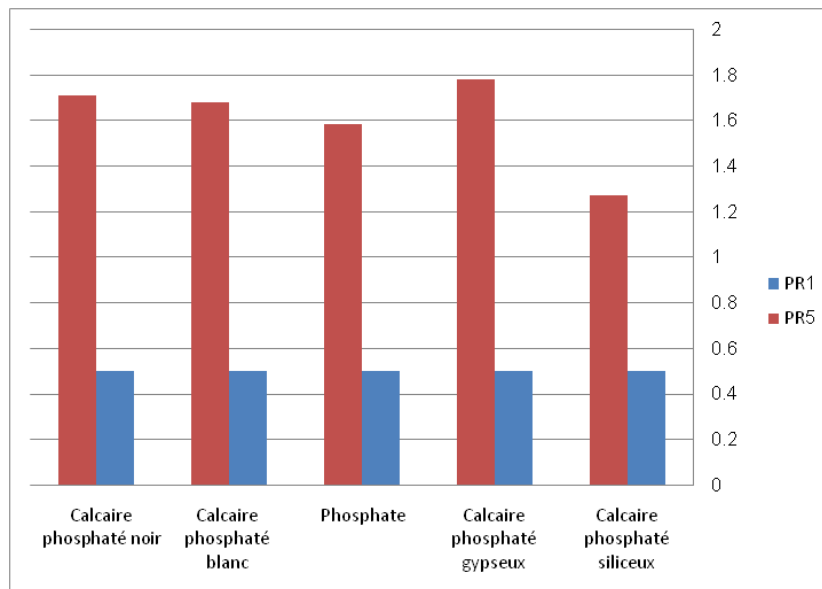


FIG. 4.18 – Histogramme de Comparaison entre régime(PR1) et régime actuel(PR5)

Remarque

Dans ce cas le régime appliqué actuellement à la mine de Djebel Onk est plus important que ce lui du modèle.

4.13.2 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR2)

TAB. 4.28 – Comparaison entre régime (PR2) et régime actuel (PR5)

Type de roche	PR2	PR5	PR2- PR5
Calcaire phosphate siliceux	1.82	1.27	0.55
Calcaire phosphate gypseux	2.3	1.78	0.52
Phosphate	2.16	1.58	0.58
Calcaire phosphate blanc	2.26	1.68	0.58
Calcaire phosphate noir	2.29	1.71	0.58
Calcaire marneux blanc	2.32	1.73	0.59

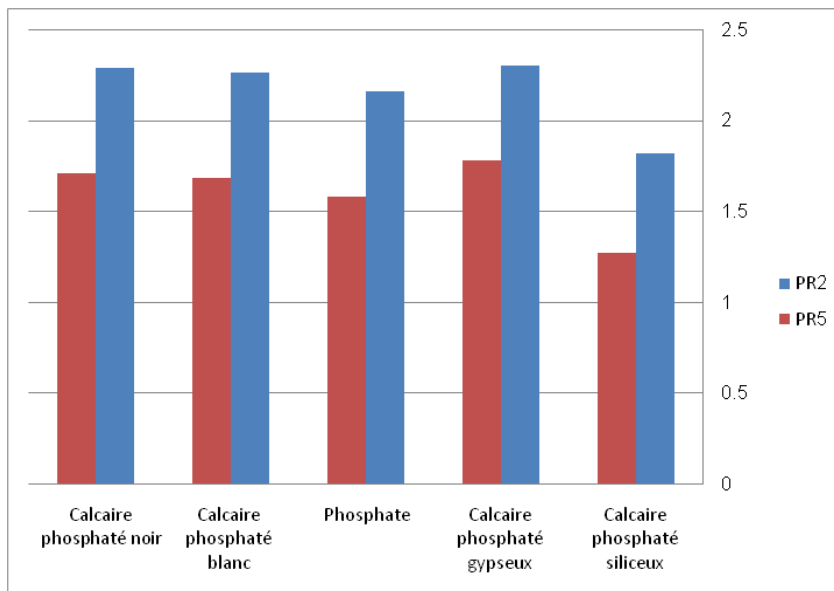


FIG. 4.19 – Histogramme de Comparaison entre régime(PR2) et régime actuel(PR5)

Remarque

Le régime propose par le modèle est un régime optimum rationnel car il nous donne un taux de pénétration important.

4.13.3 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR3)

TAB. 4.29 – Comparaison entre régime (PR3) et régime actuel(PR5)

Type de roche	PR3	PR5	PR3- PR5
Calcaire phosphate siliceux	1.5	1.27	0.23
Calcaire phosphate gypseux	2.4	1.78	0.62
Phosphate	1.97	1.58	0.39
Calcaire phosphate blanc	2.11	1.68	0.43
Calcaire phosphate noir	2.16	1.71	0.45
Calcaire marneux blanc	2.21	1.73	0.48

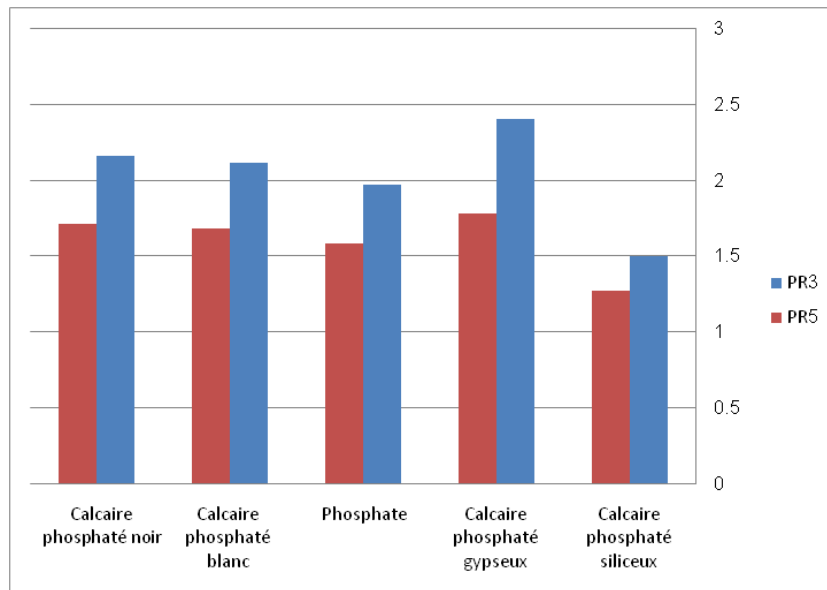


FIG. 4.20 – Histogramme de Comparaison entre régime(PR3) et régime actuel(PR5)

Remarque

Ce régime nous donne un taux de pénétration important.

4.13.4 Comparaison du taux de pénétration (PR5) et (PR4)

TAB. 4.30 – Comparaison entre régime (PR4) et régime actuel (PR5)

Type de roche	(PR4)	(PR5)	(PR4) -(PR5)
Calcaire phosphate siliceux	2.4	1.27	1.13
Calcaire phosphate gypseux	3.5	1.78	1.72
Phosphate	3.1	1.58	1.52
Calcaire phosphate blanc	3.3	1.68	1.62
Calcaire phosphate noir	3.37	1.71	1.66
Calcaire marneux blanc	3.45	1.73	1.72

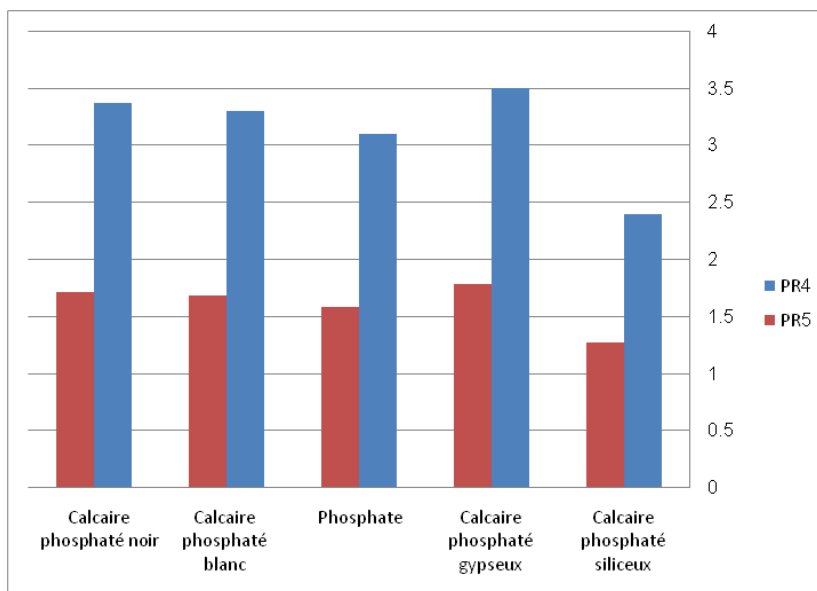


FIG. 4.21 – Histogramme de Comparaison entre régime(PR4) et régime actuel(PR5)

Remarque

Ce régime nous donne un taux de pénétration maximal avec le taux d'usure de l'outil de forage Important.il est consigner d appliquer ce régime pour les couche qui ne contient pas de silicium, Ou avec un a taux faible en silicium, dans notre cas d'étude ce régime est un régime optimale par toutes les couches sauf la couche du calcaire phosphate siliceux.

4.14 Conclusion

Le teste de Student à donner les résultats suivants :

Tous les coefficients des facteurs sont significatifs à l'exception du coefficient d'interaction des trois facteurs ensembles (X1X2X3).

D'après le teste de Student le modèle final significatif est le suivant :

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56.x_1 + 0.665.x_2 - 0.31.x_3 - 0.14.x_1.x_2 - 0.165.x_1.x_3 - 0.11.x_2.x_3$$

Le teste de Fischer à donner les résultats suivants :

- Une variance résiduelle égale à : $S_{res}^2 = 0.13836$
- Une variance répétitive égale à : $S_{er}^2 = 0.06232$
- Suite au calcul des variances le teste de Fischer à donner : $F = \frac{S_{res}^2}{S_{er}^2} = \frac{0.13836}{0.06232} = 2.22$
- $F_{fisher} [20..16] = 2.27$ valeur obtenue du tableau de Fischer à 0.05
- La condition de représentativité du modèle d'après Fischer est satisfaite : $F_{obs} < F_{fisher}$

La vérification du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk à donner les résultats suivants :

- Le résidu entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées ne dépassent pas les 6 %.
- Le modèle physique est acceptable est pourra être utilisé dans les conditions de la mine de Djebel Onk
- Le taux de pénétration actuel varie entre 1.27 jusqu'à 1.73 (m/min). tandis que le taux de pénétration obtenu par notre modèle varie entre 0.5 jusqu'à 3.5 (m/min).
- Soit un ordre d'intervalle entre l'état actuel de 0.47 (m/min) et 3 (m/min) pour notre model d'optimisation du régime de fonctionnement forage.
- Le régime optimum pour la couche de calcaire phosphate siliceux est de garder la pression de rotation au niveau minimal de 30 bar et augmenter la pression sur l'outil au niveau maximal de 110 bar.
- Le régime minimal est exclu dans tous les cas.
- le régime optimal pour la couche de calcaire gypseux, une pression de rotation maximal de 70 bar et une poussée sur l'outil est maximal de 110 bar.
- le régime optimal pour la couche de phosphate, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant
- le régime optimal pour la couche de calcaire phosphaté blanc, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.
- le régime optimal pour la couche de calcaire phosphaté noire, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.

Conclusion générale

Les avancées techniques dans le domaine de fabrication des taillants a donné une amélioration importante de la qualité de ces derniers de point de vue résistance aux chocs et à l'abrasion.

Les taillants de type (DTH) largement utilisés actuellement dans le domaine des mines à cause de leur rentabilités de point de vue longévité et rapidité d'avancement dans les différentes formations rocheuses.

Dans les conditions de la mine de Djebel-Onk l'opération de forage est faite grâce à la machine de forage (ATLAS-COPCO ROC L8) équipée d'un outil de forage de type (DTH) avec marteau au fond du trou.

L'avancement et la rotation de l'outil de forage sont assurés par deux moteurs hydrauliques.

Le réglage de la rotation et la poussée est assuré par le conducteur de l'engin.

Actuellement dans la mine de Djebel-Onk le système de commande manuelle de réglage est fixer sur 50 bar la rotation et 50 bar la poussée dans les différentes formations rocheuses

L'application de la méthode des plans expériences; nous permet d'obtenir une fonction objective regroupant toutes les variables.

L'étude de cette fonction objective nous permet l'optimisation des ces paramètres suite a la vérification par les deux testes celui de STUDANT et FISHER qui

Le teste de Student à donner les résultats suivants :

Tous les coefficients des facteurs sont significatifs à l'exception du coefficient d'interaction des trois facteurs ensembles (X1X2X3).

D'après le teste de Studant le modèle final significatif est le suivant :

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56.x_1 + 0.665.x_2 - 0.31.x_3 - 0.14.x_1.x_2 - 0.165.x_1.x_3 - 0.11.x_2.x_3$$

Le teste de Fischer à donner les résultats suivants :

Une variance résiduelle égale à : $S_{res}^2 = 0.13836$

Une variance répétitive égale à : $S_{er}^2 = 0.06232$

Suite au calcul des variances le teste de Fischer à donner :

$$F = \frac{S_{res}^2}{S_{er}^2} = \frac{0.13836}{0.06232} = 2.22$$

$F_{fisher} [20..16] = 2.27$ valeur obtenue du tableau de Fischer à 0.05

La condition de représentativité du modèle d'après Fischer est satisfaite : $F_{obs} < F_{fisher}$

La vérification du modèle dans les conditions de la mine de Djebel Onk à donner les résultats suivants :

Le résidu entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées ne dépassent pas les 6 %.

Le modèle physique est acceptable est pourra être utilisé dans les conditions de la mine de Djebel Onk

Le taux de pénétration actuel varie entre 1.27 jusqu'à 1.73 (m/min).tandis que le taux de pénétration obtenu par notre modèle varie entre 0.5 jusqu'à 3.5 (m/min).

Le régime optimum pour la couche de calcaire phosphate siliceux est de garder la pression de rotation au niveau minimal de 30 bar et augmenter la pression sur l'outil au niveau maximal de 110 bar.

Le régime minimal est exclu dans tous les cas.

le régime optimal pour la couche de calcaire gypseux, une pression de rotation maximale de 70 bar et une poussée sur l'outil est maximal de 110 bar.

le régime optimal pour la couche de phosphate, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant

le régime optimal pour la couche de calcaire phosphaté blanc, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.

le régime optimal pour la couche de calcaire phosphaté noire, peut être estimé sur les trois valeurs obtenues selon le besoin de l'ingénieur exploitant.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Blanc .E.C « Technologie des appareils de fragmentations ».
- [2] P. Kumar. «Hydraulic Machines Fundamentals of Hydraulic Power Systems», 2012.
- [3] Abdessalem Belaid. « modélisation tridimensionnelle du comportement mécanique de la garniture de forage dans les puits a trajectoires complexes : application a la prédiction des frottements garniture-puits », école des mines de paris, 2005.
- [4] Andreas .E « principes et possibilité de fragmentation par percussion », 1965.
- [5] Anistratov.I « Planification mathématique des expériences technologiques » .ed. Université -Annaba, 1976.
- [6] Anistratov.I « Principe d'élaboration des projets des carrières », Ed. Université - Annaba, 1976.
- [7] Arnaud Savary Lionel Gendre Bruno Soulier. « Les plans d.exériences » .ressource publiée le 21-12-2009.
- [8] Atlas-copco ref. «Blast hole Drilling in Open Pit Mining», 2011.
- [9] Atlas-copco ref. «Drill bits », 2005.
- [10] Atlas-copco Roc L8 .fiche technique.
- [11] Atlas-copco roc L8 ref. «Operator's instructions» 2005.
- [12] B. A Kennedy. «Surface mining». 2nd edition. Port city press. Baltimore Maryland USA, 1990.

- [13] Balaeff A. Mahadevan L. and Schulten k. «Modelling DNA loops using the theory of elasticity», arxiv-physics 0301006 v1, Jan. 5, 2003.
- [14] Belaid A. Sellami H. Menand S. and Tijani M. « Modélisation du comportement mécanique d'une structure élancée rigide à l'intérieur d'un trou à trajectoire complexe : application au dimensionnement du forage pétrolier », 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, 29 Août - 2 Septembre, 2005.
- [15] BRGM. Sofremine. « étude du gisement du phosphate de Djebel-Onk », 1993.
- [16] Carlos Lopez Jimeno, Emilio Lopez Jimeno, Francisco Javier Ayala Carcedo. «Drilling and Blasting of Rocks» , 1995.
- [17] Choquin . «Paramètres et contrôle de forage».
- [18] E. Sean Cox Brigham. «Mechanics of Polycrystalline Diamond Compact Impact Testing» .Young University. Department of Mechanical Engineering, 2003.
- [19] Encyclopedia WIKIPEDIA, 2010.
- [20] EREM. « travaux de prospection et dévaluation des phosphates dans la région de bire latter ». Tome2 Géologie, 1985-1987.
- [21] G. & M.C Sado. « Les plans d.exériences ». AFNOR, 2000.
- [22] G.E.P. Box, W.G. Hunter, J.S. Hunter. «Statistics for experimenters». Willy.USA, 1978.
- [23] Goumeniouk V « méthode de la planification », 1977.
- [24] Ho H-S. « General Formulation of Drillstring Under Large Deformation and Its Use in BHA Analysis», New Orleans LA, Oct 5-8, 1986.
- [25] Ivanov I « organisation des processus de production » ed Université d'Annaba, 1977.
- [26] J. Goupy. « Introduction aux plans d.experiences ». seconde édition. Dunod, 2001.

- [27] J. Goupy. « Modélisation par les plans d'expériences » .Techniques de l'ingénieur.
- [28] J. Goupy. « Plans d'expériences, Techniques de l'ingénieur ».
- [29] Jacques Alexis. « Pratique industrielle de la méthode Taguchi - Les plans d'expériences » .AFNOR, 1995.
- [30] Jacques Demonsant . « Comprendre et mener des plans d'expériences ». AFNOR, 1996.
- [31] James Deans Cumming. «Diamond drill handbook» .Jean L Goupy. «Les plans d'expériences ». Revue Modulad N 34, 2006.
- [32] Jean-Paul Nguyen. « Le Forage, techniques d'exploitation pétrolière Institut français du pétrole», 1993.
- [33] Jikarev V « traitement des résultats des expériences » ed Université d'Annaba, 1980.
- [34] Journal : La pastel-00563835, version 1 - 7 Feb 2011.
- [35] Kaplan J. « Modélisation Tridimensionnelle du comportement directionnel du système de forage rotary», Thèse, ENSMP, Novembre 2003.
- [36] Kara Mohammed, « Déduction de la caractéristique énergétique du concasseur à marteau », Thèse de Magistère, Université de Tébessa, 1992.
- [37] Kara Mohammed, « Optimisation de la consommation de l'énergie électrique », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2007.
- [38] Khotachvili A ET Khakorati « guide de l'exécution des recherches scientifiques », 1985.
- [39] L.D.Visse. « genèse des gites phosphates du sud-est Alghero-Tunisien Monographie régionale » 1er série-Algérie Nmbre27, 1951.
- [40] M. Pillet. « Les plans d'expériences par la méthode Taguchi » . Les Editions d'organisation. Paris, 1997.

-
- [41] Moreau .M ET Mathu A « statistique appliquée à l'expérimentation » ed eyrole Paris, 1979.
- [42] Nitro Nobel « les explosifs réglages de la qualité de fragmentation des roches dans les carrières » ed FLS Suède, 1983.
- [43] Ochsenbein.M « les plans d'expériences journée d'études internationales », 1981.
- [44] P. Schimmerling P, J.-C. Sisson, A.Zaidi. « Pratique des plans d'expériences ». Lavoisier. Paris, 1998.
- [45] P. Souvay. « Les plans d'expériences, Méthode Taguchi ». AFNOR. 1994.
- [46] Riadh Boualleg, « Modélisation des systèmes de forage en formations géologiques anisotropes » Thèse de doctorat Ecole des Mines de Paris, 2006.
- [47] Salies J.B and Cunha J.C.S, «Experimental and Mathematical Modelling of Helical Buckling of Tubulars in Directional Wellbores», SPE 28713, Veracruz, Mexico, 10-13 October 1994.
- [48] Sami Bellalah. « Etude et dimensionnement d'une installation hydraulique Industrielle», 1995.
- [49] Savignat J.M. «Construction géométrique de la trajectoire d'un puits de forage Test de la méthode de moindre Torsion», Rapport Interne, ENSMP, 1999.
- [50] Savignat J.M. Tijani M. «Construction géométrique de la trajectoire d'un puits de forage Quelques éléments de réflexions», Rapport Interne, ENSMP, 1999.
- [51] Seibi A.C. «Running Force in Medium to High-Curvature Wellbores : An Experimental Study and Numerical Simulation of Laboratory and Field Cases» , Journal of energy Resources Technology, Vol. 123/133 June 2001
- [52] Site Web : [Http : //petrowiki.spe.org/Rotary_drill_bits](http://petrowiki.spe.org/Rotary_drill_bits).
- [53] Site Web : [Http : //www.cdhlf.com/en/product.asp](http://www.cdhlf.com/en/product.asp).

-
- [54] Stephane Vivier. « Stratégies d'optimisation par La méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis ». Thèse de doctorat à l'école Centrale de Lille, 2002.
- [55] Subir Chowdhury, Shin Taguchi. « Robust engineering - Genichi Taguchi ». Duno, 1998.
- [56] Taguchi G. ET Konishi. « Orthogonal arrays and linear graphs ». American supplier institute. Inc. Dearborn, 1987.
- [57] Théron A. « Modélisation des effets non linéaires dans le processus de forage », Thèse, IFP, Novembre 1996.
- [58] Tijani M. « Courbures et Hélices » Rapport Interne, ENSMP, 2000.
- [59] Tijani M. « Frottements dans les puits pétroliers -ABIS », Rapport Interne, ENSMP, 2003.
- [60] Tijani M. « Modélisation des frottements dans les puits déviés », Logiciel Tubage, Rapport Interne, ENSMP, 1999.
- [61] Trevor M. Hunt. T A Hunt, N. Vaughan. « The hydraulic Handbook », 1996.
- [62] V kafarov « méthodes cybernétiques plan d'expérience ».
- [63] W. Fowlkes et C. Crevling. « L'ingénierie robuste ». Dunod. Paris, 1998.
- [64] William C. Lyons, Ph.D., P.E., Gary J Plisga. « Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering ». BS 2nd édition, 2005.
- [65] Zohra Cherfi « La qualité - Démarche, méthodes et outils ». Hermes Sciences. l'ingénierie robuste, 2002.