

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

Université 20 aout
1955 Skikda
Faculté de Technologie
Département de génie mécanique



جامعة 20 اوت
1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

Ins. N° ; D012118005D

رقم التسجيل : D012118005D

*Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme : Doctorat en science
Spécialité : Electromécanique
Thème*

***Recherche du régime rationnel de fonctionnement
des installations de forage
(Cas de la mine de Djebel-Onk)***

Présenté par :
KHALED RAIS

Devant le jury composé de :

<i>MEHANNAOUI Lamine</i>	<i>Président</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Skikda</i>
<i>KARA Mohammed</i>	<i>Directeur de thèse</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Tébessa</i>
<i>KHOCHMAN Lakhdar</i>	<i>Co- directeur de thèse</i>	<i>Prof</i>	<i>Université de Skikda</i>
<i>BENCHOUIA Nedjmeddine</i>	<i>Examineur</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Souk-Abras</i>
<i>ZAHZOUH Zoubir</i>	<i>Examineur</i>	<i>MCA</i>	<i>Université de Souk-Abras</i>
<i>YEHYAOUI Sami</i>	<i>Examineur</i>	<i>MCA</i>	<i>Ecole polytechnique Alger</i>

Année universitaire : 2018

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 cette thèse.

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

*Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements à monsieur **MEHNNAOUI Lamine** d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance. Mes remerciements s'adressent aussi à mon professeur **KHOCHMENE Lakhdar** pour l'aide précieuse qui m'a accordée au titre de Co-directeur de thèse,*

*Ainsi que je veux exprimer aussi ma gratitude aux membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer à la soutenance de cette thèse. Docteur **BENCHOUIA Nedjmeddine**, et docteur **ZAHZOUH Zoubir** et docteur **YEHYAOUI Sami***

*Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements aux **membres du service de forage** de la carrière de Djebel-Onk pour leur collaboration inoubliable, et j'insiste à remercier l'homme qui a implanté dans mon âme l'esprit de défi, et le courage d'entamer des recherches difficiles avec un raisonnement logique et scientifique merci mon ami docteur **GADRI Larbi***

Khaled Rais

الإهداء

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

إلى الروح الطاهرة التي إحتضنتني وغمرتني بحب عظيم طوال
عمري إلى أبي العزيز / عبد العزيز الشندي رحمه الله

إلى صديق عمري وأستاذي / الدكتور العربي قديري

كما لايسعني بكل ما أوتيت من كلمات ان أعبر عن شكري
وإمتناني له لما قدمه لي ولكل زملائي من طلبة الدكتوراة من
عون وإهتمام على مدار فترة البحث

إلى أمي الغالية أطلال الله عمرها وبارك في صحتها

إلى كل الأحبه في مصر والجزائر

إلى كل من أزرني بالدعاء

إلى زوجتي وأبنائي الأعزاء مع شكري وإمتناني لتحملهم إهمالي
وإنشغالي طوال فترة البحث

خالد رايس

Résumé

Prédire le taux de pénétration de l'outil de forage dans la roche est d'une importance capitale pour l'ingénieur exploitant. Il n'existe pas de modèle universel qui peut définir le taux de pénétration de l'outil de forage dans la roche. Les paramètres qui influent sur ce dernier sont mal connus, il est pratiquement très difficile de prédire exactement leurs nombre. Pour cette raison, une quantité considérable d'essais sur terrain doit être faite pour fournir les données nécessaires, à savoir les propriétés des roches et les techniques de forage utilisées. Le but principal de cette recherche est de réaliser une étude expérimentale basée sur la variation des paramètres de la machine de forage (pression de rotation, pression de poussée et d'air comprimé) sur différentes formations géologiques, afin de trouver un modèle mathématique qui relie ces différents paramètres d'études.

Une approche par méthode d'optimisation indirecte (méthode des plans d'expériences) sera appliquée dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk, Tébessa Algérie

Mots-clés : Optimisation , Forage , Modélisation , Plans d'expériences , Variance

Abstract

Predicting the penetration rate of the drilling bit in the rock is very important for the operator engineer. There is no universal model that can define the rate of penetration of the drilling bit into the rock. The parameters that affect the penetration rate are poorly known, it is very difficult to predict exactly their number. For this reason, a considerable amount of field testing must be done to provide the necessary data, namely the properties of the rocks and the drilling techniques used.

The main goal of this research is to carry out an experimental study based on the variation of the parameters of the drilling machine (rotational pressure, push pressure and compressed air) on different geological formations, in order to find a mathematical model that relieve the relationship between different study parameters.

An indirect optimization approach (design of experiments) has been applied in the conditions of the phosphate quarry of Jebel-Onk , Tebessa Algeria

Keywords : Optimization , drilling , Modeling , Design of experiences , Variance.

ملخص

إن التنبؤ بمعدل سرعة الحفر في الصخور يعتبر من أهم أولويات مهندس الإستغلال المنجمي . كما لا يوجد نموذج رياضي عام يمكن أن يحدد معدل سرعة الحفر في الصخور. والعوامل التي تؤثر على هذا الأخير غير معروفة جيدا، فمن الصعب التنبؤ بالضبط بعددهم. لهذا السبب، يجب إجراء قدر كبير من الإختبارات الميدانية لتوفير البيانات اللازمة، كخصائص الصخور وتقنيات الحفر المستخدمة.

إن الهدف الرئيسي من هذا البحث هو إجراء دراسة تجريبية تقوم على التغيير في عوامل التحكم في آلة الحفر (الضغط الدوراني، ضغط الدفع، ضغط الهواء) خلال إختراق آلة الحفر لمختلف التشكيلات الجيولوجية، من أجل إيجاد نموذج رياضي يربط هذه العوامل الأساسية لمحور الدراسة.

لذلك تم تطبيق منهج طريقة التحسين الغير المباشر (تصاميم التجارب) في الظروف الخاصة بمحجر الفوسفات في جبل العنق، تبسة الجزائر

الكلمات المفتاحية : الأمثلية؛ الحفر؛ النمذجة ؛ تصاميم التجارب ؛ فرق التباين

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : LES INSTALLATIONS DE FORAGE DANS LE DOMAINE MINIER	3
1. Introduction.....	3
2. Les différents modes de forage.....	4
2.1. Forage percutant	4
2.1.1 Principe de fonctionnement	4
2.2 Forage rotatif	4
2.2.2 Principe de fonctionnement	5
2.3 La technique de forage roto percutant (MFT).....	5
3. Règles de comparaison entre les différents modes de forage	6
4. Les paramètres de forage dans les mines.....	8
4.1. L'utilisation du forage rotatif et roto-percutant dans les mines	8
4.1.1. Le mode rotatif	8
4.1.2. Le mode roto-percutant	9
5. Le choix du mode de forage approprié au domaine minier	9
6. Principe de commande des machines de forage	9
6.1 La poussée sur l'outil (système hydraulique)	9
6.2 Force de levage (système hydraulique)	10
6.3 Rotation transmise à l'outil (système hydraulique)	10
6.4 Le couple de la machine de forage (système hydraulique)	10
6.5 L'air et la boue de forage	10
6.6. L'air au forage MFT.....	11
6.7 Le choix de la technique	12
7. Mise en œuvre du forage roto-percutant dans les mines	12
7.1. Le marteau fond de trou.....	12
8. Les machines de forage dans la carrière de Djebel-Onk	13
8.1 Description de la machine	14
8.2 Principe de fonctionnement de la ROC-L8	14
Synthèses	15
CHAPITRE II : CONTACT DE LA ROCHE AVEC L'OUTIL DE FORAGE.....	16
1.Introduction.....	16

2. Historique sur les outils de forages	16
2.1. Les outils tricônes	17
2.2 Les outils PDC.....	18
2.2.1 Évolution de fabrication des outils PDC	18
2.2.2. Mode de travail des outils PDC	19
2.3 Les outils à diamant	19
2.3.1. Les outils à diamants naturels.....	19
2.3.2 Les TSP (Thermally Stable polycristallin).....	19
3. Caractéristique mécanique des roches	20
3.1 Caractéristique mécanique des roches intactes	21
4. Mécanisme de rupture du rocher pendant le forage.....	22
4.1. Les phases de pénétration de l’outil dans la roche	22
4.1.1 Zone écrasée (concasse).....	22
4.1.2 Formation des fissures.....	23
4.1.3 Propagation des fissures.....	23
4.1.4 Écaillage	23
Synthèses	24

CHAPITRE III : LES MÉTHODES D’OPTIMISATION ET MODELES

DOPTIMISATION DU PROCESSUS DE FORAGE.....	25
1. Introduction.....	25
2. Les méthodes d’optimisations	25
2.1. Les méthodes directes	26
2.1.1. La méthode de Friedman et Savage	26
2.1.2. La méthode du Simplex.....	27
2.1.2.1 Règle d’évolution du simplex.....	27
2.1.2.2 Arrêt de la procédure	28
2.2. Les méthodes indirectes	28
2.2.1 Les plans d’expériences (PE).....	29
2.2.2 Les plans factoriels fractionnés	29
2.2.3. Simulations numérique.....	30
3. Introduction à l’application de la modalisation dans le domaine de forage	30
4. Les étapes d’optimisation du taux d’avancement de forage	31

4.1 Traitement de l'information.....	31
4.2 Type de données	31
4.3 La procédure de modélisation	31
5. Modèles mathématiques d'optimisation du processus de forage.....	32
Synthèses.....	36
CHAPITRE IV : METHODOLOGIE D'APPLICATION DES PLANS	37
D'EXPERIENCES.....	
1. Introduction.....	37
2. Vocabulaire des concepts généraux des (MPE).....	38
2.1. La réponse (y).....	38
2.2. Les facteurs (x)	38
2.2.1 facteur continue.....	39
2.2.2 Facteur discret	39
2.2.3 Facteur qualitatif	39
2.3 Borne inférieure (b_{inf})	39
2.4 Borne supérieure (b_{sup})	39
2.5. Paramètres	39
2.6. Constantes	39
3. L'optimisation par plan d'expériences.....	40
3.1 L'exécution de la méthode des plans d'expériences.	41
3.2 Première étape de formalisation du problème.....	42
3.2.1 Objectif de formalisation	42
3.2.2 Les facteurs	42
3.2.3 La Réponse.....	42
3.2.4 Domaine expérimental continue (DEC).....	43
3.2.5 Domaine expérimental discret (DED).....	43
3.2.6. Principe et loi de corrélation (test de Person)	44
3.3 Deuxième étape construction du plan d'expérience	44
3.4. Troisième étape de réalisation des essais	45
3.4.1. Expériences réelles.....	45
3.4.2. Expériences virtuelles	46
3.4.3. Matrice d'expériences	46
3.5 Quatrième étape modélisation par la méthode des plans d'expériences.....	49

3.5.1 Équation du modèle	49
3.5.2. Signification des coefficients de dispersion et (teste de Student)	50
3.6. Cinquième étape (Analyse des résultats d'essais)	50
3.6.1 Analyse de la variance	50
3.6.2 Variance résiduelle.....	52
3.6.3 Teste de Fisher-Snedecor	53
3.6.4 Définition des concepts utiles à l'élaboration des tests d'hypothèse.....	54
4. Les différents types de plans d'expériences	55
4.1 Plans factoriels complets à deux niveaux	55
4.2 Présentation des résultats d'essais	56
4.3 Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux	56
4.4 Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux 2^{k-q}	57
4.5 Les plans de Koshal.....	58
4.6 Les plans de Rechtschaffner.....	58
4.7 Les plans de Plackett et Burmann.....	58
4.8 Les plans sursaturés	59
4.9 Plans à plusieurs niveaux	59
4.10 Plans complets à trois niveaux	60
4.11 Carrés latins	60
4.12 Carrés de Youden.....	60
4.13. Plans à niveaux mixtes.....	61
Synthèse	61
CHAPITRE V : RECHERCHE DU REGIME DE FONCTIONNEMENT DES INSTALATIONS DE FORAGE CAS DE LA MINE DE DJEBEL-ONK.....	62
I Introduction.....	62
II. Description du site d'études (la carrière de Djebel-Onk)	62
1. Situation géographique.....	62
2. Cadre géologique de la mine de Djebel-Onk	63
3. La stratigraphie.....	63
III. Optimisation par plan d'expérience des paramètres de forage	65
1.1. Formalisation du problème	65
1.2 définition des facteurs	65
1.2.1. les variables de sorties	65

1.2.2 Les variables d'entrées	65
1.2.2.1. Les variables contrôlables	65
1.2.2.2 Les variables non contrôlables (Détermination de la résistance à la compression).....	66
1.3 Triage des variables	68
1.3.1 Principe et loi de corrélation (test de Person)	68
1.3.2 Corrélation entre les variables	69
1.4 Le domaine d'étude.....	72
1.5 Domaine d'étude possible (DEP)	72
2. Construction du plan d'expérience	73
2.1 Détermination de la fonction objective (y_{mod})	73
2.2 Exécution du plan d'expérience par système d'équation.....	73
2.3 Codage des variables suivant le plan de Taguchi.....	73
3. Réalisation des essais	74
3.1 Essais sur la machine de forage ATLAS-COPCO ROC L8	74
4. Modélisation par la méthode des plans d'expériences.....	76
4.1 Equation du modèle.....	76
4.1.2 Détermination des coefficients	76
4.1.3 Détermination de la fonction objective	77
5. Analyse des résultats d'essais)	77
5.1 Hypothèses statistiques	77
5.2 Test de Student :	79
5.3 Test de Fisher.....	80
5.4 Normalisations des variables.....	81
5.5 Validation du modèle (calcul de résidus).....	82
IV. Vérification de la représentativité du modèle dans les conditions de la mine de Djebel- Onk	84
IV.1 La variation du taux de penetration dans la couche du Calcaire phosphate' sillicieux.....	84
IV.2 La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire gypseux	85
IV.3 La variation du taux de pénétration dans la couche du Phosphate	85
IV.4 La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire phosphate' blanc	86
IV.4 La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire phosphate' noir	86
V. Régime optimale de fonctionnement de la machine de forage dans Les conditions de la mine de Djebel-Onk	87

V.1 Comparaison des résultats obtenus avec l'état actuel dans la mine de Djebel-Onk.	87
V.2 Interprétation mathématique et graphique	90
V.3 Synthèses	94
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	98
ANNEXE	104

Liste des tableaux

Tableau	Liste des tableaux	Page
1	Comparaison entre les différents modes de forage.....	7
2	Rôle du fluide de forage.....	10
3	Vitesses annulaire pour remonter les cutting.....	11
4	Effet des propriétés des roches sur l'opération de forage.....	20
5	Effet du forage sur la roche.....	21
6	Plan d'expériences (unités codées).....	56
7	Plan d'expériences et résultats expérimentaux.....	56
8	Les paramètres de la machine de forage.....	66
9	Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de Rc.....	68
10	La résistance à la compression des roches du Djebel-Onk.....	68
11	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour la couche du calcaire gypseux.....	69
12	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour la couche du calcaire phosphaté blanc.....	70
13	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour la couche du calcaire phosphaté siliceux.....	70
14	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour la couche du calcaire phosphaté noir.....	71
15	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour la couche du phosphate.....	71
16	Corrélation du taux de pénétration avec la pression de rotation et de poussée pour les différentes couches.....	72
17	Niveau du domaine des facteurs.....	72
18	Domaine de définition des facteurs dans les conditions de Djebel-Onk.....	73
19	Codage des variables.....	74
20	Les résultats des essais réalisés.....	75
21	Matrice des essais de Taguichi.....	76
22	Matrice de planification de Taguichi.....	77
23	Hypothèses statistiques.....	78

Tableau	Liste	Page
24	Teste de Student.....	80
25	Test de Fisher	80
26	Transfert des variables	82
27	Vérification du modèle.....	82
28	Récapitulatif des résultats pour les différentes formations rocheuses.....	87
29	Interprétation mathématique et graphique des variables contrôlables.....	92
30	Interprétation mathématique et graphique des variables non contrôlables.....	93
31	La variation du PR dans le domaine de variation des paramètres	93

Liste des figures

Figure	Liste des figures	page
1	Les opérations minières.....	1
2	Forage en percussion.....	4
3	Principe du forage rotatif.....	5
4	Cycles de forage roto percutant.....	6
5	Fonctionnement du marteau et avancement	13
6	La sondeuse ROC L8.....	13
7	Fonctionnement du panneau de commande	14
8	Outil à molette.....	17
9	Outil PDC	18
10	Outil à diamants naturels.....	19
11	Outil TSP.....	19
12	Types généraux de destruction de la roche lors de la foration.....	21
13	Phase de déformation plastique.....	22
14	Phase de de formation des fissures.....	23
15	Phase de propagation des fissures.....	23
16	Phase d'écaillage	23
17	Méthode a une seule variable.....	26
18	Domaine du facteur.....	39
19	Organigramme des étapes de réalisation du plan d'expériences.....	40
20	Domaine expérimental continue (DEC).....	43
21	Domaine expérimental discret (DED).....	43
22	Plan factoriel pour un système de forage.....	55
23	Plan de Koshal.....	58
24	Plan en carre Latin.....	60
25	Situation géographique du site d'étude.....	63
26	Les différentes formations rocheuses de Djebel-Onk.....	64
27	Machine de compression simple.....	64

Figure	Liste des figures	page
28	Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X1.....	83
29	Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X2.....	84
30	Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X3.....	84
31	Surface de réponse pour la couche de calcaire phosphaté siliceux.....	85
32	Surface de réponse pour la couche de calcaire phosphaté gypseux.....	86
33	Surface de réponse pour la couche de phosphate.....	86
34	Surface de réponse pour la couche de calcaire phosphaté blanc.....	87
35	Surface de réponse pour la couche de calcaire phosphaté noir.....	87
36	Histogramme des régimes de fonctionnement de la sondeuse ROC L8.....	88
37	Régime actuel (50,50) (bar).....	89
38	Régime propose (30,30) (bar).....	89
39	Régime propose (70,30) (bar).....	90
40	Régime propose (30,110) (bar).....	90
41	Régime propose (70,110) (bar).....	91
42	Régimes proposes	94

Introduction générale :

Le forage a été développé et est devenu spécialisé dans le cadre de trois domaines fondamentaux de la technologie: les trous les plus profonds (plusieurs centaines de mètres) sont forés pour le pétrole et le gaz; Des trous peu profonds (quelques dizaine de mètres), en prospection et exploration de minéraux solides; Et des trous qui sont forés à des profondeurs de quelques mètres pour le placement d'explosifs (principalement dans les mines et les constructions d'ouvrages souterrains ou à ciel ouvert).

Le forage est une composante essentielle dans de nombreux segments de l'industrie Algérienne, comme la récupération des ressources (le pétrole, le gaz, l'exploitation minière), les systèmes d'infrastructure civile (les égouts, les tunnels routiers, les métros), l'assainissement de l'environnement et à des fins scientifiques. Les recherches entreprises pour l'amélioration du processus de forage à des fins productives peuvent avoir un impact énorme sur l'économie Algérienne. Cela permet d'examiner la faisabilité technique et scientifique des avancées substantielles dans le forage et les technologies connexes. Les concepts de nouvelles applications de forage mécanique y compris les progrès dans la connaissance de l'interaction outil-roche.

La première préoccupation des spécialistes dans le monde du forage est d'atteindre le régime optimal dans le processus de forage afin d'obtenir une efficacité élevée tout en maintenant la limite appropriée pour le coût.

L'industrie minière exploite des minéraux à des fins de production multiples. Le processus de production inclut généralement :

- Préparation du champ minier (travaux de terrassement).
- Les travaux de forage et de tir.
- Travaux de chargement et de transport.
- Préparation mécanique et traitement du minerai pour la commercialisation.

Le forage est l'étape primordiale de cette extraction, il présente la pierre angulaire de tout le processus d'exploitation minière.

Le Procédé de forage dans des couches géologiques ayant des caractéristiques physico-mécaniques intrinsèques différentes nécessite une optimisation des paramètres de la machine de forage pour obtenir des rendements rationnels pour chaque couche. Il faut, en tout cas, prendre en compte cette diversité des propriétés des roches en raison de

son impact significatif et important sur le processus de forage en général et le forage minier en particulier. Pendant le processus de forage dans les mines et lors du passage d'une couche à une autre, nous devons faire face à cette transition, en tenant compte des paramètres techniques de la machine de forage d'une part, et d'autre part les caractéristiques physico-mécaniques de la roche à forer.

Dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk, qui présente le cas d'étude de cette thèse. La variation des propriétés des roches est très remarquable, de ce fait le problème d'optimisation des travaux de forage persiste, afin de trouver un modèle mathématique représentatif de la variation du taux de pénétration de l'outil de forage dans les différentes formations géologiques du site d'étude.

Le but du travail :

Pour atteindre cet objectif les travaux de cette thèse s'articulent sur cinq chapitres qui traitent l'optimisation du régime de fonctionnement des installations de forage dans les mines.

Le premier chapitre est un guide pratique pour s'initier aux techniques de forage les plus utilisées dans le domaine minier. Les différents modes de forage ainsi que leurs domaines d'applications feront l'objet principal de ce chapitre. Le deuxième chapitre traite le contact outils-roches pour montrer l'influence des paramètres mécanique de la roche sur l'outil de forage. Les différentes méthodes d'optimisations directes et indirectes ont fait l'objet d'une étude bibliographique détaillée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre est consacré à une étude bien détaillée sur la méthodologie d'application des plans d'expériences qui a fait la base d'application pour la recherche des régimes de fonctionnement des installations de forage dans les conditions du site d'étude dans le dernier chapitre.

A la fin de cette thèse des conclusions et recommandations seront mis en relief pour parer aux problèmes de forages dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk.

CHAPITRE I : LES INSTALLATIONS DE FORAGE DANS LE DOMAINE MINIER

1. introduction :

L'opération de forage présente une étape importante dans l'exploitation minière. Le forage des trous de mines influe sur les opérations minières postérieures, telles que le tir, chargement, transport et concassage. Plusieurs techniques de forages ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique [31].

Nous retiendrons ici trois techniques courantes de forage, le forage au battage (percutant), le forage Rotatif et le forage percussion rotatif Marteau Fond de Trou (MFT). Parmi ces trois modes de forage seul le mode rotatif et roto-percutant sont retenus dans le domaine minier. Le forage des trous de mines est exécuté suivant un plan de tir conçu pour l'abattage des roches dans les différents gradins dans la carrière [6] figure 1

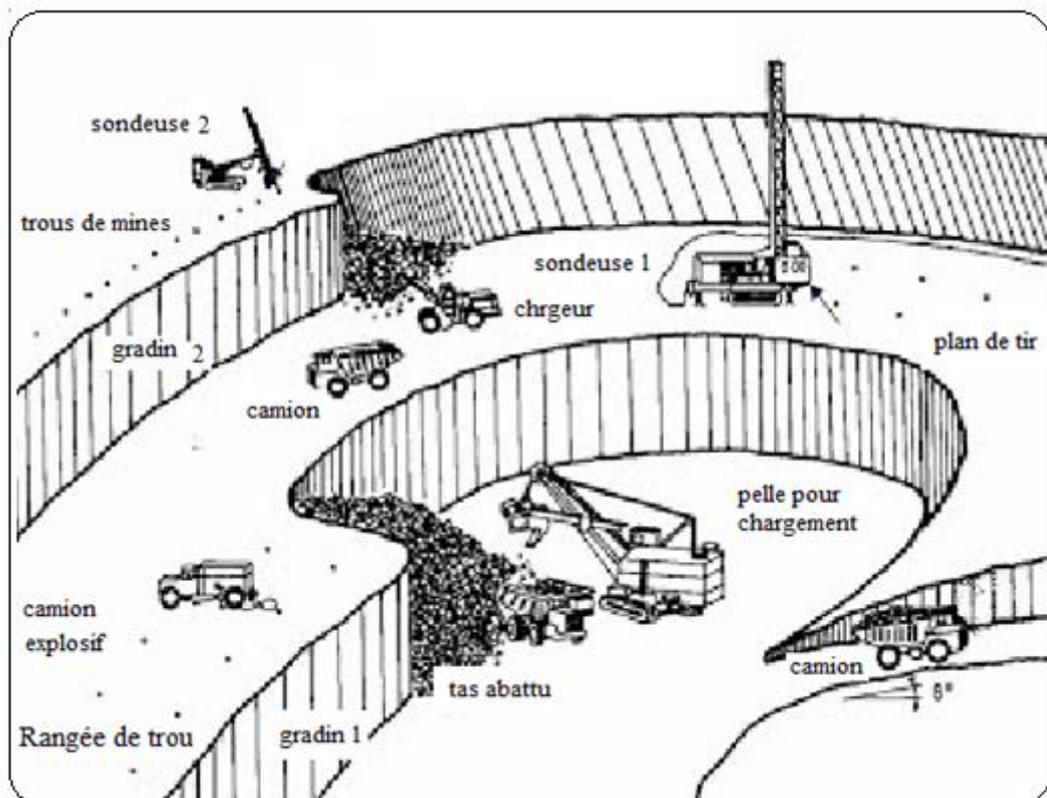


Figure 1 : les opérations minières [6]

2. Les différents modes de forage :

2.1 Forage percutant :

Le forage au battage est la technique la plus ancienne, simple de conception, elles présentent un intérêt surtout dans les terrains sédimentaires. [6],[58].

2.1.1 Principe de fonctionnement :

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 cutting vers la surface. 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 (figure 2). Ce mode nécessite une rotation minimale et une percussion maximale et une poussée sur l'outil nulle [58],[31].

Remarque : *Le battage est une méthode universelle qui permet de traverser les terrains non consolidés de toute granulométrie ; mais cette technique est chère, et le domaine du choix de cette méthode est appliqué dans les terrains cohérents même durs ; toutefois, le rendement décroît très vite avec la dureté et le coût devient prohibitif en roche très dure.*

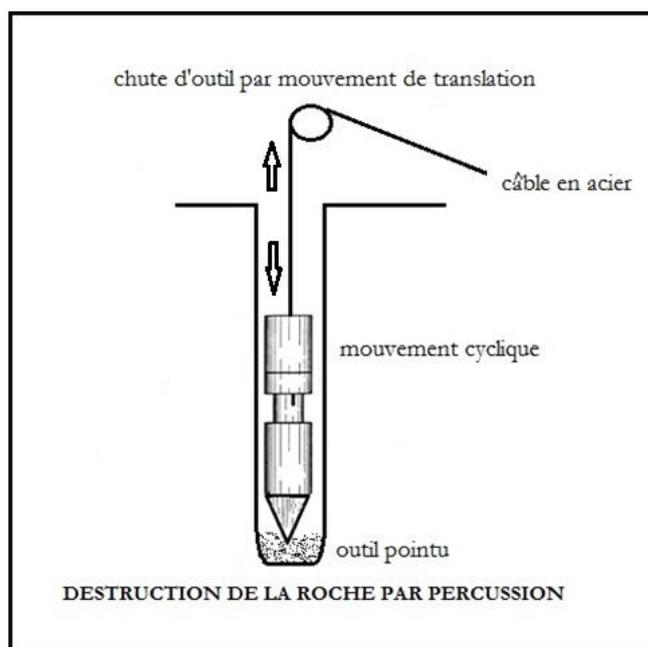


Figure 2 : Forage en percussion

2.2 Forage rotatif :

Certaines machines de forage rotatif ont des tailles très importantes et peuvent forer jusqu'à plusieurs centaines de mètres. La technique de forage rotatif est exclusivement utilisée dans les terrains sédimentaires y compris les terrains durs pour les machines de fortes puissances (figure 1) [31], [47].

Cette méthode, conçue pour forer dans les terrains meubles, et c'est la seule qui permet de réaliser des forages profonds dans les bassins sédimentaires récents, dont les formations sont variées et souvent sans cohésion. Elle peut être employée également en terrain cohérent jusqu'à une certaine dureté, mais son rendement diminue rapidement, de sorte qu'elle convient mal aux zones très dures [14], [58], [13].

2.2.2 Principe de fonctionnement :

Les efforts appliqués dans ce mode de forage se résument comme suit :

- ✓ Une poussée sur l'outil qui est en contact permanent avec la roche. Celle-ci est déterminée généralement par méthodes empiriques en fonction de la nature de la roche et du diamètre du trou. L'augmentation de la poussée se traduit par une augmentation de la vitesse jusqu'à une certaine limite au-delà de laquelle la vitesse diminue [1].
- ✓ Une rotation appliquée sur la tige de forage qui entraîne la rotation de l'outil dans la zone de contact avec la roche la vitesse de pénétration croît avec la vitesse de rotation [62]. [47], [6],
- ✓ Une pression d'air comprimé pour le soufflage du trou afin d'éviter le blocage de l'outil. L'objectif du soufflage est d'évacuer les débris de foration à une vitesse supérieure à 15-20 m/s. [47]

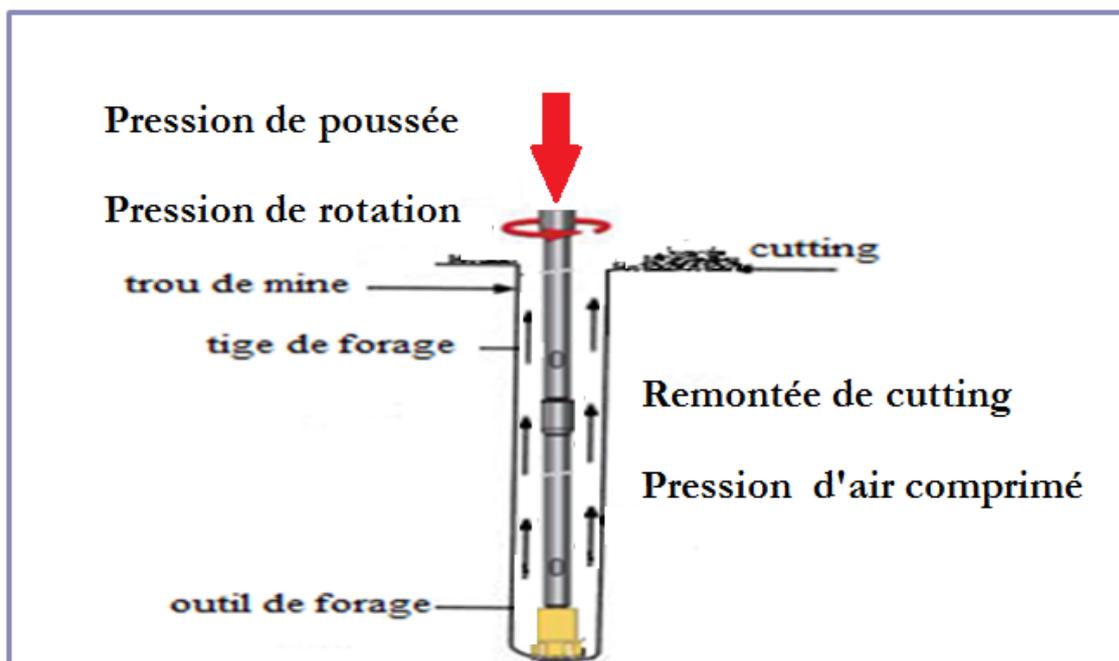


Figure 3 : principe du forage rotatif

2.3 La technique de forage roto percutant (MFT)

Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grès, calcaires). Le principe du marteau-fond-de-trou est de transférer directement sur l'outil l'énergie de frappe, contrairement aux marteaux-perforateurs classiques (plus de perte d'énergie par les tiges) [62]. En récupérant l'air comprimé nécessaire au fonctionnement du marteau pour l'évacuation des déblais [47].

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. Le marteau fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé qui est délivré par un compresseur en plus de la machine de forage. Le flux d'air permet de remonter les cutting du terrain en surface (figure 4) [31],[14] ,[62].

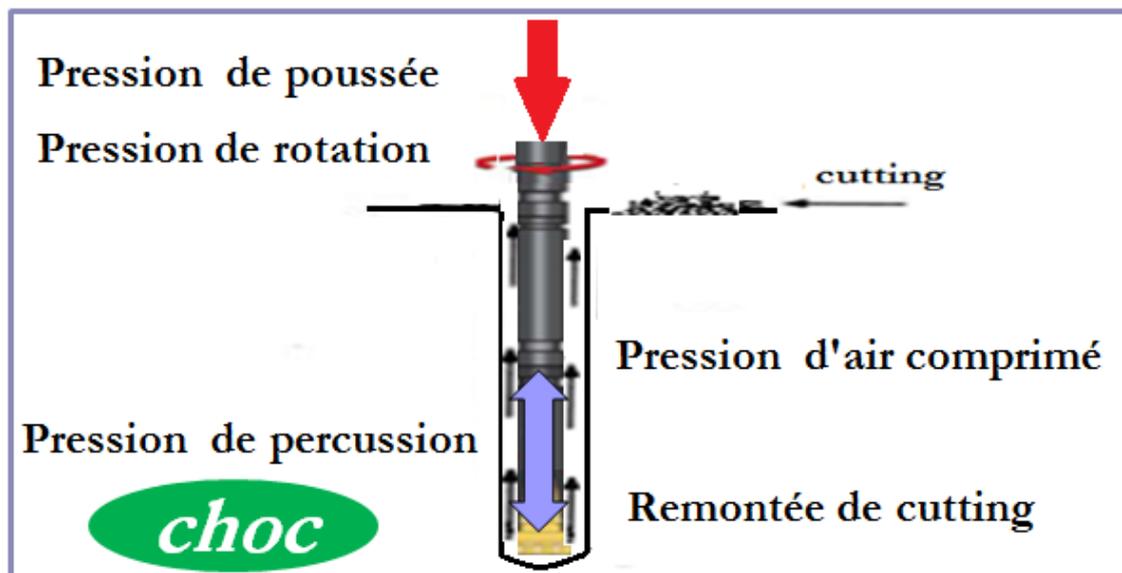


Figure 4 cycles de forage roto percutant

3. Règles de comparaison entre les différents modes de forage :

Un tableau comparatif général indique, en première partie les caractéristiques générales de ces trois modes de forage, et leurs caractéristiques techniques, pour les différentes formations géologiques [34].

Tableau 1 : comparaison entre les différents modes de forage [6]

caractéristiques générales	Percutant	Rotatif	Roto-percutant
Principe de perforation	Chute répétée d'un outil au bout d'un câble.	rotation et pression sur l'outil.	Rotation et pression sur l'outil + marteau-fond-de-trou.
Domaine d'utilisation			
Spécifique	-	Terrain meuble	Terrain cohérent
d'élection	Terrain moyen, cohérent	Terrain tendre à moyen	Terrain très dure
Impossible	Terrain très dur	Terrain très dur,	Terrain meuble
Type d'ouvrage bien adapté	Tous forages jusqu'à 100 m	Forage profond terrain sédimentaire varié.	Forage 30 à 80 m
Poids sur l'outil sans charge extérieure. Tonnes	10-15	20-30	20-30 + compresseur.
Diamètre usuel (mm)	140-460	140-280 et plus	140-230
Caractéristiques techniques			
Vitesse de rotation (tr/min)	-	40 à 150	40 à 150
Couple (m.kg)	-	700 à 1200	700 à 1200
Poids sur l'outil (tonnes)	Outils de 0.5 à 1	2 à 10 et plus	2 à 10 et plus
Puissance pour rotation CV élévation	30 à 50	50 à 120.	50 à 120.
Force de levage (tonnes)	3 à 5	5 à 20	5 à 20
Evacuation déblais (puissance Nécessaire)	Soupapage (par moteur de la sondeuse)	boue (parfois eau claire). pompe à boue	air (et mousses) compresse de 10-25 bars
vitesse d'avancement (m/min)			
Roches très dures	-	-	2
Roches dures	0.1 à 0.2	0.2 à 1	2 à 3
Roches tendres	0.2 à 0,5	1 à 3	3 à 5
Terrain peu consolidé	0,5 à 1.5	1 à 5	-

4. Les paramètres de forage dans les mines

4.1 L'utilisation du forage rotatif et roto-percutant dans les mines :

Nous allons traiter dans ce travail l'aspect technique d'utilisation rationnel des paramètres contrôlables de la machine de forage, afin d'aboutir au choix du meilleur mode de forage dans les mines qui lui est spécifique. Le but essentiel pour les travaux de

forage dans les mines est de trouver le taux d'avancement le plus important pour rentabiliser ce processus. Les conditions minières du terrain sont très variables [4], d'où la complexité de trouver une démarche unique généralisée pour toutes ces conditions. Dans cette perspective le seul moyen d'intervenir pour parer à cette problématique, est d'intervenir au niveau de la machine de forage pour contrôler les différents paramètres qui ajustent la variabilité des conditions géologiques du terrain minier [14], [13], [62]. Les paramètres qui contrôlent l'avancement du forage sont spécifiques à la technique utilisée [47] :

- ✓ Rotation de l'outil,
- ✓ poussée sur l'outil,
- ✓ Pression du fluide (boue ou air).

Ils influent de manière différente en technique rotatif qu'en technique de marteau fond de trou sur l'avancement. Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour travailler dans de bonnes conditions :

- ✓ Avancement,
- ✓ Évacuation régulière des cutting,
- ✓ Stabilisation des parois.

4.1.1 Le mode rotatif :

En forage Rotatif, pour une vitesse de rotation donnée le paramètre essentiel d'avancement d'un forage est le poids appliqué sur l'outil [34], La vitesse de rotation est la plus régulière possible et en fonction du diamètre de l'outil d'une part et de la nature des terrains d'autre part. En règle générale la vitesse de rotation doit être plus lente pour les terrains durs [14], [64].

4.1.2 Le mode roto-percutant :

En forage MFT, la poussée n'est plus le facteur déterminant mais la percussion du taillant sur la roche donnée par la pression de l'air comprimé injectée dans le marteau. Toutefois, un défaut de poussée peut induire des frappes à vides qui sont très néfastes pour le matériel (marteau et tête de forage) [46]. Une poussée trop forte endommage les boutons du taillant. En pratique, avec l'expérience la poussée est réglée à l'oreille (son de la frappe lourde = marteau travaillant correctement) de façon à obtenir une vitesse de rotation régulière et à éviter les vibrations excessives du bâti de la machine [17], [34].

5. Le choix du mode de forage approprié au domaine minier :

Malgré l'utilisation intensif du forage rotatif a mollette auparavant dans le domaine minier, l'actualité présente l'utilisation du forage au marteau fond du trou (MFT) [47]. Vue l'efficacité de ce dernier pour le forage des trou peu profond, présenté par un taux d'avancement important proportionnellement au mode rotatif et une utilisation très efficace de l'énergie pneumatique que ce soit pour le soufflage du trou ainsi que la lubrification de l'outil de forage[62]. Notant aussi que la durée de vie des outils a marteaux fond du trou est plus importante que celle des mollettes. Cette dernière est plus utilisée dans le domaine pétrolier pour des profondeurs importantes [13], [31].

6. Principe de commande des machines de forage :

6.1 La poussée sur l'outil (système hydraulique) :

La poussée est fonction de la puissance propre de la machine et du poids du train de tige au-dessus de l'outil. De suite, il est clair que plus le forage est profond, plus le poids sur l'outil induit par le poids des tiges est important. Par conséquent, en début de forage la poussée sur l'outil est parfois faible, ceci est particulièrement vrai pour les machines légères, et inversement pour les profondeurs importantes, le train de tige doit être retenu pour ne pas appliquer une poussée excessive à l'outil [47], [31].

La poussée à appliquer sur un tricône (rotary) est beaucoup plus importante que pour un taillant (MFT). Par contre la vitesse de rotation est réduite [17].

6.2 Force de levage (système hydraulique) :

La force de levage est fournie par la puissance de la machine, sa valeur est donnée par le constructeur et s'exprime généralement en tonne. Elle permet évidemment de relever le train de tige mais aussi de débloquer l'outil en cas de blocage de celui-ci suite à un effondrement des parois. On voit que la poussée de la machine (en plus du train de tiges) doit être élevée en début de forage alors qu'à partir d'une certaine profondeur il faudra plutôt "retenir" le train de tiges (poids important) [62] [58].

6.3 Rotation transmise à l'outil (système hydraulique) :

La rotation est transmise soit de manière hydraulique (circuit hydraulique), soit directement (moteur, boîte, embrayage ou tige carrée sur les grosses machines) au train

de tige par la tête de rotation qui entraîne les tiges mécaniquement. Elle se calcule simplement en comptant le nombre de tour par minute [17], [33].

6.4 Le couple de la machine de forage (système hydraulique) :

Le couple de la machine s'exprime en Newton-mètre et joue un rôle fondamental pour les machines rotatives travaillant dans des formations sédimentaires dures et pour les grandes profondeurs. Pour les machines légères [17], il joue un rôle secondaire car la technique rotative est limitée dans les terrains durs. Nous verrons que les valeurs exprimées sont très en deçà des normes conseillées (tableau 1).

6.5 L'air et la boue de forage :

Les fluides de forage sont soit de l'air lubrifié (avec ou sans mousse) pour le forage au marteau fond de trou soit de l'eau plus ou moins chargée en boue pour le forage rotatif. Ceux-ci jouent plusieurs rôles qui sont résumés dans le tableau ci-dessous [17], [47].

Tableau 2 : Rôle du fluide de forage

Technique de forage	Type de fluide	Rôle du fluide	Profondeur du trou
Rotative	boue de forage : - bentonite. - polyacrylate - la baryte - polymère	Remontée des cutting. Colmatage et stabilisation des parois. Lubrification et refroidissement du train de tiges et de l'outil.	Profondeur importante
MFT	- Air comprimé lubrifié. - Air comprimé lubrifié mousse (agent moussant).	Fonctionnement du marteau. Remonté des cutting (soufflage).	Faible profondeur

Remarque 1 : *Le forage rotatif peut être réalisé à l'air seul, sans boue de forage. Cette technique est surtout appliquée en début de forage pour les premiers mètres (10-20 mètres) et évite de préparer une boue de forage, dans l'optique de forer au Marteau Fond de Trou.*

Remarque 2 : *les cutting humides ont tendances à s'agglomérer entre eux, trop lourds pour remonter à la surface par le flux d'air, ils restent en suspension dans le trou jusqu'à réaliser un bouchon dans l'espace annulaire.*

6.6 L'air au forage MFT

L'air a deux fonctions distinctes, faire fonctionner le marteau et remonter les cutting à la surface. Les paramètres essentiels à contrôler sont donc :

- ✓ Le débit d'air minimal pour le fonctionnement du marteau (quelques litres par secondes) et surtout celui disponible pour créer un flux d'air d'une vitesse suffisante permettant de faire remonter les cutting de tailles moyennes (quelques millimètres).
- ✓ L'ajout de mousse permet de créer une émulsion air/mousse qui augmente le phénomène de portance, et donc permet de remonter des cutting de diamètres de l'ordre du centimètre pour des vitesses ascensionnelles faibles de l'ordre de 10 à 15 m/s.
- ✓ La pression de l'air injecté : Elle a un rôle direct sur la puissance du marteau pour écraser la roche et donc sur la vitesse d'avancement du forage (tableau 3) [47]. La lubrification de l'air doit être permanente car elle lubrifie la chemise du piston du marteau.

Le tableau ci-dessous donne la vitesse annulaire nécessaire pour remonter des cutting sphériques de densité 2.8 en forage MFT à l'air sans ajout de mousse.

Tableau 3 : vitesses annulaire pour remonter les cutting[47]

Φ des cutting en mm	vitesse de l'air en m/s
0.1	1
0.5	5
1	8
5	18
10	24

6.7 Le choix de la technique :

Le comportement des terrains à la foration dépendra bien sûr de leur nature, L'expérience seule permet d'évaluer correctement la remontée de cutting et l'avancement du forage en fonction de la méthode utilisée.

Au-delà d'une certaine profondeur le mode rotatif à l'air est exclu car difficile à maîtriser (remontée des cutting). Tandis que le mode de forage roto-percutant présente

des avantages pertinents pour les forages de faible profondeur telle utilisée dans l'exploitation minière [47].

7 Mise en œuvre du forage roto-percutant dans les mines :

7.1 Le marteau fond de trou :

Le marteau est un outil de précision, composé d'un piston qui coulisse dans une chemise par un jeu de lumières dans lequel circule l'air comprimé. Le piston frappe le taillant en phase de percussion et laisse passer l'air comprimé en phase de soufflage (figure 5).

La lubrification du marteau (piston) est primordial et l'air injecté dans celui-ci est lubrifié tout au long du forage grâce à un lubrificateur qui se place entre le compresseur et la vanne d'admission d'air de la foreuse. (Huile de forage biodégradable [13], Il est impératif de vérifier à chaque changement de tige la présence d'arrivée d'huile avec l'air à la sortie de la tête de forage (soufflage léger et rapide sur une planchette placée sur le haut du train de tiges - traces d'huile sur la planchette).

Lors du démontage complet du marteau on prendra soin de l'huiler en introduisant de l'huile hydraulique directement et de bien graisser à la graisse au cuivre tous les filetages.

Une bonne foration correspond à un équilibre poussée/rotation offrant une vitesse de pénétration constante et une rotation régulière sans à-coup. Figure 5.

Régulièrement (tous les 50 cm) le trou est nettoyé par soufflage afin d'évacuer les cutting et d'éviter tout bourrage. Les gros cutting ont tendance à rester en suspension au-dessus du MFT pendant la foration. A l'arrêt de la circulation d'air, ils retombent sur le MFT et peuvent le bloquer. Pour nettoyer le trou, le MFT est relevé légèrement (arrêt de la percussion) et mis en position de soufflage [13], La totalité du débit d'air fourni par le compresseur doit permettre de nettoyer le forage de tous les cutting. Si nécessaire, on peut ramoner sur la hauteur de la tige pour bien nettoyer le trou.

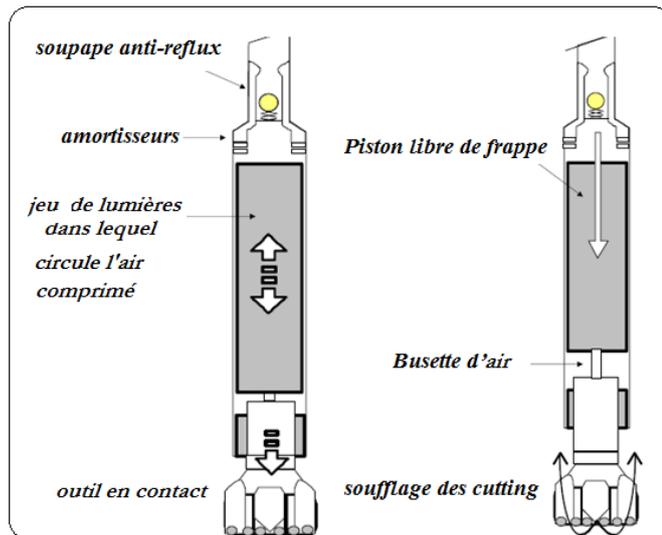


Figure 5: fonctionnement du marteau et avancement [47]

8 Les machines de forage dans la carrière de Djebel-Onk

Dans la carrière à ciel ouvert de Djebel-Onk quatre sondeuses en service, Trois ATLASCOPCO ROC L8 ; ROC L6 ; ROC L9 sur chenils et une sondeuse INGERSOLL ROUND Sur pneus. Notre étude va ce concentrée sur la sondeuse de type ATLASCOPCO ROC L8.

8.1 Description de la machine :

L'engin de forage Roc L 8 est un engin hydraulique qui fonctionne en diesel conçus pour le forage en surface, telles que carrières et sites d'installation. Le mode roto-percutant, est appliqué dans ce type de machine [4].

La Machine est composée d'un bâti, d'une tête de rotation hydraulique, d'une unité hydraulique, et d'une unité de pompage. A cela, s'ajoute un compresseur d'air pour travailler en marteau fond de trou.

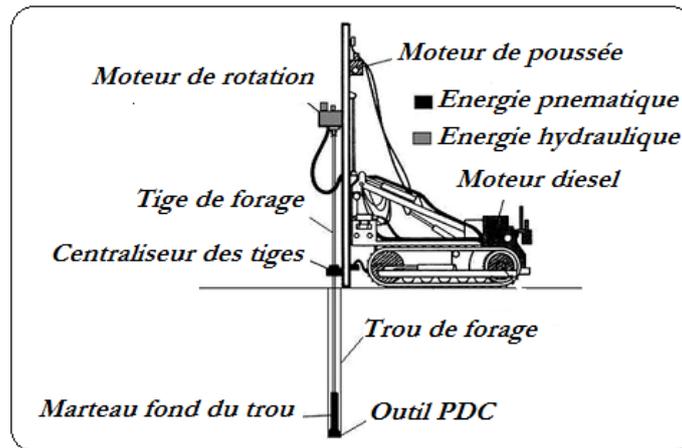


Figure 6 : la sondeuse ROC L8

8.2 Principe de fonctionnement de la ROC-L8

La foreuse fonctionne grâce à un circuit hydraulique qui alimente un moteur hydraulique pour la rotation du train de tiges; un vérin hydraulique pour la montée/descente des tiges et délivre la poussée sur l'outil [4]. Ce vérin agit sur la tête de rotation (mobile le long du portique) par l'intermédiaire d'une chaîne. La machine est pilotée par un panneau de commandes (Figure 7). Le Marteau pneumatique est alimenté par le compresseur Atlas, 0-25 bars. L'air comprimé utilisé pour le marteau doit être en permanence chargée en huile (lubrificateur placé entre le compresseur et la vanne d'admission d'air).

La pression hydraulique donnée par le "power pack" est de 250 bars maximum, et est réglé à l'entrée du panneau de contrôle par la vis 1 de réglage. La pression de rotation est réglée en marche automatique sur la vis 2, [4], [16], [3].

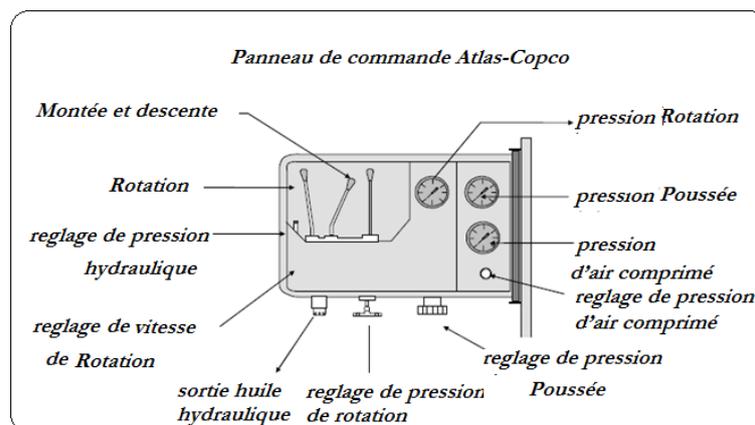


Figure 7: fonctionnement du panneau de commande [47]

Synthèses :

- ✓ Ce chapitre est un guide pratique pour s'initier aux techniques de forage les plus utilisées dans le domaine minier.
- ✓ Les paramètres qui contrôlent l'avancement du forage sont spécifiques à la technique utilisée : rotation et poussée sur l'outil, vitesse ascensionnelle et pression du fluide (boue ou air).
- ✓ Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour travailler dans de bonnes conditions : avancement, évacuation régulière des cutting, stabilisation des parois.
- ✓ En forage Rotatif, pour une vitesse de rotation donnée le paramètre essentiel d'avancement d'un forage est le poids appliqué sur l'outil.
- ✓ La vitesse de rotation est la plus régulière possible et en fonction du diamètre de l'outil d'une part et de la nature des terrains d'autre part. En règle générale la vitesse de rotation doit être plus lente pour les terrains durs.
- ✓ Les installations de forages dans le domaine minier doivent s'adapter aux conditions difficiles du terrain (les formations géologiques, dureté, résistance mécanique des roches....etc.)
- ✓ Ces difficultés de formations rocheuses en contacte directe avec les outils de forage feront l'objet d'étude détaillé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II : CONTACT DE LA ROCHE AVEC L'OUTIL DE FORAGE

1. Introduction

Au niveau d'un chantier de forage, Altindag [2] a identifié trois grands groupes de paramètres qui influent sur le processus de forage :

- Les paramètres géologiques (types de roches forées), leurs propriétés physiques et mécaniques, l'orientation de la foliation, les discontinuités et la composition minérale.
- Les paramètres des machines de forage tel que : le type d'outils utilisé, l'effort de poussée sur l'outil, la vitesse de rotation.
- Le processus opératoire avec les méthodes de forage, les opérations et la maintenance de la machine, l'expérience de l'opérateur et le support logistique.

Concrètement, un outil est qualifié de performant s'il permet d'obtenir des vitesses d'avance élevées ainsi que des coûts d'exploitation modérés.

La vitesse d'avancement est essentiellement liée à l'évolution de l'énergie mécanique nécessaire pour détruire un volume unitaire de roche. Le rapport entre cette énergie E_m et ce volume V_R , à un instant donné, définit l'énergie spécifique d'excavation E [62], [28], [59][2].

$$E = \frac{E_m}{V_R}$$

Cette énergie spécifique dépend du couple fourni par les moteurs et de la poussée sur l'outil. Ceux-ci sont liés au design de l'outil, à l'agressivité des formations rocheuses rencontrées (duretés, températures et pressions de confinement, etc.) et à la dégradation de l'outil (usure, fracture, etc.) [59],[81],[82].

2. Historique sur les outils de forages:

Deux familles d'outils de forage sont couramment utilisées sur les chantiers : les outils tricônes à inserts en carbure et les outils à taillants polycristallin diamant compact (PDC). Les outils tricônes sont associés à l'invention du forage par rotation au début du XXe siècle. Cette technique succéda à celle du forage par battage vieille de plus de 2000 ans qui utilise le mouvement périodique vertical d'un outil dans le sol créant ainsi un trou par l'enfoncement de celui-ci. Les outils PDC ont fait leur apparition à la fin des années 70 et représentaient 2% de la part de marché en 1982. En 1990, cette part a progressé jusqu'à atteindre 20% puis plus de 60% en 2010. En 2020, les outils PDC

représenteront plus de 80% de part de marché grâce aux nouveaux progrès réalisés sur la performance des matériaux diamantés [62].

2.1. Les outils tricônes :

Les outils tricônes utilisés dans les formations rocheuses relativement dures possèdent trois molettes coniques composées d'inserts en carbure de tungstène à liant cobalt (WC-Co) montées sur un corps moulé aussi en carbure cémenté. La rotation de la garniture engendre le roulement des molettes et provoque le mécanisme d'excavation par les multiples poinçonnements des inserts dans la roche [17], [52] [16], Les outils à molettes travaillent par:

- ✓ Compression produisant la pénétration des dents ou des picots dans la formation et l'éclatement de la roche. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour produire le meilleur avancement; l'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille.
- ✓ Arrachage du copeau de terrain par ripage de la molette sur elle-même.

Ces deux effets sont complémentaires. Ils sont privilégiés l'un par rapport à l'autre suivant la dureté de la roche à broyer.

Cependant, les outils tricônes ont toujours un intérêt économique pour la réalisation de puits de faibles profondeurs mais aussi pour le forage de terrains durs (granite, pyrite, etc.) [17], [66].



Figure 8 : outil à molette [43]

2.2 Les outils PDC

Les outils PDC comportent des taillants formés d'un cylindre en carbure de tungstène-cobalt surmonté d'une partie en diamant polycrystallin. Les taillants PDC sont brasés, côté carbure cémenté, sur la tête de forage. Ils permettent d'obtenir des vitesses d'avance plus importantes, relativement aux inserts, en travaillant par cisaillement dans la roche avec des profondeurs de passe millimétriques [52], [43], [33].

La raison de cette évolution rapide de l'utilisation sur les chantiers des outils à taillants PDC s'explique par leur mode d'excavation beaucoup plus efficace que celui des tricônes et aux améliorations apportées aux taillants afin de supporter les conditions thermomécaniques rencontrées lors de forages profonds (figure 9) [16].



Figure 9 : outil PDC [43]

2.2.1 Évolution de fabrication des outils PDC :

Les outils à (Polycrystalline Diamond Compact) sont des outils à pastilles de diamant polycrystalline existent soit avec corps en acier, soit avec une matrice [3], [57]. Les corps en acier sont usinés puis recouverts de carbure de tungstène pour limiter l'érosion. Les corps en matrice sont fabriqués à partir du même matériau au carbure de tungstène que les outils aux diamants naturels. Le développement de ces produits élargi sans cesse les applications des outils PDC [33], la fourchette de dureté des formations adaptées se situe entre mi-dur à tendre. Les limitations qui peuvent apparaître sont la résistance au terrain abrasif et l'efficacité hydraulique pour le nettoyage des pastilles PDC [33], [57].

2.2.2. Mode de travail des outils PDC : Les taillants PDC maintiennent un bord tranchant pendant qu'ils s'usent parce que le carbure de tungstène qui est directement derrière la couche de diamant s'use plus rapidement que le diamant du polycristallin [73], dû à sa résistance à l'abrasion plus faible. Cela a pour résultat la formation d'une lèvre de diamant qui reste tranchant durant la vie du PDC, cet effet est appelé auto-affûtage des cutters PDC. Par conséquent les outils PDC maintiennent une vitesse d'avancement relativement élevée dans l'intervalle total foré[57], [52], [33].

2.3 Les outils à diamant : C'est la substance la plus résistante à l'usure (10 fois plus que le carbure de tungstène). Il a le plus faible coefficient de friction et c'est le meilleur conducteur de chaleur. Les outils à diamant sont utilisés pour forer les formations très dures et abrasives. On distingue 03 types principaux des outils à diamant [14],[57] :

2.3.1. Les outils à diamants naturels

La structure cristalline du diamant est sa caractéristique la plus importante, puisque c'est cette propriété qui est responsable de sa dureté, de sa forme, de son clivage et autres propriétés [57].

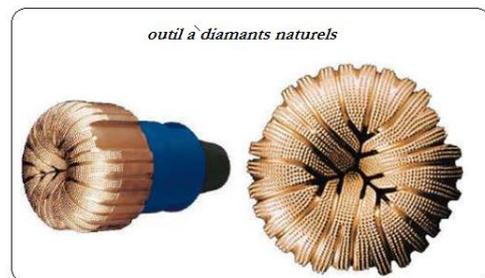


Figure 10 : outil à diamants naturels [16]

2.3.2 Les TSP (Thermally Stable polycristallin)

Les TSP n'atteignent pas la résistance aux chocs ni la résistance à l'abrasion car ils sont beaucoup plus poreux et contiennent toujours des traces de liants et catalyseurs qui induisent des graphitisations à températures élevées (roches dures et applications turbine) [66],[57].

conurrencées par l'apparition de PDC à table diamantées très épaisses.

Finalement, le TSP permet de combler le vide qui existe entre les applications type PDC et diamant naturel [16].

Les TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïque de la dimension des PDC. Cette structure a permis d'augmenter la vitesse d'avancement et d'allonger la durée de vie de l'outil dans des formations tendres, abrasives et dans les intercalations d'argiles et de roche plus dures, là où les PDC n'étaient pas rentables de telles structures sont actuellement [9] [16].

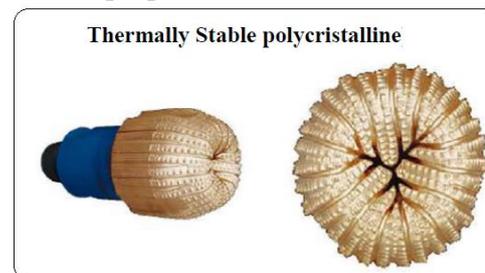


Figure 11 : outil TSP[16]

3. Caractéristique mécanique des roches :

Les caractéristiques mécaniques des roches interviennent différemment dans le contexte du forage, on peut définir deux classes de propriétés celle qui concerne la roche et celle qui explique l'effet des forces extérieures sur la roche [12] [72].

- 3.1** *Caractéristique mécanique des roches intactes* : Les propriétés mécaniques des roches, qui agissent d'une façon directe sur le forage, ce résume comme il est indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Effet des propriétés des roches sur l'opération de forage

Propriétés	Effet sur l'opération de forage
La dureté	<p>La dureté d'une roche, sur un chantier de forage, traduit en fait pour l'opérateur la résistance que celle-ci offre à l'avancement de l'outil et ceci de façon tout à fait empirique. Il existe cependant une définition de la dureté des roches : celle de l'échelle de MOHS [12], telle que chaque minéral de roche soit rayé par le minéral de roche de degré supérieur. Dans cette échelle, le quartz qui est l'une des roches les plus dures que l'on rencontre effectivement dans les forages sa présence indique l'abrasivité de la roche, a le degré de dureté 7 alors que le diamant a le degré le plus élevé égal à 10 [31],[12].</p> <p>La dureté suivant Mohs traduit une résistance de la roche à la pénétration, par rayage. Il est rare qu'un outil réel détruise la roche uniquement par rayage (sauf parfois avec l'emploi d'outils diamant). Il est rare également qu'une roche soit pratiquement composée d'un seul minéral, la notion de rayage devient beaucoup plus compliquée dans le cas de roches constituées des plusieurs minéraux de dureté différentes [72].</p>
Résistance à la compression	<p>C'est la résistance de la roche à un effort de compression uni axial, qui reste libre d'effort dans le plan perpendiculaire, peut être déterminé au niveau de laboratoire à partir d'un essai de compression simple [56], [40].</p>
Abrasivité	<p>L'abrasivité est le pourcentage de silice dans la roche. Le caractère abrasif d'une roche n'intervient pas dans le processus de pénétration d'un élément d'outil dans la roche, mais intervient par le fait des modifications par usure, dans le temps, des caractéristiques géométriques ou mécaniques de celui-ci [12], [32].</p> <p>Cette usure peut se produire de deux façons : si la dureté minéralogique des éléments constituant la roche est plus grande que la dureté des éléments de l'outil il y aura destruction volumétrique de ceux-ci ; si la dureté des éléments de roche est plus faible que celle des éléments de l'outil il y aura usure superficielle par frottement. L'usure par frottement dépend de la valeur du coefficient de frottement de la roche au contact de l'outil [49], [12], [40].</p>

Tableau 5 : Effet du forage sur la roche

Propriétés	Effet du forage sur la roche
Résistance à la pénétration statique	La dureté d'une roche, considérée comme résistance à la pénétration statique d'un poinçon, est donc très intéressante en tant que propriété liée aux conditions de destruction de ce matériau par forage [56].
Résistance à la pénétration dynamique	Comme l'outil, assimilé à un ensemble de poinçon, se déplace de façon contenue au fond du trou, de telle sorte qu'en chacune de ses positions son contact sous charge avec la roche ne se fait que pendant une durée finie, on peut penser à priori que la résistance à la pénétration de l'outil dans la roche est fonction de la vitesse de ses déplacements [72],[12].
Résistance à l'écrasement	<p>La pénétration statique d'un poinçon dans une roche s'accompagne d'un écrasement des éléments de roche situés sous le poinçon. On est ainsi amené à penser que la résistance critique de la roche à la pénétration statique est égale à la résistance d'écrasement, c'est-à-dire à la compression, et que l'on peut mesurer cette résistance par des essais mécaniques sur éprouvettes [12].</p> <p>Si l'on procède effectivement à des mesures de résistance à l'écrasement, par exemple sur éprouvettes cylindriques, au moyen d'une presse, et que l'on classe diverses roches par résistances à l'écrasement croissantes, on obtient une bonne corrélation avec le classement obtenu dans des essais de résistance à la pénétration statique d'un poinçon. Les roches qui possèdent des résistances critiques à l'écrasement sont également, celles qui présentent les plus grandes résistances critiques à la pénétration [72].</p> <p>Cependant il n'est pas possible de relier d'une façon formelle ces deux caractéristiques. La raison est essentiellement la suivante : le contact sous charge du poinçon avec la roche engendre au voisinage de la surface de contact de celle-ci un régime de contraintes tri-axiale, alors que l'essai d'écrasement d'éprouvettes cylindriques ne fait intervenir que les contraintes uni-axiales. Du fait des différences qui existent entre les paramètres élastique des différentes roches, il ne peut y avoir de relations formelles entre ces deux régimes de compression [7], [32].</p>

4. Mécanisme de rupture du rocher pendant le forage :

Les types généraux de rupture de la roche lors du forage par méthode mécanique, y compris le forage par percussion, le forage rotatif et le forage par percussion rotative, sont trois types de mécanismes de base: percussion-pénétration, rouleau sous pression et coupe (voir la figure 11) [11] [7].

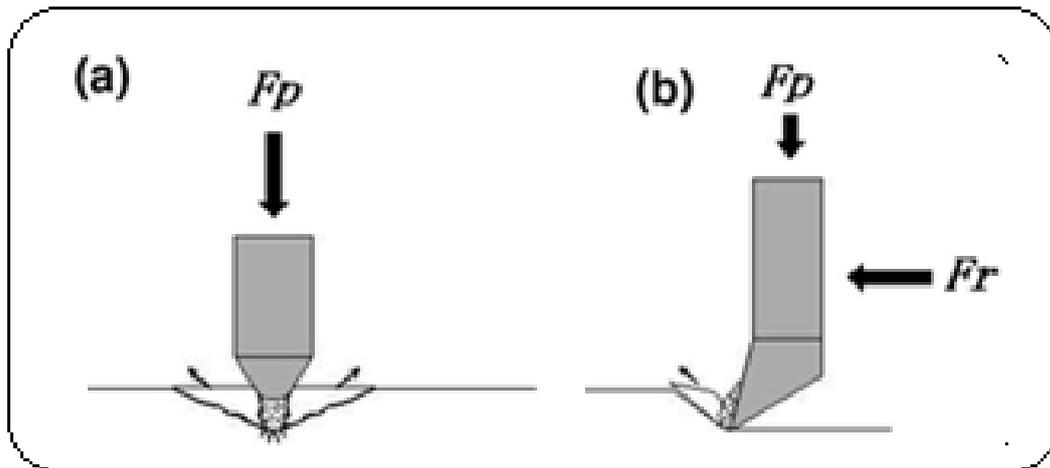


Figure 12 : Types généraux de destruction de la roche lors de la foration [11]

L'outil pénètre et brise la surface de la roche par une force statique (poussée) (F_p) ou une force d'impact (percussion), la figure (a) présente la destruction de la roche par une série de coups de chocs perpendiculaire à la surface contacte de la roche; tandis que la figure (b) présente un autre type de destruction par l'action du couple poussée et rotation engendrant un effort parallèle (tangential) a la surface de contacte de la roche. C'est le processus basique de la rupture de la roche par une méthode mécanique [8].

4.1 Les phases de pénétration de l'outil dans la roche :

Le processus de pénétration de l'outil dans la surface de la roche peut être divisé en quatre phases comme suit :

4.1.1 Zone écrasée (concasse) : Lorsque la pointe de l'outil commence à entailler la surface de la roche, la contrainte augmente avec l'augmentation de la pression de pénétration et le matériau entre en phase de déformé plastique la (figure 13). À la surface de contact, des irrégularités sont immédiatement formées et une zone de noyau en poudre de matériau concassée se développe sous l'insert de l'outil. Le noyau écrasé comprend de nombreuses microfissures qui pulvérisent la roche en poudre de particules extrêmement petites [11].

Le noyau écrasé transmet le composant de la force principale dans la roche [9].

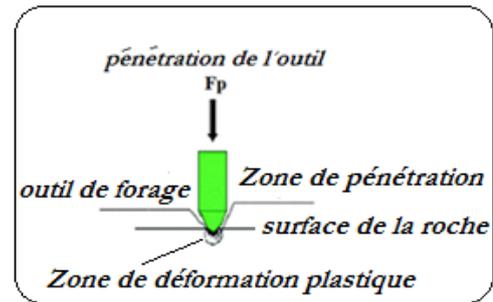


Figure13: phase de déformation plastique [11]

4.1.2 Formation des fissures : Les microfissures se développent progressivement à l'intérieur de la roche (Fig. 14). Le placement des fissures majeures dépend de la forme de l'insert. Généralement, la progression des fissures majeures se développent dans une zone sphérique située juste à l'extérieur de la zone de contact, pointant vers le bas et loin de la surface [11].

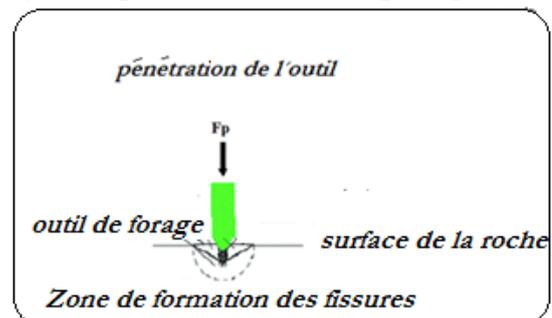


figure 14 : phase de formation des fissures [11]

4.1.3 Propagation des fissures : Une fois que la barrière d'énergie a été surmontée, la propagation spontanée et rapide suit. À une profondeur inférieure à la dimension de contact, la force de traction est inférieure à celle nécessaire pour maintenir la croissance, de sorte que la fissure devient encore stable. Les fissures sont alors «bien développée» (figure 15) [11].

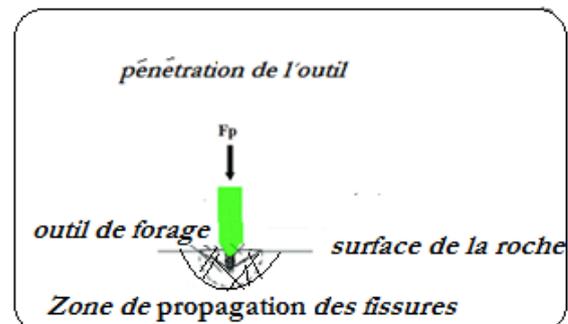


figure 15 : phase de propagation des fissures [11]

4.1.4 Écaillage : Lorsque la charge atteint un niveau suffisant, la roche se brise et une ou plusieurs grosses plaquettes sont formées par des fissures latérales se propageant sous le bout de l'insert vers la surface. Ce processus s'appelle écaillage de surface (figure 16) [11].

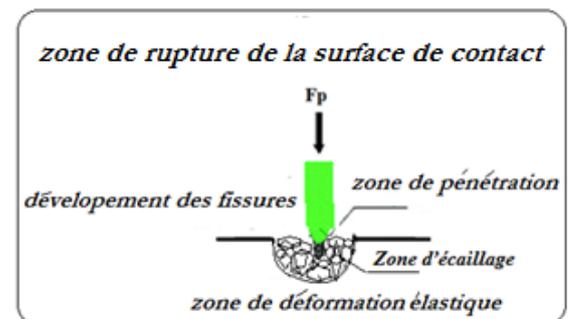


Figure 16 : phase d'écaillage [11]

Synthèses :

Les paramètres qui influent sur le processus de forage, sont définis par :

- ➔ Les propriétés physicomécaniques des roches a forés (dureté, résistance a la compression..etc).
- ➔ Les paramètres de la machine de forage (type d'outils, pression de poussée et pression de rotation).
- ➔ La logistique du processus opératoire (la qualification de l'opérateur, choix du mode de forage).

La propriété dominante des roches qui influe sur le processus de forage, prise par la majorité des chercheurs dans le domaine de forage minier est la résistance a la compression.

Le forage minier est généralement peu profond, l'application du mode de forage roto percutant est plus favorables aux conditions minières. Ce choix s'appuie sur l'utilisation des outils PDC qui ont montrés une efficacité incontestable de point de vue de sa longévité et leurs vitesses d'avancement très importante par rapport aux autres outils. Concrètement, un outil est qualifié de performant s'il permet d'obtenir des vitesses d'avance élevées ainsi que des coûts d'exploitation modérés.

La vitesse d'avancement est essentiellement liée à l'évolution de l'énergie mécanique nécessaire pour détruire un volume unitaire de roche.

L'organisation de tous ces paramètres afin d'obtenir un rendement efficace du processus de forage, méritent d'être optimisé. A cette fin le choix de la meilleure méthode d'optimisation des travaux de forage fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III : LES MÉTHODES D'OPTIMISATION ET MODELES DOPTIMISATION DU PROCESSUS DE FORAGE

1. Introduction :

Optimiser consiste à trouver les valeurs des réglages pour obtenir la meilleure qualité, tout en satisfaisant des contraintes telles que moindre coût de production, cadence suffisante, ...etc [10].

Dans la pratique, il faut trouver une qualité acceptable sachant que la limite qui sépare l'acceptable de l'inacceptable est la spécification.

Une démarche visant à comprendre et synthétiser un processus quelconque, inconnu a priori. La réalisation d'essais donne alors la possibilité d'initier un processus de traduction en termes logiques, voire mathématiques de ce phénomène [10].

Dans cette logique l'optimisation d'un tel phénomène nous mène à réaliser une modélisation qui cerne au mieux la compréhension de ce dernier, pour trouver la meilleure solution possible [78].

Dans ce chapitre nous allons exposer les différentes méthodes d'optimisation des phénomènes aléatoires et faire le choix de la meilleure méthode pour notre cas d'étude.

2. Les méthodes d'optimisations :

Le principe commun à toutes les méthodes d'optimisations est de faire varier simultanément tous les facteurs intervenant dans l'optimisation ; ces variations se font de façon raisonnée pour être efficaces dans la recherche et en tenant compte d'une éventuelle interaction entre les facteurs [65].

Nous n'évoquerons dans cette thèse que les méthodes les plus classiques ; elles appartiennent à deux catégories :

- ✓ Les méthodes directes de localisation d'un optimum
- ✓ Les méthodes indirectes par les plans d'expériences

Les deux stratégies (méthodes directes et indirectes) sont complètement différentes dans leurs principes et il est important de souligner qu'une méthode directe vise seulement à connaître les conditions optimales de fonctionnement. Alors que les méthodes indirectes apportent plus d'information dans la mesure où il est possible de déterminer les courbes d'iso réponses et donc de pouvoir prévoir la réponse pour des valeurs données des facteurs autour de l'extremum [27].

2.1 Les méthodes directes :

Les méthodes directes ne nécessitent pas une représentation mathématique du phénomène (donc pas de modèle à poser a priori) et permettent une progression rapide et efficace vers l'optimum au moyen d'un algorithme itératif. Nous allons citer dans ce qui suit quelques méthodes directes [27]

2.1.1 La méthode de Friedman et Savage :

Une des méthodes les plus anciennes est celle de **Friedman et Savage**. Elle consiste à faire varier un facteur à la fois, à le fixer à sa valeur optimale puis à faire progresser les autres. Le cheminement, pour 2 facteurs, est précisé sur la figure suivante [26].

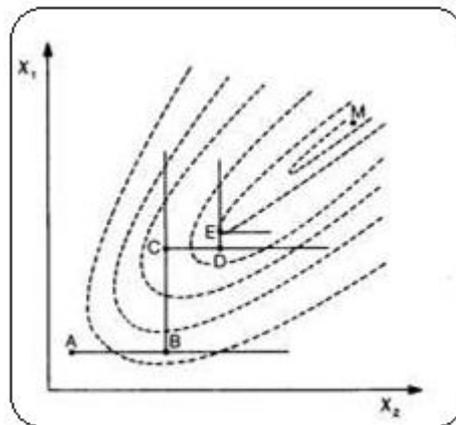


Figure 17 : méthode à une seule variable [26]

On part de l'essai A, en effectuant des expériences à x_1 constant et en faisant varier x_2 , jusqu'à l'obtention du maximum B sur la ligne AB. On fixe alors x_1 à sa valeur en B et on fait alors varier x_1 jusqu'à l'obtention du point C, maximum de la ligne BC. On continue ensuite l'évolution selon un processus en marches d'escalier (CD, DE) jusqu'à ce que la réponse mesurée y ne s'améliore plus [26].

Un inconvénient non négligeable de cette méthode est de réclamer un grand nombre d'essais car avant de déterminer B, par exemple, il faut exécuter un certain nombre d'essais entre A et B et au moins un au-delà de B pour s'assurer que la réponse y ne croît plus. Il en est de même pour déterminer C, D, E. Un autre inconvénient, plus grave, est que le procédé peut se bloquer sur une des arêtes de la fonction de réponse y comme c'est le cas sur la figure précédente (le maximum vrai est situé en M et la méthode ne permet d'aller que jusqu'à E : les 2 droites perpendiculaires en E sont telles que la plus grande réponse se situe en E!) ; cet inconvénient propre à la méthode de Friedman

n'existe pas dans les autres méthodes directes qui vont suivre. Cette technique n'est donc pas à conseiller.

Une version simplifiée de la méthode de Friedman, consistant à n'utiliser que 2 étapes (variation de x_2 à x_1 constant, puis variation de x_1 à x_2 constant) conduit au point C du schéma : on constatera que cette pratique ne permet pas de déterminer un optimum de réponse, mais seulement un point de la ligne de plus grande pente. On peut montrer que c'est seulement dans le cas particulier où il n'y a pas d'interaction entre les 2 facteurs qu'il est possible d'atteindre le maximum vrai avec cette technique [26].

2.1.2 La méthode du Simplex

La méthode du simplex a été inventée par **Spendley** en 1962.

Contrairement à la méthode de Friedman, elle nécessite de faire varier simultanément tous les facteurs agissant sur la réponse y .

Il s'agit d'une méthode itérative : les résultats sont exploités au fur et à mesure de leur obtention ; ils servent à déterminer de nouvelles conditions expérimentales qui permettent de progresser dans la recherche de l'optimum [27].

On effectue d'abord un petit nombre d'essais, correspondant à des niveaux différents des facteurs étudiés. Pour k facteurs, on réalise $k + 1$ essais au départ.

On récolte donc $k + 1$ mesures de la réponse y à optimiser.

Pour faire progresser la recherche, on part du principe que l'optimum doit se trouver à l'opposé de l'essai ayant donné le plus mauvais résultat. On calcule alors cette direction, puis on effectue un essai complémentaire pour vérifier si l'hypothèse est exacte. On recommence l'opération précédente en éliminant la plus mauvaise des points restant et ainsi de suite jusqu'à ce que la réponse ne s'améliore plus [26].

2.1.2.1 Règle d'évolution du simplex

- Le point le plus mauvais est remplacé par son symétrique par rapport aux points restants.
- Lorsqu'un point apparaît dans $k + 1$ simplex successifs, il faut refaire la mesure de ce point pour s'assurer que ce fait ne résulte pas d'une erreur dans la détermination expérimentale de ce point qui aurait pour effet de surestimer ce point.
- Si ce point est confirmé par la nouvelle mesure, l'évolution normale de la procédure est poursuivie.

- Si au contraire, ce point correspond en réalité à une réponse plus basse, il est éliminé dans un des simplex et la procédure normale d'évolution est reprise.
- Lorsque le symétrique du plus mauvais point dans un simplex est à son tour le plus mauvais point dans le simplex suivant, On prend le symétrique du 2ème plus mauvais point [27]

Remarque : Cette règle est également appliquée quand il existe des contraintes expérimentales ; le calcul du point réfléchi peut en effet conduire à des conditions irréalisables en pratique : une concentration a une limite (solubilité), une température peut en avoir une (décomposition du produit), ...etc.

2.1.2.2 Arrêt de la procédure :

Il est évident que la précision avec laquelle on détermine les conditions optimales dépend de la taille du simplex initial (le pas).

Très souvent on ne cherche pas à préciser mieux la position de l'optimum, en particulier quand les différences entre les réponses des points est inférieure à une certaine valeur fixée par l'expérimentateur et liée à l'incertitude des mesures effectuées [61].

2.2 Les méthodes indirectes :

Elles ont des points communs avec celles déjà décrites à propos de la recherche des facteurs agissant sur une réponse - plans factoriels du 1er degré - mais elles en diffèrent dans la mesure où le modèle, posé à priori, est ici au minimum une fonction du 2^{ème} degré pour pouvoir restituer un maximum ou un minimum [18], [24].

Il s'agit de méthodes qualifiées d'indirectes dans la mesure où les résultats de l'expérimentation permettront de calculer l'estimation de l'équation du modèle et où l'optimum se déduira ensuite par dérivation de cette équation pour trouver les valeurs x des niveaux des facteurs conduisant à l'extremum.

Parmi les diverses méthodes nous allons présenter deux méthodes dont l'application est très répondue dans les différents domaines [18], [27], [23].

2.2.1 Les plans d'expériences (PE) :

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 [23], [22], [18].

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, 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.

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) [25].

2.2.2 Les plans factoriels fractionnés (matrice de Taguchi)

De même les plans factoriels fractionnés prennent une place plus importante. Les applications des plans **de Taguchi** deviennent de plus en plus nombreuses. Cette méthodologie permet une recherche expérimentale planifiée. Elle va aider l'expérimentateur à structurer sa démarche expérimentale de manière différente à confronter et à valider ses propres hypothèses, une meilleure compréhension des phénomènes étudiés et à résoudre les problèmes. Avec un minimum d'essais capable de fournir le maximum d'informations nécessaires [18], [23]. [27].

2.2.3 Simulations numériques

Lorsque les expérimentations sont coûteuses, il arrive de plus en plus fréquemment que l'on étudie d'abord les phénomènes à l'aide de simulations numériques. Les calculs sont souvent complexes et nécessitent des temps de calcul très longs. Il est alors avantageux d'organiser les simulations de la même manière que les essais des plans d'expériences. Mais deux particularités des calculs numériques doivent être prises en compte. La première est l'absence d'erreur expérimentale et le second est la complexité des modèles a priori permettant l'interprétation des résultats [27], [41].

Le modèle des simulations numériques comporte donc une première partie expliquant la forme générale et moyenne de la surface de réponse et une seconde partie expliquant les réponses aux points de simulation. La première partie est obtenue par les techniques classiques de la régression. La seconde partie est modélisée par différentes fonctions mathématiques dont les principales sont des fonctions gaussiennes ou des fonctions de corrélations. L'objectif de ces fonctions est de déformer la surface de réponse pour qu'elle passe par la valeur des réponses aux points de simulation [27], [36],[78].

En ce qui concerne la disposition des points de simulation dans l'espace expérimental, on ne cherche plus à minimiser l'erreur sur les coefficients du modèle mais à obtenir une allure générale de la surface de réponse. Les points de simulation sont répartis de façon régulière dans l'espace expérimental ce qui permet de faire des modélisations particulières et adaptées pour des zones différentes du domaine d'étude [23].

3. Introduction à l'application de la modalisation dans le domaine de forage :

L'augmentation de l'efficacité de forage permet d'augmenter le taux de forage en optimisant la combinaison du poids sur l'outil et la vitesse de rotation pour un outil donné dans une formation de roche donnée, Cela nécessite une bonne connaissance des paramètres contrôlant l'opération de forage et la durée de vie de l'outil [19], [14].

Une fin importante pour atteindre cet objectif est de déterminer un modèle mathématique susceptible de relier les différents paramètres influençant sur l'efficacité de forage. La prédiction du taux de forage passe par les étapes suivantes :

- ✓ La prédiction du temps nécessaire pour forer des trous avec une taille donnée et des spécifications dans un groupe connu de formations rocheuses [29], [36].
- ✓ La sélection du poids sur l'outil (WOB) optimal et vitesse de rotation (RPM) de l'outil pour augmenter le taux de forage. Au cours des 40 dernières années, les chercheurs ont introduit différents modèles pour prédire le taux de forage. Cela comprend le travail de Bourgoyne et Young (1974, 1999) Bourgoyne et al. 2003; Maurer (1962); Cunningham (1978); Walker et al. (1986); Warren (1987); et Kahraman (1999). Un certain nombre de modèles ont été développés en fonction des tests de laboratoire et d'autres par des observations sur le terrain. Étant donné que les différents paramètres affectent le taux de forage et que le rôle de chaque

paramètre n'est pas spécifiquement défini, la nécessité d'une méthode appropriée avec un bon niveau de précision est ressentie [15], [14], [29], [40].

4. Les étapes d'optimisation du taux d'avancement de forage :

4.1 Traitement de l'information

Les modèles de prédiction du taux **d'avancement** de forage sont développés à la fois par le laboratoire et le travail sur le terrain. Les modèles de laboratoire incarnent non seulement les propriétés physiques et mécaniques, mais aussi les mesures précises car ils ne peuvent pas simuler les conditions réelles. Par conséquent, ils sont inefficaces. Mais les modèles empiriques sont plus fiables et efficaces que les modèles de laboratoire car ils sont fabriqués dans des conditions réelles [29]. Généralement, les modèles sont fiables et utilisables pour une formation rocheuse spécifique. Grâce aux avantages de l'empirique sur les modèles de laboratoire [35], [15], [26].

4.2 Type de données :

Les données sont illustrées en termes de caractéristiques de la machine de forage tel que : la pression de poussée, la pression de rotation, le débit d'air comprimé, diamètre de l'outil de forage, et les caractéristiques physico-mécaniques des formations géologiques a forées [15] , [19], [20], [36].

4.3 La procédure de modélisation :

La modélisation est conçue en fonction des caractéristiques de la formation. Un certain nombre de paramètres effectifs sur le taux de forage sont les suivants: charge sur l'outil, rotation, profondeur, résistance de roche, condition de l'outil, pression de formation, poids de boue, type de boue, diamètre de l'outil et débit de boue (Bourgoyne and Young 1974). Un modèle souhaitable pour la prédiction de la vitesse de forage est celui qui peut être utilisé dans différentes zones [29], [19] [15].

5. Modèles mathématiques d'optimisation du processus de forage

Parmi plusieurs chercheurs qui ont travaillé dans le domaine d'optimisation du processus de forage et a titre de citation on expose les modèles mathématiques suivants :

Cunningham (1960)

A montré que le taux de forage d'un outil à rouleau-cône est proportionnel à la vitesse de rotation de l'outil à la pression de poussée pour une large gamme de RPM et WOB

Premier modèle

$$R = K * W_a * N \quad (\text{ft / h})$$

R = taux de forage, (ft / h).

W = poids sur outil, (klbf).

N = vitesse de rotation (tour/min)

K, a constantes de proportionnalité

Le modèle de Cunningham n'a pas intégré l'effet d'autres paramètres de forage: diamètre de l'outil, résistance de roche,...etc.

Cunningham (1962)

A proposé son modèle pour la condition de nettoyage parfaite des trous

Deuxième modèle

$$DR = K * \frac{N * (W - W_0)^2}{D^2 * S^2} \quad (\text{ft / h})$$

W_0 : Seuil de poids sur l'outil.

D: Diamètre de l'outil.

S: Résistance de la roche.

Bingham (1965)

A suggéré la corrélation basée sur des données de laboratoire limitées

Troisième modèle

$$DR = K * \left(\frac{W}{D}\right)^{a_5} * N \quad (\text{ft / h})$$

K : est la comptabilité constante de la force de la roche.

a_5 : est l'exposant WOB.

HARELAND (1994)

Quatrième modèle

Pour tenir compte de l'usure des morceaux et des effets de blocage des puces comme présenté ci-dessous

$$R = w_f \left[f_c(P_c) \left(\frac{a.S^2.D_{bit}^3}{RPM.WOB} + \frac{b}{RPM.D_{bit}} \right) + \frac{c.\rho.\mu.D_{bit}}{I_m} \right]^{-1} \text{ (ft / h)}$$

$f_c(P_c)$: Fonction de déblais au fond de trou.

w_f : Fonction d'usure de l'outil.

S : La résistance de la compression de la roche par confinement (Psi).

I_m : Effort de choc (IPs).

ρ : poids spécifique de la boue de forage (ppg)

μ : viscosité de la boue de forage (cp)

D_{bit} : Diamètre de l'outil de forage.

a, b, c : Constants de la géométrie de l'outil.

Hareland et Rampersad (1994):

Ont développé un modèle pour prédire taux de pénétration des outils de traînée. Il a été dérivé en fonction de la conservation de la masse où le taux d'élimination de la coupe devant les fraises est équivalent au taux de pénétration. L'effet des paramètres opérationnels a été intégré au taux de pénétration en tenant dûment compte des critères de relation géométrique et de rupture de roche comme indiqué ci-dessous

cinquième modèle
$$DR = \frac{14.4 * W * N * \cos \alpha}{\sigma * D * \tan \theta} * \frac{a}{N^b * W^c} \text{ (ft / h)}$$

Motahari et al. (2008) :

Qui prétendait travailler avec précision dans les performances de forage

sixième modèle
$$DR = W_f \frac{14.4 * W * N * N^b * \cos \alpha}{\sigma * D * (\tan \theta + \mu)} \text{ (ft / h)}$$

$$W_f = a * \frac{W^c}{N_c^d * \sigma^c * A_w^f} \left(1 + \frac{\mu}{\tan \theta} \right)$$

$$A_w = \frac{D_c^2}{4 \sin \theta} * \arccos \left(1 - \frac{\Delta BG}{4} \right) - \frac{D_c^2 (4 - \Delta BG)}{64 * \sin \theta} \sqrt{8 * \Delta BG - \Delta BG^2}$$

A_w : la surface de l'usure du coupon de l'outil (in^2)	D : Diamètre de l'outil
W : Poids sur l'outil.	D_c : .diamètre du coupon de l'outil (in).
N : Vitesse de rotation (tous/min).	b : constant.
σ : La résistance de la compression de la roche.	W_f : Fonction d'usure.
μ : Coefficient de frottement outil –roche.	N_c : Nombre de coupons sur la face de l'outil PDC.

Hegde, Wallace Et Gray (2015) septième modèle :

L'utilisation de l'apprentissage par machine pour prédire et augmenter efficacement le ROP. Le modèle d'apprentissage par machine est d'abord utilisé pour prédire le ROP - avec des paramètres d'entrée tels que le poids sur le bit (WOB), les rotations par minute de l'outil (RPM) et le débit de la boue de forage. Les paramètres d'entrée sont ensuite modifiés pour augmenter le ROP. Ce processus a été appliqué aux données de forage sur le terrain à partir d'un puits vertical constitué de différentes roches et formations. La procédure peut être utilisée pour déterminer le ROP maximal réalisable dans chaque formation et définir les lignes directrices opérationnelles pour le forage des puits. Une analyse de perçage peut être effectuée afin de réduire les coûts et de gagner du temps pendant le forage. Ce modèle est très innovant car seuls les paramètres mesurés en surface sont utilisés, sans exigences a priori pour les données géologiques, de laboratoire ou de forage.

Khochman et al (2016) huitième modèle :

Ils ont utilisés la méthode de Taguchi pour étudier les effets des paramètres de réglage de forage roto-percutant tels que la poussée, la pression d'alimentation du marteau, la vitesse de rotation du train de tige sur l'avancement de l'outil (V_f) dans le forage roto-percutant, en utilisant la sondeuse INGERSOLL RAND CM-780D [39].

Une analyse de régression a été utilisée pour développer le modèle du deuxième ordre de régression pour la réponse V_f . Afin de comprendre les effets des facteurs de contrôle sur la réponse, du premier ordre, du second ordre et les interactions entre les différents facteurs de contrôle ont été considérés.

Le modèle final pour la V_f obtenue est le suivant:

$$V_f = -13,19 + 0,991 Pa + 0,0191 nr + 0,01319 Fax - 0,03193 Pa^2 - 0,000150 nr^2 - 0,000006 Fax^2 + 0,001732 Pa * nr - 0,000057 Pa * Fax - 0,000024 nr * Fax$$

Un modèle mathématique est développé pour la vitesse de forage .Afin de comprendre l'effet des facteurs de contrôle sur la réponse.

L'analyse de variance montre clairement que la force axiale (Fax), l'interaction (Pa.Pa), la pression d'alimentation d'air (Pa) et l'interaction (Fax. Fax) sont statistiquement les facteurs qui ont la plus grande influence sur l'évolution de la vitesse de forage. Leurs contributions sur la variation totale de la vitesse de forage sont 24,15%; 23,39%; 23,05%; 18,67% respectivement [39].

Synthèses :

- Les méthodes d'optimisations directes et indirectes sont complètement différentes dans leurs principes et il est important de souligner qu'une méthode directe vise seulement à connaître les conditions optimales de fonctionnement. Alors que les méthodes indirectes apportent plus d'information dans la mesure où il est possible de déterminer la réponse pour des valeurs données des facteurs autour de l'extremum.
- Les méthodes directes ne nécessitent pas une représentation mathématique du phénomène et permettent une progression rapide et efficace vers l'optimum au moyen d'un algorithme itératif.
- Tandis que les méthodes qualifiées d'indirectes dans la mesure où les résultats de l'expérimentation permettront de calculer l'estimation de l'équation du modèle et où l'optimum se déduira ensuite par dérivation de cette équation pour trouver les valeurs x des niveaux des facteurs conduisant à l'extremum.
- Il n'existe pas de modèle mathématique universel acceptable qui décrit la variation du taux de pénétration en fonction des paramètres de forage avec précision en raison de la nature complexe des conditions de fond.
- Habituellement, les modèles analytiques ou les analyses de données de forage sont utilisés pour estimer et prévoir une optimisation des régimes de fonctionnement des machines de forage traduite par une amélioration en taux de pénétration.
- Les modèles basés sur les données peuvent être utilisés comme un proxy efficace pour modéliser des concepts complexes en ingénierie. C'est une pratique d'ingénierie commune pour optimiser certains paramètres d'entrée contrôlables dans un modèle pour augmenter l'efficacité des opérations.
- Le gain de temps, de cout et de main d'œuvre, fait de la méthodologie des plans d'expérience un outil incontestablement efficace pour mettre en œuvre des expériences. A cette fin nous allons présenter dans le chapitre suivant en détaille la méthode des plans d'expériences qui sera appliquée pour notre cas d'étude.

CHAPITRE IV : METHODOLOGIE D'APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES

1. Introduction :

Le choix du nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à réaliser le minimum d'expériences tout en réduisant l'influence de l'erreur expérimentale sur les modélisations mathématiques qui serviront à prendre des décisions. On atteint ce but en considérant les propriétés mathématiques et statistiques qui relient la réponse aux facteurs [22].

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

La réponse : grandeur physique étudiée ;

Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer 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 **plan d'expériences (PE)**, correspondant à la réalisation d'une série de N - expériences, qui sont toutes déterminées a priori ; obligatoirement réalisables ; indépendantes entre elles [22].

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.

Dans la théorie de l'optimisation, une expérience est une série de tests dans lesquels les variables d'entrée (grandeurs physiques modifiables) sont modifiées selon une règle donnée afin d'identifier les raisons pour les changements dans la réponse de sortie (grandeur physique étudiée) [22].

Les expériences sont effectuées dans presque tous les champs d'enquête et sont utilisées pour étudier la performance des processus et des systèmes. Le processus est une

combinaison de machines, de méthodes, de personnes et d'autres ressources qui transforment certaines entrées en une sortie ayant une ou plusieurs réponses

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'interprétation de résultats expérimentaux avec un effort minimal sur le plan expérimental : la minimisation du nombre nécessaire d'expériences permet un gain en temps et en coût financier.

Il faut néanmoins comprendre que les plans d'expériences ne sont pas un outil destiné a priori à la recherche fondamentale car ils ne permettront jamais une explication du phénomène étudié.

2. Vocabulaire des concepts généraux des MPE :

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de *réponse*. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées *facteurs*. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes *facteur* et *réponse* sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences. Pour la retranscription mathématique du problème physique initial, on fait correspondre des variables mathématiques à des grandeurs physiques (électriques, mécaniques, thermiques, ...) supposées intervenir dans le problème (transformation des variables physiques en variables mathématiques) [18]. Ainsi nous définissons les termes suivants:

2.1. La réponse (y): C'est la grandeur 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 (y)*. 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 [27].

2.2. Les facteurs (x): Les facteurs sont les grandeurs supposées influencer sur les variations des réponses. Parmi un ensemble de facteurs donné par l'expérimentateur, tous ne sont pas obligatoirement réellement « influents » sur les variations de la réponse. C'est la technique du criblage qui permettra de déterminer lesquels le sont véritablement. Les facteurs et les réponses sont les seules variables à intervenir dans l'écriture des plans d'expériences [27]. La MPE est en effet un outil permettant d'établir des relations mathématiques entre les réponses et les facteurs (uniquement)

Chaque facteur peut être :

2.2.1 facteur continue : il peut adopter toutes les valeurs numériques réelles dans l'intervalle $[b_{inf}, b_{sup}]$.

2.2.2 Facteur discret : l'ensemble des valeurs que le facteur peut prendre est fini ; ces valeurs sont comprises dans un intervalle déterminé.

2.2.3 Facteur qualitatif : l'ensemble des valeurs que le facteur peut prendre est fini : on parle ici de modalités .Les facteurs sont pleinement caractérisés par les valeurs suivantes (figure 18) :

2.3 Borne inférieure (b_{inf}) : limite basse (ou *niveau bas*) des valeurs que le facteur peut prendre .

2.4 Borne supérieure (b_{sup}) : limite haute (ou *niveau haut*) des valeurs que le facteur peut prendre .

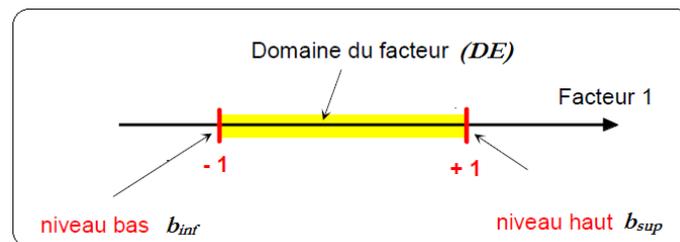


Figure 18 : domaine du facteur [26]

2.5. Paramètres : Les paramètres jouent le même rôle que les facteurs, mais ils ne sont pas pris en compte dans la définition des plans d'expériences, et ne figurent donc que dans les expressions mathématiques des modèles. Les paramètres sont des variables prenant un nombre fini de valeurs distinctes. De manière pratique, les paramètres permettent de faire intervenir les facteurs qualitatifs. Lorsque plusieurs paramètres sont définis dans la même étude, il y a alors définition des *combinaisons de paramètres*, c'est-à-dire de toutes les combinaisons possibles entre les valeurs de chaque paramètre. Leur nombre peut devenir rapidement important. L'usage des paramètres s'avère donc délicat car extrêmement coûteux. Lors de l'utilisation typique des paramètres, les calculs utilisant les plans d'expériences (simplement ou dans des algorithmes d'optimisation) sont réalisés pour chacune de ces combinaisons [18].

2.6. Constantes : Ce sont des paramètres essentiels unitaires.

Remarque : La définition des facteurs continus est par nature délicate. Elle implique principalement la spécification des dimensions du domaine d'étude (DE) par la

détermination des bornes inférieure *binf* et supérieure *bsup*. Elle a également une influence sur les résultats des algorithmes d'optimisation par la mention des précisions relatives de chaque facteur. La détermination et la définition des facteurs précédant l'analyse qualitative du système, les influences relatives et absolues des facteurs ne sont pas connues à ce stade. C'est ainsi que, suivant cette connaissance a priori du dispositif étudié, le domaine d'étude peut être défini, suivant les évolutions recherchées des réponses. On parle alors plus généralement de domaine d'intérêt.

3. L'optimisation par plan d'expériences.

Les progrès des sciences et de la technologie sont étroitement liés aux réponses que l'homme a pu apporter aux interrogations que lui pose régulièrement la nature. Ces réponses résultent le plus souvent d'une analyse des observations expérimentales obtenues par une approche méthodologique rigoureuse. Nous pouvons donc dire que, sans expérimentation physique ou numérique, il n'y a pas de solution. L'expérimentation est donc un moyen privilège pour acquérir ou améliorer les connaissances mais, elle doit être optimisée car l'objectif est d'obtenir les informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais [26].

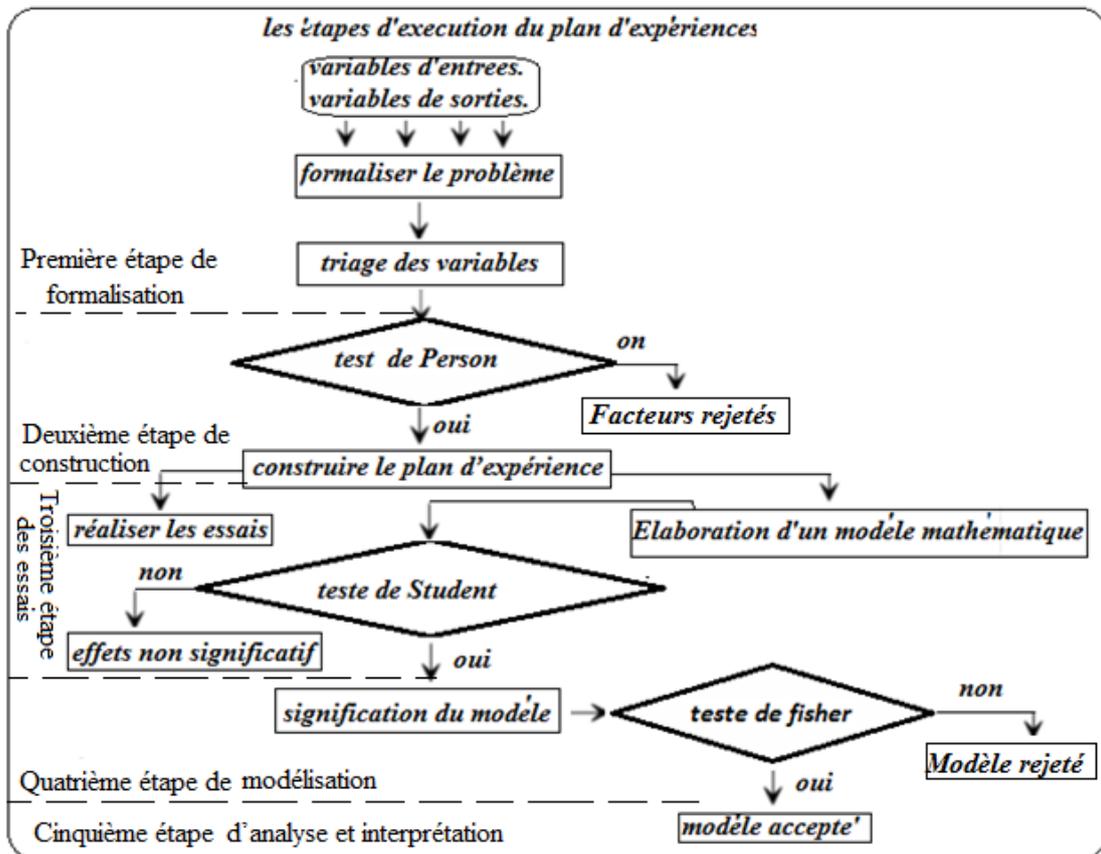


Figure 19 : Organigramme des étapes de réalisation du plan d'expériences

3.1 L'exécution de la méthode des plans d'expériences.

Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses [23]. Pour ce faire on doit suivre les étapes suivantes:

Une première étape : consiste à formaliser le problème suivant les critères qui suit :

- ✓ Identifier l'objectif de l'étude.
- ✓ Définir les facteurs (variables d'entrées, variables de sorties).
- ✓ Définir les domaines d'études pour chaque facteur.

Une deuxième étape : consiste à construire le plan d'expérience choisis.

- ✓ Etablir les expériences (expériences réelles, expériences virtuelles) selon les modalités d'études.
- ✓ Prouver l'efficacité du plan d'expérience suivant l'étude réalisée.

Une troisième étape : consiste à réaliser les essais selon :

- ✓ Matrice d'expérience.
- ✓ Réaliser un plan d'expériences fractionné orthogonale.

Une quatrième étape : consiste à la réalisation d'un modèle mathématique issu de la matrice des essais réalisés.

- ✓ Model de premier ordre sans interaction.
- ✓ Model de premier ordre avec interaction.
- ✓ Model de deuxième ordre avec interaction.

Une dernière étape : consiste à faire l'analyse et l'interprétation mathématique et graphique des résultats.

- ✓ Décision finale pour l'acceptabilité du modèle et sa représentativité du processus étudié.

3.2 Première étape de formalisation du problème

3.2.1 Objectif de formalisation : Pour formuler le plus clairement possible les objectifs visés, il est conseillé de bien choisir les variables susceptibles d'influencer sur le résultat d'étude et de prévoir les réponses définissant clairement le but visé [26], De manière générale, les deux objectifs principaux visés sont :

- **le triage des variables :** regrouper l'ensemble des variables d'entrées susceptibles d'influencer les variables de sortie et les hiérarchiser. Ce sera le cas s'il existe un grand nombre de variables d'entrées. Il peut s'agir d'une première étape pour une plus grande précision sur le règlement de ces variables influentes [22].
- **Prévoir :** c'est-à-dire estimer avec suffisamment de précision l'effet de l'ensemble des variables d'entrées influentes, de façon à pouvoir modéliser de manière assez fiable, la valeur de la variable de sortie que l'on obtiendrait pour l'ensemble des combinaisons des variables d'entrées, y compris celles non essayées. Ceci est notamment nécessaire si l'on souhaite optimiser le système étudié.

Remarque : Il est indispensable de recenser les contraintes de l'étude comme le nombre de tests maximum qu'il sera possible de réaliser et les ressources disponibles.

3.2.2 Les facteurs (définir les entrées) :

Le facteur : une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié. Le groupe de travail établit une liste de facteurs potentiels. Chaque facteur sera délimité par un domaine expérimental que nous formaliserons avec l'expérimentateur, cette phase est appelée phase de créativité. Une seconde phase de classement consiste à déterminer les quels sont les facteurs les plus influant [26],[78].

3.2.3 Réponses, (Définir les sorties) :

La réponse Y : variable de sortie correspond à un paramètre de sortie du système étudié. Une réponse doit être représentative, quantifiable et la moins dispersée possible pour les variables d'entrées maîtrisées et constantes. Pour appliquer la méthodologie des plans d'expériences, il est conseillé d'avoir une réponse exprimée sous forme quantitative. En effet, les méthodologies d'analyse des résultats d'essais tels que l'analyse de la variance ou l'analyse de la régression au sens des moindres carrés, s'appuient sur les données quantitatives d'exclusivité. Par ailleurs, les réponses qualitatives comme, par exemple, la morphologie d'un dépôt (lisse, poreux ... etc.) qui n'est pas un critère quantitatif,

s'inscrire à partir d'un codage spécifique des modesties des réponses.

3.2.4 *Domaine expérimental continu (DEC)*

Un domaine expérimental continu est délimité par des facteurs quantitatifs. La **(Figure : 20)** illustre le domaine expérimental de deux facteurs quantitatifs 1 et 2. Le facteur 1 varie de 15 à 50 et le facteur 2 varie de 10 à 40. Le nombre total de combinaisons que l'on peut réaliser est presque infini dans ce domaine.

Il est également possible, comme le montre également la figure, de restreindre le domaine expérimental en appliquant des contraintes. Ces contraintes peuvent être dues à des expériences impossibles à mettre en œuvre ou encore à des combinaisons de facteurs improbables [18].

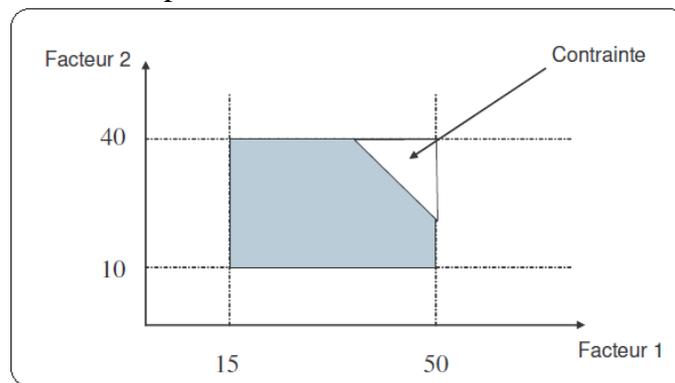


Figure 20: Domain expérimental continue [26]

3.2.5 *Domaine expérimental discret (DED)*

Un domaine expérimental discret est délimité par des facteurs discrets ou qualitatifs. La **(Figure : 21)** illustre le domaine expérimental de deux facteurs qualitatifs A et B. Les facteurs A et B prennent chacun trois modalités A1, A2, A3 pour A et B1, B2, B3 pour B.

Dans ce cas, nous sommes donnés en présence d'un nombre d'expériences réalisables limitées. Dans notre exemple, nous pouvons dire qu'il existe 9 expériences réalisables.

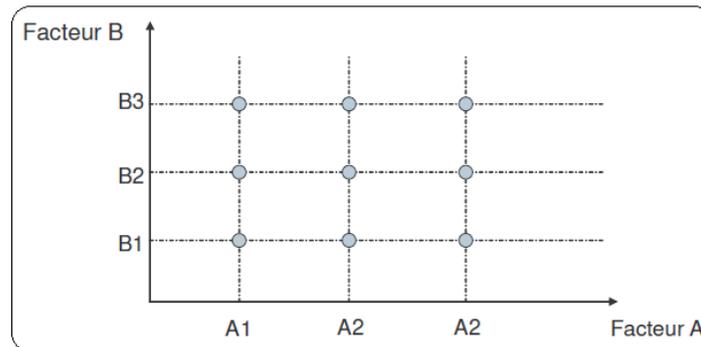


Figure 21: domaine expérimental discret [26]

3.2.6. Principe et loi de corrélation (test de Person) :

Il est indispensable dans cette étape décisive dans le processus d'exécution de la méthode des plans d'expériences d'éprouver la corrélation entre la fonction objective (variable de sortie) et les facteurs (variables d'entrées) , Pour trouver une corrélation entre ces variables, la loi de PEARSON est un outil efficace pour confirmer cette corrélation, la formule suivante nous donne le coefficient de corrélation (r) :

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

La condition de corrélation de PERSON : il faut que : $(r) > (r')$
 (r') : C'est la valeur de référence prise du tableau de PEARSON.

3.3 Deuxième étape construction du plan d'expérience :

Exécution du plan d'expérience par système d'équation :

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un *polynôme* dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori) [26], Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$y = a x + e$$

y : est le vecteur des réponses.

x : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

a : est le vecteur des coefficients.

e : est le vecteur des écarts.

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

Le résultat de ce calcul est : $\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$

Formule dans laquelle la matrice \mathbf{X}^T est la matrice transposée de \mathbf{X} . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients.

Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information. $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$
- La matrice de dispersion. $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$

Plusieurs plans d'expériences sont utilisés dans différents cas d'études pour l'optimisation des processus [24], nous citons quelques plans qui seront pris en détail à la fin de ce chapitre :

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

3.4 Troisième étape de réalisation des essais:

Classiquement, les ***expériences considérées*** par la MPE sont des processus réels pour lesquels il y a modification effective des conditions expérimentales (***Expériences réelles***). 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.) [27], [67]. Dans tous les cas, l'objet étudié doit être renseigné informatiquement, c'est-à-dire ***modélisé***. Ces simulations sont considérées comme des expériences relevant d'un caractère ***virtuel*** (ou ***expériences virtuelles***).

3.4.1. Expériences réelles

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

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 [61] [67].

3.4.2. 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.

La réalisation des essais doit suivre une stratégie bien déterminée et selon une matrice construite au préalable [45].

3.4.3 Matrice d'expériences :

La notion de matrice d'expérience traduit l'application de l'équation du modèle mathématique (la fonction objective), pour chacune des combinaisons définies à partir de la matrice d'expériences. De manière générale, la matrice du modèle est définie à partir de (**N**) lignes et de (**P**) colonnes. Le nombre de colonnes correspond au nombre de coefficients à estimer dans le modèle. La matrice d'information est obtenue à partir du produit matriciel entre la transposée de la matrice du modèle (\mathbf{X}^T) et la matrice du modèle (**X**) elle-même. Il s'agit d'une matrice carrée de rang (**P**) qui joue un rôle essentiel dans la construction des plans optimaux. Parmi les critères d'optimalité les plus répandus, celui qui consiste à définir des combinaisons des niveaux des facteurs de manière à maximiser le déterminant de la matrice d'information qui s'appelle critère d'optimalité. En présence d'un arrangement orthogonal, la matrice d'information est diagonale. La

méthode des moindres carrés conduit ensuite à inverser la matrice d'information pour définir la matrice de dispersion, les termes diagonaux de cette matrice étant proportionnels à l'incertitude associée à l'estimation des coefficients du modèle. La qualité de la matrice d'expériences dépend directement de la qualité des coefficients. La qualité des estimateurs des coefficients (**bi**) est directement donnée par les termes diagonaux de la matrice de dispersion [27].

La matrice des essais à réaliser pour obtenir le plan d'expériences optimal se déduit en fait des critères permettant d'obtenir les coefficients avec le maximum de précision. Le système d'équations à résoudre doit présenter des coefficients devant les inconnues (qui sont les coefficients du modèle à déterminer) [42] pouvant se mettre sous la forme d'une matrice nommée **matrice des effets**. Par exemple pour le plan 2 la matrice des effets s'écrira sous la forme :

$$\begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

Ce type de matrice est dit matrice de Hadamard.

La matrice de Hadamard: pour cette matrice les vecteurs colonnes sont orthogonales deux à deux. Cette propriété n'est pas suffisante pour obtenir la variance minimale pour l'estimation des coefficients. Hadamard a montré que la matrice X devait aussi vérifier la condition:

$${}^t X \cdot X = N \cdot I$$

Où ${}^t X$ est la matrice transposée de X, I la matrice identité et N le nombre d'expériences réalisées. N doit être un multiple de 4. [26]

Par exemple on verra que pour un plan complet à n facteurs, le nombre d'expériences N sera égal à : $N = 2^n$

Soit 8 expériences avec 3 facteurs permettant la détermination des 8 coefficients du modèle, 16 expériences avec 4 facteurs [26], [23].

Pour un plan à 8 expériences la matrice des effets devra s'écrire comme ci-dessous :

X

X (matrice des variations indépendantes)

Y

Reponses

2^3

N°	X (matrice des variations indépendantes)								y
	x_0	Matrice du design (expériences)			Interactions 2 ^e et 3 ^e ordre				
	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8
Effets	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	B
-	x_1^{min}	x_2^{min}	x_3^{min}						
+	x_1^{max}	x_2^{max}	x_3^{max}						

Y = BX

Avec :

Y: La matrice vecteur des réponses enregistrée par l'expérimentateur.

B: La matrice vecteur des coefficients qu'on cherche à connaître .

X: La matrice des variations indépendantes (qui contient des éléments sur lesquels l'expérimentateur a une action).

Remarque : Seule la matrice de design des facteurs quantifiables et mesurables intervient dans la réalisation des essais et puis on observe les réponses issues. Qui seront enregistrées par l'expérimentateur.

Matrice du design (expériences)

N°	x_1	x_2	x_3	y
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	y_4
5	-1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	y_8

3.5 Quatrième étape modélisation par la méthode des plans d'expériences.

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 [27], [67].

3.5.1 Équation du modèle :

Le but est la recherche de l'expression (1) 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 . La relation mathématique reliant ces variables sera de la forme :

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_k \cdot x_k + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + \dots + b_{kk} \cdot x_k^2 \dots \\ b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + b_{1k} \cdot x_1 \cdot x_k + \dots + b_{2k} \cdot x_2 \cdot x_k + \dots + b_{111} \cdot x_1^3 + b_{222} \cdot x_2^3 + \dots + \\ b_{kkk} \cdot x_k^3 \dots b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + \dots + b_{12k} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_k + \dots$$

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).

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

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

L'équation sans interaction peut s'écrire:

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 = b_0 + [x_1 x_2 x_3] \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

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,) [26].

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):

L'équation avec interaction peut s'écrire :

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = f(x) \cdot \beta$$

3.5.2. Signification des coefficients de dispersion et (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 [67].

$$t_{bl} = \frac{|b_l|}{s_{bl}} > t_{t(q,f)}$$

t_{bl} : Rapport entre les coefficients du modèle 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

3.6 Cinquième étape (Analyse des résultats d'essais) :

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* [36].

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 :

$$ddl_i = Nn_i - 1$$

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

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

Avec:

$\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses;

$\gamma_f = \frac{N}{Nn_f}$ 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);

- \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:

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

Avec:

- $\delta_{fg} = \frac{N}{Nn_f \cdot Nn_g}$ 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;
- \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 [36],[78].

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:

$$S_{er}^2 = \frac{SCE_x}{ddl_x}$$

Pour 2 facteurs, on peut écrire la décomposition suivante :

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

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) :

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

Avec:

- SCE_t la somme des carrés des écarts totale ;
- 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 :

$$ddl_t = \sum_{facteurs} ddl_i + \sum_{interactions} ddl_i$$

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 **variance résiduelle** (SCE_r) :

$$SCE_t = \sum SCE_x + SCE_r$$

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 [67]. 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. 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) [67].

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 [26]. Il s'agit donc de :

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

x^i est le vecteur des coordonnées du $i^{\text{ème}}$ 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 [67].

On calcule donc un carré moyen résiduel tel que :

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

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

$$S_{res}^2 = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{\sum_i SCE}{\sum_i ddl}$$

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 :

$$SCE_r = \sum SCE_{x_i} + \underbrace{\sum SCE_{x_{ij}}}_{SCE_r}$$

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 Teste de Fisher-Snedecor :

Le teste 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

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

La variance associée au facteur ou à l'interaction étudiée S_{res}^2 peut être considérée comme égale à la variance résiduelle S_{er}^2 si le rapport F_{obs} est faible, i.e. inférieur à une

valeur seuil statistique. On définit ainsi l'hypothèse statistique H_0 , selon laquelle l'affirmation précédente est vraie. Si c'est le cas, 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 :

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

Ou, de manière équivalente, quand :

$$F_{obs} < F_{ficher,\alpha}$$

Dans ce cas le modèle mathématique est acceptable et peut décrire le phénomène en étude.

3.6.4 Définition des concepts utiles à l'élaboration des tests d'hypothèse

Hypothèse statistique Une hypothèse statistique est un énoncé (une affirmation) concernant les caractéristiques (valeurs des paramètres, forme de la distribution des observations) d'une population. **Test d'hypothèse** Un test d'hypothèse (ou test statistique) est une démarche qui a pour but de fournir une règle de décision permettant, sur la base de résultats d'échantillon, de faire un choix entre deux hypothèses statistiques. **Hypothèse nulle (H_0) et hypothèse alternative (H_1)** L'hypothèse selon laquelle on fixe à priori un paramètre de la population à une valeur particulière s'appelle l'hypothèse nulle et est notée H_0 . N'importe quelle autre hypothèse qui diffère de l'hypothèse H_0 s'appelle l'hypothèse alternative (ou contre-hypothèse) et est notée H_1 . C'est l'hypothèse nulle qui est soumise au test et toute la démarche du test s'effectue en considérant cette hypothèse comme vraie [45]. Dans notre démarche, nous allons établir des règles de décision qui vont nous conduire à l'acceptation ou au rejet de l'hypothèse nulle H_0 . Toutefois cette décision est fondée sur une information partielle, les résultats d'un échantillon. Il est donc statistiquement impossible de prendre la bonne décision à coup sûr. En pratique, on met en œuvre une démarche qui nous permettrait, à long terme de rejeter à tort une hypothèse nulle vraie dans une faible proportion de cas [78]. La conclusion qui sera déduite des résultats de l'échantillon aura un caractère probabiliste : on ne pourra prendre une décision qu'en ayant conscience qu'il y a un certain risque qu'elle soit erronée. Ce risque nous est donné par le seuil de signification du test. **Seuil de signification du test** Le risque, consenti à l'avance et que nous notons α de rejeter à tort l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie, s'appelle le seuil de signification du test et s'énonce en probabilité ainsi : $\alpha = P(\text{rejeter } H_0) \text{ vraie}$ [42]. A ce seuil de signification, on fait correspondre sur la distribution d'échantillonnage de la statistique

une région de rejet de l'hypothèse nulle (appelée également région critique). L'aire de cette région correspond à la probabilité α . Si par exemple, on choisit $\alpha = 0.05$, cela signifie que l'on admet d'avance que la variable d'échantillonnage peut prendre, dans 5% des cas, une valeur se situant dans la zone de non significatif [45].

4 Les différents types de plans d'expériences :

4.1 Plans factoriels complets à deux niveaux :

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes comme le montre la (figure22) suivante :

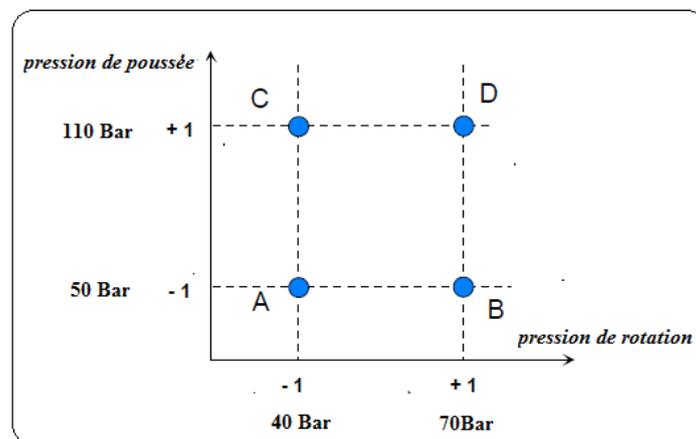


Figure 22 : plan factoriel pour un système de forage [26].

On démontre que les meilleurs emplacements des points d'expériences sont situés aux sommets du domaine d'étude [24].

La représentation qui utilise les unités codées est plus générale que celle qui emploie les unités physiques habituelles. C'est celle qui est le plus souvent adoptée et c'est celle que nous utiliserons par la suite.

Tableau 6 : Plan d'expériences (unités codées)

N°	essai	Facteur 1	Facteur 2
1	(A)	-1	-1
2	(B)	+1	-1
3	(C)	-1	+1
4	(D)	+1	+1
Niveau -1		50 Bar	40 Bar
Niveau +1		110 Bar	70 Bar

4.2 Présentation des résultats d'essais

A chaque essai, l'expérimentateur mesure la réponse qu'il a choisie. Par exemple, la réponse de l'essai n° 1 est y_1 . Celle de l'essai n° 2 est y_2 , et ainsi de suite. Ces réponses sont indiquées en face de chaque essai et sont rassemblées dans la colonne «Réponse» (Tableau 7).

Tableau 7 : Plan d'expériences et résultats expérimentaux.

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Réponse
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4
Niveau - 1	50 Bar	40 Bar	
Niveau +1	110 Bar	70 Bar	

4.3 Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs. Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est

noté 2^k .

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

On remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser. Ce nombre devient rapidement très important. Pour seulement 7 facteurs, il faudrait

exécuter 128 essais. Pour diminuer le nombre des essais en conservant la possibilité d'étudier tous les facteurs, les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux ont été introduits.

4.4 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux 2^{k-q}

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou $2q$ fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant.

A la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p coefficients inconnus avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les coefficients de telle manière qu'il y ait n inconnues. On résout donc un système de n équations à n groupes de coefficients. On appelle ces groupes de coefficients, des *contrastes* ou des *aliases* et on dit que les coefficients sont aliasées dans les contrastes [26].

→ quelques notations des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté 2^k .

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet possède $1/2 \cdot 2^k$ ou 2^{k-1} essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

Le k signifie qu'il y a k facteurs étudiés.

Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 2^1 .

Un plan 2^{5-2} permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par $2^2 = 4$.

Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par 2^q .

→ Objectifs des autres plans à deux niveaux

Les plans factoriels complets et fractionnaires sont basés sur des modèles mathématiques du premier degré. Ils couvrent la plupart des besoins des expérimentateurs lors d'une étude de dégrossissage. Ce sont eux qui sont employés dans

la majorité des cas. D'autres plans à deux niveaux, et basés également sur un modèle mathématique du premier degré, ont été mis au point pour répondre à des situations particulières. Nous examinerons les plans de Koshal, les plans de Rechtschaffner, les plans de Plackett et Burman, les Tables de Taguchi et les plans sursaturés [25].

4.5 Les plans de Koshal :

Les plans de Koshal sont des plans qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs. On ne peut pas évaluer les interactions.

Ces plans, peu connus, sont très pratiques pour dégrossir un problème. Ils offrent l'avantage de donner directement l'effet des facteurs. Ils forment le début d'un plan factoriel qu'il est toujours loisible de compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire. La (Figure 23) illustre un plan de Koshal pour 3 facteurs [25].

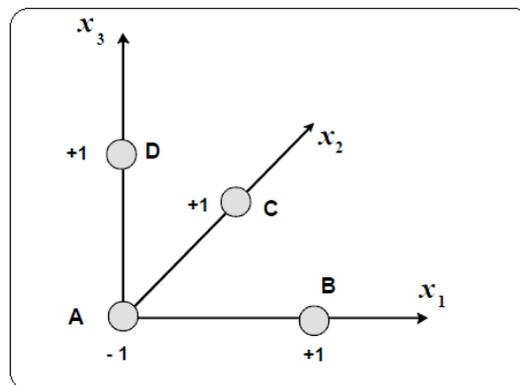


Figure 23 : plan de Koshal [26]

4.6 Les plans de Rechtschaffner :

Les plans de Rechtschaffner sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent de déterminer les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux. Toutes les autres interactions sont supposées nulles avant même l'expérimentation. Mais l'idée de ne déterminer que les effets principaux et les interactions d'ordre deux a été étendue par Rechtschaffner aux plans du second degré et aux facteurs prenant trois niveaux [25].

4.7 Les plans de Plackett et Burmann :

Les matrices de calcul des plans de Plackett et Burman sont des matrices d'Hadamard. C'est-à-dire des matrices ayant 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 lignes etc. Elles permettent donc des expérimentations ayant un nombre d'essais intermédiaire de celui des plans factoriels qui, eux, ont seulement $2k$ lignes (4, 8, 16, 32, etc.).

Les plans de Plackett et Burman sont le plus souvent saturés. Le modèle mathématique est alors un modèle sans interaction analogue à celui des plans de Koshal [25], [27].

4.8 Les plans sursaturés :

Un plan saturé est un plan qui comporte autant d'essais que de coefficients à déterminer dans le modèle mathématique. Les plans de Rechtschaffner, les plans de Plackett et Burman et les tables de Taguchi sont souvent des plans saturés. Un plan sursaturé est un plan qui comporte moins d'essais que de coefficients à déterminer dans le modèle mathématique [26], A ce titre les plans factoriels fractionnaires peuvent être considérés comme sursaturés. Mais, il existe des plans encore plus sursaturés que les plans factoriels fractionnaires. Ce sont des plans dont les facteurs principaux sont aliasés entre eux. Ces plans sont utiles lorsqu'il y a beaucoup de facteurs à examiner et lorsqu'on est sûr que peu d'entre eux sont influents sur la réponse. Certains plans proposent l'étude de 66 facteurs en 12 essais ou de 272 facteurs en 24 essais.

La théorie des aliasés est applicable à ces plans puisqu'on regroupe les coefficients dans des contrastes. Mais l'interprétation n'est pas toujours facile [27].

4.9 Plans à plusieurs niveaux :

Les plans à deux niveaux sont très utilisés parce qu'ils sont économiques en nombre d'essais. Mais il n'y a aucune raison de ne pas considérer des plans ayant des facteurs prenant plus de deux niveaux. Il faut donner à chaque facteur le nombre de niveaux nécessaires aux exigences de l'étude. Il existe, là aussi, des plans complets et des plans fractionnaires qui permettent de réduire le nombre des essais malgré l'augmentation du nombre de niveaux [25].

L'interprétation des résultats dépend de la nature des variables. Si les facteurs sont continus, on pourra utiliser un modèle du premier ou du deuxième degré et exécuter la modélisation. Pour ces variables, il existe des plans optimisés selon les différents critères d'optimalité. Pour ces variables, il existe des plans particuliers tels que les carrés latins, les carrés gréco-latins, les plans de Youden et les plans à niveaux mixtes [27].

4.10 Plans complets à trois niveaux :

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan 3². S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan 3³), il faut exécuter 27 essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle on a introduit les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de *carrés latins*.

4.11 Carrés latins

Les carrés latins sont des plans pour étudier 3 facteurs prenant chacun 3 niveaux. On réalise 9 essais au lieu de 27 pour le plan complet. Ce sont des plans fractionnaire 3³-1. La disposition des points expérimentaux est telle que tous les niveaux sont représentés et qu'il n'y a pas de répétition. La (Figure 22) illustre un carré latin pour 3 facteurs. Ces plans sont souvent utilisés pour les variables discrètes et le modèle mathématique est souvent un modèle sans interaction [25].

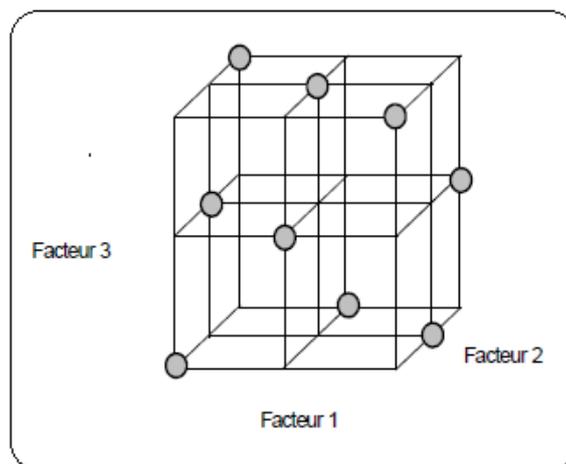


Figure 24 : plan en carre Latin

4.12 Carrés de Youden :

Youden [25] a développé des plans pour deux variables discrètes prenant plus de quatre niveaux. Le principe est analogue à celui des carrés latins. On réduit le nombre des essais en retirant des points au plan complet. Ces plans sont souvent utilisés pour les variables discrètes. Ils ont servi également de base à l'établissement de plans pour simulations numériques [27].

4.13 Plans à niveaux mixtes :

Il y a autant de facteurs que l'on veut et chaque facteur prend le nombre de niveaux nécessaires à la bonne exécution de l'étude. Par exemple, un facteur peut prendre 3 niveaux, un autre 4 niveaux et un troisième 6. Ces plans sont très utilisés pour les variables discrètes [27].

Synthèse :

- Un plan d'expériences est une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses. La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective (réponse).
- Pour formuler le plus clairement possible les objectifs visés, il est conseillé de bien choisir les variables susceptibles d'influencer sur le résultat d'étude et de prévoir les réponses définissant clairement le but visé.
- Les réponses qui résultent le plus souvent d'une analyse des observations expérimentales obtenues par une approche méthodologique rigoureuse. Car sans expérimentation physique ou numérique, il n'y a pas de solution. L'expérimentation est donc un moyen privilégié pour acquérir ou améliorer les connaissances mais, elle doit être optimisée car l'objectif est d'obtenir les informations les plus fiables possibles en un minimum d'essais.
- Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un *polynôme* dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. On démontre que les meilleurs emplacements des points d'expériences sont situés aux sommets du domaine d'étude. La représentation qui utilise les unités codées est plus générale que celle qui emploie les unités physiques habituelles.
- 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*.
- Pour aboutir à la fonction objective du plan d'expérience, plusieurs plans d'expérimentations sont mis en œuvre pour résoudre les problèmes d'ingénieries dans le domaine de l'industrie. Chaque plan suscité dans ce chapitre présente une spécificité pour l'obtention de la meilleure représentation du problème étudié selon ces septicités. nous allons adopter le plan de Taguchi pour notre cas d'études qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V : RECHERCHE DU REGIME DE FONCTIONNEMENT DES INSTALATIONS DE FORAGE CAS DE LA MINE DE DJEBEL-ONK

I. Introduction:

Une étude approfondie des différents systèmes de forage et de leur performance dans un site ou une région donnée est la pierre angulaire de l'amélioration des opérations de forage. Une telle étude nécessite une bonne tenue des registres et repose sur des enregistrements précis des opérations de forage pour développer une base de données de divers paramètres qui peuvent affecter les taux de forage. L'analyse des données sur le terrain permet à l'ingénieur de modéliser la relation entre les taux de forage et les paramètres qui peuvent influencer sur ces derniers.

Les questions que l'opérateur doit se poser pour définir ces paramètres sont les suivants :

- ✓ Comment faut-il réagir lorsque l'outil de forage passe d'une couche de roches friables vers une couche de roches dures ?
- ✓ Est-ce l'opérateur doit garder le même régime de fonctionnement de la machine de forage ou non et de quelle manière doit-il changer ce régime

La forabilité d'une roche exprime la facilité avec laquelle un outil de forage pénètre dans la roche. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier la résistance de la roche, dureté et texture de la matrice rocheuse, et de son abrasivité. Certains essais, généralement utilisés, ont pour but de quantifier la forabilité. Il ne faut pas perdre de vue toutefois que la forabilité in situ dépend aussi de la densité de discontinuités.

Le but de ce chapitre est de trouver un modèle mathématique qui relie le taux de pénétration de l'outil de forage pour différentes formations rocheuses (résistance à la compression variable) qui présentent une variabilité non contrôlable, et les paramètres contrôlables de la machine de forage (pression de poussée et pression de rotation).

II. Description du site d'études (la carrière de Djebel-Onk)

1. Situation géographique

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; la latitude E.N34 -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 (figure 1)[21].



Figure 25 : situation géographique du site d'étude [21],[38].

2. Cadre géologique (la carrière de Djebel-Onk) :

La succession stratigraphique, de la région, va de l'âge crétacé supérieur (le Maestrichtien) [26] vers l'éocène 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 [30].

3. La stratigraphie :

La colonne stratigraphique de la région débute à la fin du Campanien qui est confondu au Maestrichtien [21]. 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.
- ✓ **Danien inférieur** : Représenté par des argiles marneuses schisteuses grises foncées à brunes vertes intercalées de marno-calcaires dures en bancs irréguliers filons de gypse.

- ✓ *Danien supérieur* : calcaires blancs à crémeux très durs alternant avec des marnes tendres argileuses schisteuses.
- ✓ *Montien* : Série assez monotone de calcaires, calcaires détritiques à lumachelles avec intercalations de marnes et de dolomies.
- ✓ *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)[21], C'est la formation principale de Djebel-Onk.

Yprésien inférieur : 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 supérieur : Calcaires phosphatés ocre ou rougeâtres très ferrugineux, parfois siliceux.

- Calcaires à Thersite avec géode de quartz ou de calcite.
- Calcaires à nodules de schistes fortement calcifierais et phosphatés.
- Calcaires à rognons de silex, puis nodules de silex plus au moins quartzeux.
- Calcaires blancs à quartz géodique.

Lutétien inférieur :

- Calcaires marneux blancs
- Calcaires massifs blancs à nodules de silex.
- Gypse intercalé de calcaires.



Figure 26 : les différentes formations rocheuses de Djebel-Onk[38]

III. Optimisation par plan d'expérience des paramètres de forage :

Les étapes prédéfinis dans le chapitre précédent vont être exécutées, pour optimiser les paramètres de forages dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk.

1. Formalisation du problème :

1.1 Objectif de l'étude : Le problème à résoudre, consiste à trouver le régime optimal de forage pour chaque formation rocheuse, on maximisant le taux d'avancement (PR) de l'outil de forage dans le trou de mine tout en respectant les conditions techniques du forage (usure de l'outil, gaspillage d'énergie ... etc). [2] L'objectif principale de est de chercher les régimes optimaux des installations de forage dans la carrière de Djebel-Onk qui convient aux propriétés pour chaque couche de formations géologiques suivant la formule :

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

1.2 Définition des facteurs

1.2.1 Les variables de sorties : dans notre cas d'étude une seule variable de sortie est mise en étude. Il s'agit du taux d'avancement de l'outil de forage (PR). Cette variable est définie comme étant la réponse (y) du système étudié.

1.2.2 Les variables d'entrées :

1.2.2.1 Les variables contrôlables (Paramètres contrôlables de la machine (ROC L8) dans les conditions de Djebel-Onk :

Les facteurs influents sur le taux d'avancement sont choisis sur la base de l'expérience de l'opérateur, qui définit que les efforts de poussée (X_2) ainsi que celles de rotation (X_1) et d'air comprimé sont les principaux facteurs qui influent sur le taux de pénétration. Ces paramètres qui sont définis dans les caractéristiques techniques de la machines peuvent être commandés par l'opérateur [2]. Dans le tableau suivant nous allons présenter les paramètres de la machine de forage la Roc L8 utilisée actuellement dans la mine de phosphate de Djebel-Onk.

Tableau8 : les paramètres de la machine de forage

Facteurs			niveau du domaine	
			Min	Max
Pression de rotation	(X ₁)	(bar)	0	250
pression de pousse	(X ₂)	(bar)	0	250
Pression d'air comprime		(bar)	0	25

1.2.2.2 Les variables non contrôlables (Détermination de la résistance à la compression) : les propriétés des roches sont paramètres non contrôlables et leurs influences demeure très importantes sur le taux de pénétration de l'outil. Dans notre cas d'étude une propriété définie comme étant la plus influente c'est la résistance a la compression (X₃) des roches à forées.

a. 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 :

$$IS = F / D^2$$

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 :

$$20 IS 50 < \sigma_c < 27 IS 50$$

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

Cet essai est en général demandé lors de l'exploitation d'un gisement de roche massive, ou pour la réalisation de déblais rocheux pour évaluer la dureté des roches et apporter

une réponse matérielle aux problèmes d'extraction et d'usure, en complément d'autres essais (résistance en compression simple, essai d'abrasion ...).

b. Essai de compression simple :

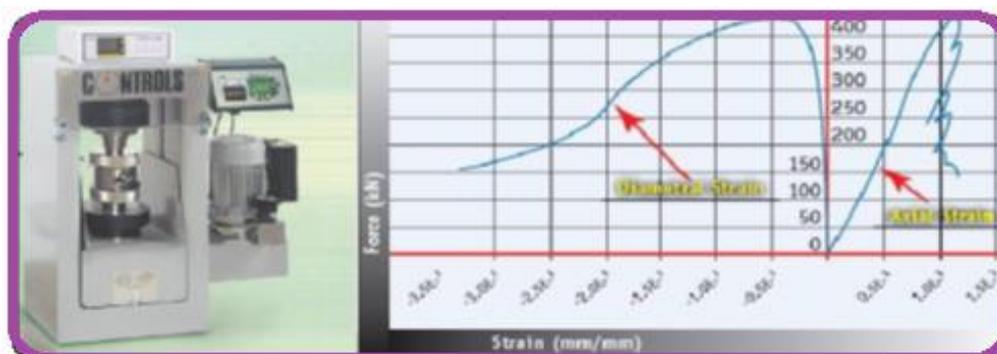


Figure 27 : machine de compression simple

L'essai de compression uniaxiale ou de compression simple consiste à comprimer un échantillon de roche de forme cylindrique entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. Les essais se font généralement par lots de 5 échantillons par roche homogène pour obtenir une bonne moyenne. Dans certains cas, et selon la taille de l'échantillon de roche disponible, les lots peuvent être plus grands ou plus petits.

L'échantillon doit présenter de préférence une elongation (rapport hauteur sur diamètre) de 2 à 2,5. La dimension usuelle dans le laboratoire est de 80 mm de hauteur par 40 mm de diamètre. Dans certains cas (manque de matériaux, qualité de la roche,...) les échantillons peuvent avoir des dimensions inférieures pour pouvoir réaliser les essais. Les échantillons sont préparés par forage au diamètre 40 mm (ou inférieur, préciser le cas de l'expertise en cours si différent), découpage et rectification pour l'obtention de surfaces strictement parallèles.

L'essai de compression uniaxiale est réalisé suivant les recommandations de la Société Internationale de Mécanique des Roches (I.S.R.M.).

Au cours de l'essai, un enregistreur permet de relever l'évolution de la contrainte axiale grâce à un capteur de force ou de pression, ainsi que celle des déformations soit par des capteurs de déplacement soit par des jauges de déformation. Cet enregistrement permet de déterminer différentes caractéristiques mécaniques selon le besoin : la résistance à la compression uniaxiale R_c , la limite élastique R_e , le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . Le Tableau 1 reprend un classement des roches en fonction de leur résistance à la compression uniaxiale.

Tableau 9: Qualification de la résistance d'une roche en fonction de la valeur de R_C

R_C	Terme descriptif
$R_C > 200$	Très élevée
$60 < R_C < 200$	Elevée
$20 < R_C < 60$	Moyenne
$6 < R_C < 20$	Faible
$R_C < 20$	Très faible

- c. **Les essais sur la roche (variables non contrôlables)** : dans notre cas d'étude présentée par la carrière de phosphate de Djebel-Onk, les formations rocheuses sont très diversifier de point de vue résistance à la compression, le tableau suivant présente un récapitulatif des essais réalisés aux laboratoire des mines de l'Université de Tébessa.

Tableau 10: la résistance à la compression des roches

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

Remarque : les valeurs de la résistance à la compression déterminées à partir de ces essais ne représentent qu' un indice de distinction de différentes couches géologiques et que les valeurs réelles dépendent de plusieurs autres paramètres tel que : l'humidité, la stratigraphie, la densité des minéraux, le confinement, etc

1.3 Triage des variables : Pour évaluer l'impact de ces variables sur le taux de pénétration de l'outil de forage dans les différentes formations rocheuses nous allons faire recourt à leurs corrélations avec ce dernier.

1.3.1 Principe et loi de corrélation (test de Person) : Il est indispensable dans cette étape de prouver la relation entres les variables d'entrées et celle de sortie. La loi de PEARSON est un outil

efficace pour confirmer cette corrélation, la formule suivante nous donne le coefficient

de corrélation (r) : avec comme condition $(r) > (r')$
$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}$$

(r'): Est la valeur de référence prise du tableau de PEARSON à 0.05%.

Les différentes étapes de calcul de corrélation sont présentées en détail dans l'annexe.

Le tableau suivant donne les valeurs récapitulatives des variables d'études.

x : Variable indépendante (dans notre cas d'étude pression de poussée et pression de rotation).

y : Variable dépendante (dans notre cas le taux de pénétration).

1.3.2 Corrélation entre les variables :

Tableau11: Corrélation du taux de pénétration avec la pression de poussée et la pression de rotation pour la couche de calcaire gypseux :

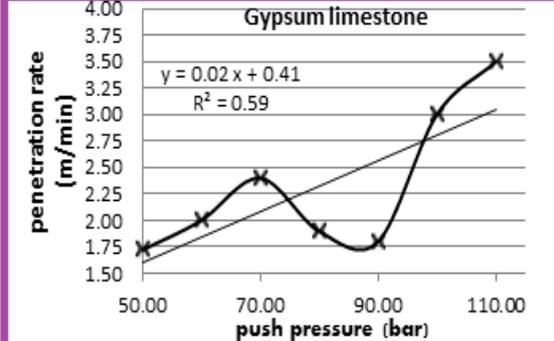
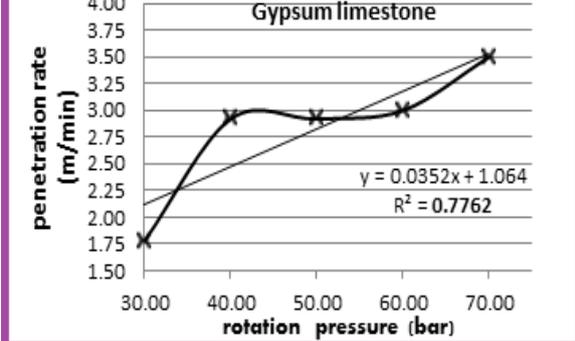
<p>Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de Couche de calcaire gypseux.</p>	<p>Corrélation entre la pression de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire gypseux.</p>
	
<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire gypseux.</p>	<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de rotation dans la couche de calcaire gypseux.</p>
<p>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</p>	<p>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</p>
<p>Synthèse : Dans cette couche la corrélation est forte.</p>	

Tableau12 : Corrélation du taux de pénétration avec la pression de poussée et la pression de rotation pour la couche de calcaire phosphaté blanc:

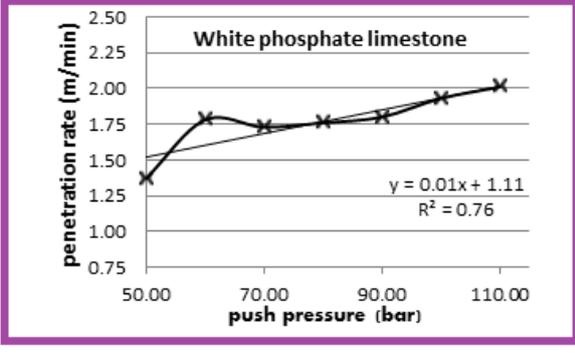
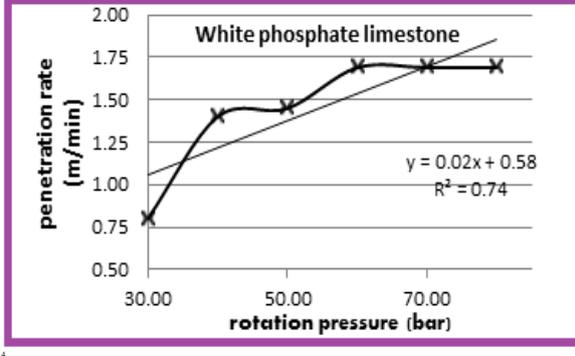
Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc.	Corrélation entre la pression de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté blanc.
	
la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté blanc.	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de rotation dans la couche de calcaire phosphaté blanc.
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	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
Synthèse : Dans cette couche la corrélation est forte.	

Tableau13 .Corrélation du taux de pénétration avec la pression de poussée et la pression de rotation pour la couche de calcaire phosphate siliceux :

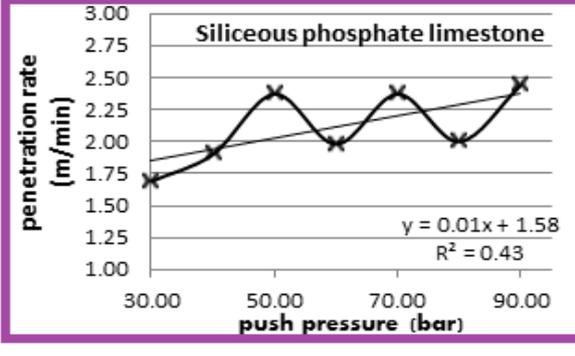
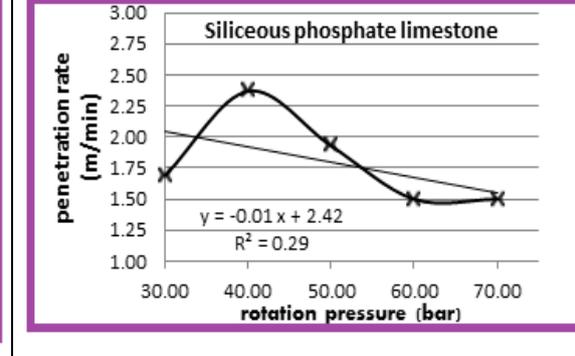
Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté siliceux	Corrélation entre la pression de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté siliceux
	
la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté siliceux	la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de rotation dans la couche de calcaire phosphaté siliceux
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.	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
Synthèse : Dans cette couche la corrélation n'est vérifiable à cause de la présence des boules de silix dans cette couche.	

Tableau14 : Corrélation du taux de pénétration avec la pression de poussée et la pression de rotation pour la couche de calcaire phosphaté noire :

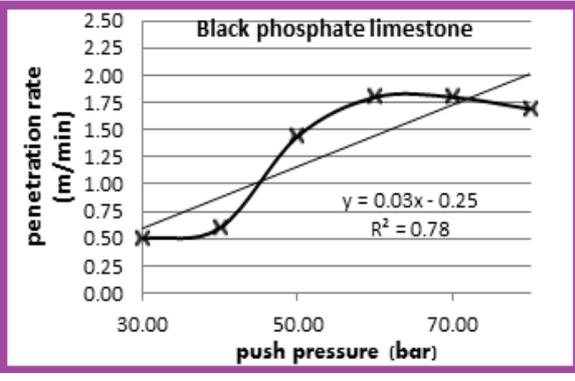
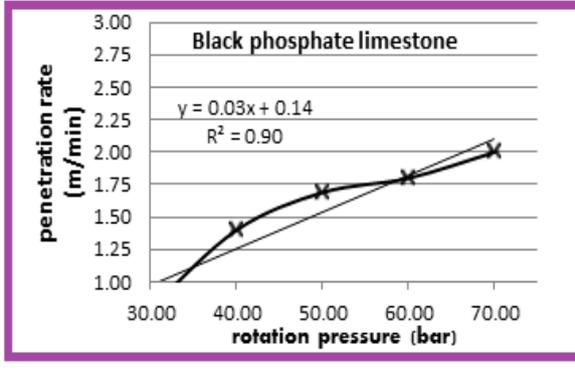
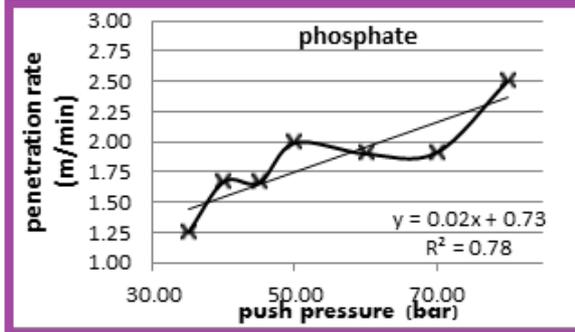
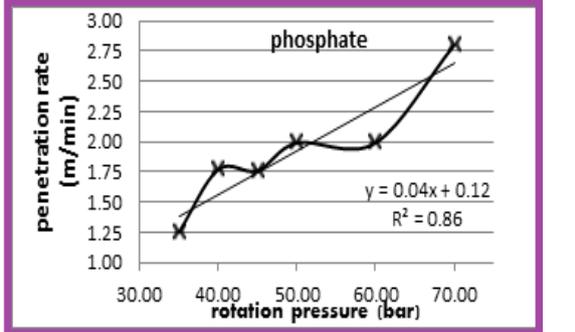
<p>Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté noire.</p>	<p>Corrélation entre la pression de rotation et le taux de pénétration dans la couche de calcaire phosphaté noire.</p>
	
<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de calcaire phosphaté noire.</p>	<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de rotation dans la couche de calcaire phosphaté noire.</p>
<p>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</p>	<p>la valeur du coefficient de corrélation: $r = 0.950$. 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</p>
<p>Synthèse : Dans cette couche la corrélation est forte.</p>	

Tableau 15: Corrélation du taux de pénétration avec la pression de poussée et la pression de rotation pour la couche de calcaire phosphate:

<p>Corrélation entre la pression de poussée et le taux de pénétration dans la couche de phosphate.</p>	<p>Corrélation entre la pression de rotation et le taux de pénétration dans la couche de phosphate.</p>
	
<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de poussée dans la couche de phosphate.</p>	<p>la courbe de variation du taux de pénétration en fonction de la pression de rotation dans la couche de phosphate.</p>
<p>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</p>	<p>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</p>
<p>Synthèse : Dans cette couche la corrélation est forte.</p>	

(r'): C'est la valeur de référence prise du tableau de Pearson. Avec : (r) > (r') Tableau de Pearson $\alpha = 0.05$.

Tableau 15: corrélation pour les différentes couches entre pression de rotation et de poussée en bar sur le Taux de pénétration (m/min)

Couches de roches	(r)		(r')		Corrélation
	poussée	Rotation	poussée	Rotation	
calcaire phosphate	0.893	0.873	0.878	0.754	<u>Oui</u>
calcaire gypseux	0.881	0.765	0.878	0.754	<u>Oui</u>
calcaire phosphate	-0.541	0.659	0.878	0.754	<u>Non</u>
calcaire phosphate noir	0.929	0.882	0.811	0.811	<u>Oui</u>
Phosphate	0.882	0.882	0.811	0.811	<u>Oui</u>

1.4 Le domaine d'étude : 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)*. 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.

Tableau 16 : niveau du domaine des facteurs :

Facteurs		niveau du domaine	
		Min	Max
Pression de rotation	(X_1) (bar)	0	250
pression exercée sur l'outil	(X_2) (bar)	0	250
La résistance à la compression	(MPa)	10	60
Pression d'air comprimé	(X_3) (bar)	0	25

1.5 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.

Tableau 17 : domaine de définition des facteurs dans les conditions de Djebel-Onk

Facteurs	niveau du domaine	
	Min	Max
Pression de rotation (X ₁) (bar)	30	70
pression exercée sur l'outil (X ₂) (bar)	30	110
La résistance à la compression (X ₃) (MPa)	10	60
Pression d'air comprimé (bar)	18	18

Remarque : l'air comprimé est considéré comme constant durant tous les essais

2. Construction du plan d'expérience :

2.1 Détermination de la fonction objective (y_{mod}) :

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction objective. Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale. Pour ce faire il est impératif de déterminer le nombre des essais minimal à réaliser pour atteindre l'objectif visé. Ce dernier peut être calculé suivant la formule : $N = 2^k$

Où N : est le nombre des essais nécessaires, k : est le nombre des facteurs. 2 : présente le nombre de niveaux de facteurs.

A priori et d'après les techniques de Taguchi un polynôme de 8 inconnus peut décrire d'une manière très précise la variation de la réponse Y en fonction de ces variables d'entrées ainsi que leur interaction de la forme suivant :

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

2.2 Exécution du plan d'expérience par système d'équation :

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

2.3 Codage des variables suivant le plan de Taguchi.

Le principe du codage est l'élimination des dimensions des variables d'études. Afin d'éviter la confusion des différentes unités. Les modalités des paramètres dans le

tableau précédant seront remplacées par les valeurs (-1) pour la borne inférieure et (+1) pour la borne supérieure.

Tableau 18 : codage des variables

Facteurs		niveau du domaine	
		Min	Max
Pression de rotation en (bar)	X ₁	-1	+1
pression exercée sur l'outil (bar)	X ₂	-1	+1
La résistance à la compression (MPa)	X ₃	-1	+1

La notion de matrice d'expérience traduit l'application de l'équation du modèle mathématique (la fonction objective), pour chacune des combinaisons définies à partir de la matrice d'expériences. De manière générale, la matrice du modèle est définie à partir de (N) lignes et de (P) colonnes. Le nombre de colonnes correspond au nombre de coefficients à estimer dans le modèle. Le plan des expériences dans notre cas devient de la forme d'une matrice de 8 lignes et de 8 colonnes et on remplaçant (+1) par (+) et (-1) par (-) comme suit :

Matrice des essais de Tguchi pour 3 facteurs à 2 niveaux :

$$\begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

3. Réalisation des essais :

3.1 Essais sur la machine de forage ATLAS-COPCO ROC L8 : le taux de pénétration d'un trou de mine est calculé en fonction du temps de forage sans prise en compte des temps de manœuvres et de positionnement. Seul le temps de forage net et la profondeur de pénétration sont signalés. Les valeurs de la profondeur de pénétration sont extraites à partir de panneaux numériques de l'appareil de forage selon l'épaisseur de chaque couche [21]

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

Les plans de Taguchi suggèrent l'élaboration de plusieurs répétitions sur le même essai afin de minimiser l'erreur en calculant la moyenne de ces essais. Pour notre cas nous avons réalisé trois répétition pour chaque combinaison dans les mêmes conditions de travail, et suite à l'application des répétitions le nombre des essais sera de (24) essais mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 19 : Les résultats des essais réalisés.

N	X ₁	X ₂	X ₃	n	y _i	épaisseur de la couche (m)	Temps net de pénétration (seconde)	taux de pénétration (m/min)	La Moyenne
1	-	-	-	1	0.7	3.5	300	0.7	0.5
	-	-	-	2	0.5	3	360	0.5	
	-	-	-	3	0.3	6	1200	0.3	
2	+	-	-	1	2.2	5	136	2.2	2.3
	+	-	-	2	2.3	4.5	117	2.3	
	+	-	-	3	2.4	4.5	112	2.4	
3	-	+	-	1	2.5	3	72	2.5	2.4
	-	+	-	2	2.3	3.5	91	2.3	
	-	+	-	3	2.4	3	75	2.4	
4	+	+	-	1	3.2	3.5	65	3.2	3.5
	+	+	-	2	3.8	4	63	3.8	
	+	+	-	3	3.5	7	120	3.5	
5	-	-	+	1	0.5	5.8	696	0.5	0.5
	-	-	+	2	0.4	5.5	825	0.4	
	-	-	+	3	0.6	6	600	0.6	
6	+	-	+	1	1.5	7	280	1.5	1.5
	+	-	+	2	1.6	7.5	2.81	1.6	
	+	-	+	3	1.4	6.5	278	1.4	
7	-	+	+	1	1.84	4	131	1.84	1.82
	-	+	+	2	1.82	5	164	1.82	
	-	+	+	3	1.8	5	166	1.8	
8	+	+	+	1	2	3	90	2	2.4
	+	+	+	2	2.2	4.5	122	2.2	
	+	+	+	3	3	8	160	3	

Suite aux valeurs calculées dans le tableau précédent, qui traitent les essais réalisés sur terrain, suivant les consignes de la matrice d'essais de Taguchi. Il convient maintenant de réduire le nombre d'essais de (24 essais avec répétitions à 8 essais en comptant les valeurs moyennes des essais). Le tableau suivant montre les paramètres de la matrice standard L8 de Taguchi suite à laquelle en calculera les coefficients du polynôme de la fonction objective (y_{mod}):

Tableau 20 :matrice des essais de Taguchi

N°	FACTEURS				INTERACTIONS				REPONCES
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ .X ₂	X ₁ .X ₃	X ₂ .X ₃	X ₁ .X ₂ .X ₃	Y
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0.5
2	+	+	-	-	-	-	+	+	2.3
3	+	-	+	-	-	+	-	+	2.4
4	+	+	+	-	+	-	-	-	3.5
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0.5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	1.5
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1.82
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2.4

4. Modélisation par la méthode des plans d'expériences.

4.1 Equation du modèle :

Dans notre cas d'étude l'équation du modèle est de la forme polynomial décrivant les variations de la fonction réponse y relativement aux valeurs de 3 facteurs (X₁, X₂, X₃). La relation mathématique reliant huit coefficients inconnus a priori qui doivent être déterminés pour définir la fonction objective (y_{mod}):

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

4.2 Détermination des coefficients : les coefficients (b_i) du polynôme présentent l'effet de chaque facteur.

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i(x_i)$$

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

Le tableau suivant présente la matrice d'essais de Taguchi avec les réponses et les coefficients de chaque facteur

Tableau 21 :matrice de planification de Taguchi

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

4.3 Détermination de la fonction objective : la fonction objective pour les conditions de la mine de Djebel-Onk est la suivante :

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56.x_1 + 0.665.x_2 - 0.31.x_3 - 0.14.x_1.x_2 - 0.165.x_1.x_3 - 0.11.x_2.x_3 + 0.035.x_1.x_2.x_3$$

Remarque: Ce modèle mathématique décrit la variation de la réponse y_{mod} avec la variation des facteurs d'entrées définis dans le domaine étude (b_{inf} , b_{sup}). Ce modèle est une fonction linéaire (d'ordre 1) à huit termes.

5. Analyse des résultats d'essais :

5.1 Hypothèses statistiques : L'analyse de variance (ANOVA : Analysis Of VAriance) regroupe un ensemble de techniques de tests et d'estimation visant à optimiser des protocoles expérimentaux pour individualiser l'influence de différents facteurs sur un paramètre à mesurer et revient dans le cas simple à comparer plusieurs moyennes d'échantillons gaussiens. Ces différentes techniques sont le reflet formel de plans d'expérience conçus préalablement et pouvant être diversifiés à l'infini au gré de

l'astuce des expérimentateurs. Un test est un mécanisme qui permet de trancher entre deux hypothèses au vu des résultats d'un échantillon. Soient H_0 et H_1 , ces deux hypothèses (H_0 est appelée hypothèse nulle, H_1 hypothèse alternative), dont une et une seule est vraie. La décision aboutira à choisir H_0 ou H_1 . Il y a donc 4 cas possibles schématisés dans le tableau suivant avec les probabilités correspondantes :

Tableau 22 : hypothèses statistiques

Décision \ Vérité	H_0	H_1
H_0	$1 - \alpha$	β
H_1	β	$1 - \alpha$

α et β sont les probabilités d'erreur de première et deuxième espèce : α probabilité de choisir H_1 , alors que H_0 est vraie. Autrement dit, si l'on rejette l'hypothèse vraie, on commet une erreur de première espèce (ou erreur de type I). β symbolise le seuil de signification. Traditionnellement, on favorise deux seuils : le premier $\alpha = 0.05$ correspond à un événement de cinq chances sur cent de se produire, le second $\beta = 0.01$ correspond à une chance sur cent.

α probabilité de conserver H_0 alors que H_1 est vraie. Si l'on accepte une hypothèse fautive alors on commet une erreur de deuxième espèce (ou erreur de type II). $(1 - \alpha)$ est la probabilité de rejeter H_1 en ayant raison. $(1 - \beta)$ est la probabilité d'opter pour H_1 en ayant raison. $(1 - \alpha)$ s'appelle "puissance du test". Généralement l'hypothèse alternative H_1 correspond à l'hypothèse que l'on désire mettre en évidence. De ce fait, $(1 - \alpha)$ est la probabilité d'obtenir le résultat que l'on souhaite démontrer.

Il faut savoir que pour un échantillon d'effectif donné, la valeur de α est inversement reliée avec la valeur de β . Plus petites seront les probabilités de commettre une erreur de type I, plus grandes seront les probabilités de commettre une erreur de type II. La seule manière de réduire simultanément les deux types d'erreur est d'augmenter les effectifs des échantillons. Ainsi, de grands échantillons résulteront des tests statistiques avec une puissance $(1 - \alpha)$ élevée. On remarque que dans la plupart des articles de revues biologiques ou médicales rapportant l'utilisation d'un test statistique la valeur β n'est pas mentionnée. Une des raisons souvent invoquée est la complexité du calcul de la puissance (parfois le calcul est tout simplement impossible et beaucoup de logiciels de statistiques n'en parlent même pas). Ainsi, même s'il faisait preuve de la meilleure volonté, l'utilisateur du test statistique se trouverait fréquemment dans l'impossibilité de

calculer la puissance $(1 - \beta)$ d'un test. Ce point n'est pas sans conséquences. La disparition du risque β interdit toute conclusion ferme quand, au bout du compte, on ne peut rejeter l'hypothèse nulle. Dans ce cas, ne pas rejeter l'hypothèse nulle signifie seulement qu'elle est acceptée provisoirement parce que l'on ne peut pas faire autrement. Cela ne prouve en aucune manière qu'elle est vraie. Par contre si l'on a calculé le risque de seconde espèce α , β représente la force de la preuve requise pour accepter l'hypothèse alternative, alors que α permet de connaître la puissance de la procédure et donc d'avoir une idée de la plausibilité de l'hypothèse nulle quand celle-ci a été acceptée.

5.2 Test de Student :

Calcul de la variance répétitive
$$S_{er} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{(n-1) \times N}}$$

Avec :

n : Le nombre de répétition $n = 3$.

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

Ddl_{er} : Le degré de liberté

$$Ddl_{er} = (n - 1) \times N = 16$$

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

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

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

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 :

$$S_{er} = 0.24964622$$

Condition du teste de Student
$$t_{bl} = \frac{|b_l|}{S_{bl}} > t_{t(\alpha, f)}$$

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

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

$\alpha = 0.05\%$ seuil de signification du tableau de Student.

f : Le degré de liberté

$$f = (N \times n) - m = (8 \times 3) - 4 = 20$$

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

$t_{t(\alpha, f)} = 2.08$ D'après le tableau de Student

Calcul de la dispersion des coefficients du model :

$$S_{bl}^2 = \frac{S_{er}^2}{N \times n}$$

Ou

$$S_{bl} = \sqrt{\frac{S_{er}^2}{N \times n}} \quad , S_{bl} = 0.050958822$$

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

Tableau 23 : Test des coefficients du modèle par la condition de Student.

Y	b_i	b_i	t_{bl}	$t_{t(a,f)}$	$t_{bl} > t_{t(a,f)}$
X_0	b_0	1.865	36.5981771	2.08	Significatif
X_1	b_1	0.56	10.989265	2.08	Significatif
X_2	b_2	0.665	13.0497522	2.08	Significatif
X_3	b_3	0.31	6.08334311	2.08	Significatif
X_1X_2	b_4	0.14	2.74731624	2.08	Significatif
X_1X_3	b_5	0.165	3.23790843	2.08	Significatif
X_2X_3	b_6	0.11	2.15860562	2.08	Significatif
$X_1X_2X_3$	b_7	0.035	0.68682906	2.08	Non Significatif

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

Le modèle devient :

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

5.3 Test de Fisher:

Utilisé pour tester l'égalité de deux variances, il est très sensible à la non-normalité des échantillons (on suppose aussi que les échantillons sont aléatoires et ont été prélevés indépendamment les uns des autres dans deux populations). Le principe de ce test est de calculer le rapport des variances dans le tableau suivant (avec la variance la plus grande au dénominateur) et de la comparer à la variable donnée par la table de Fisher-Snedecor avec $n_1 - 1$ et $n_2 - 1$ pour paramètres, correspondant aux degrés de liberté.

Calcul de la variance résiduelle :

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

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

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

Test de Fisher:

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

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

Tableau 24: test de Fisher

Formes de variations	valeurs	ddl	F _{obs}	F _{fisher}	
Factorielle (Ser)	$\frac{\sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{(n-1) \times N}$	0.06232	16	2.22	2.27
Résiduelle (Sres)	$\frac{n}{f} \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - y_{mod})^2$	0.13836	20		
Totale	S _{er} + S _{res}	0.20086	36		

loi de Fisher

5.4 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 :

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

X_i : La $i^{\text{ème}}$ variable normalisée du modèle (variable centrée réduite).

Tableau 25 : Transfert des variables codées en variables physiques .

Variables codées			Variables physiques		Variables normalisées
Paramètres codées (Sans unité)	Min	Max	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	30	70	$\frac{X_1 - 50}{20}$
X_2	-1	+1	30	110	$\frac{X_2 - 70}{40}$
X_3	-1	+1	10	60	$\frac{X_3 - 35}{25}$

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

Formule normalisée (modèle physique) :

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

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

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

5.5 Validation du modèle (calcul de résidus)

Tableau 26 : vérification du modèle

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Y	PR	Résidus	%
1	-	-	-	0.48	0.53	0.05	9.43
2	+	-	-	2.30	2.27	-0.03	6.00
3	-	+	-	2.30	2.37	0.07	2.95
4	+	+	-	3.25	3.53	0.03	6.00
5	-	-	+	0.46	0.53	0.07	2.95
6	+	-	+	1.40	1.53	0.13	8.45
7	-	+	+	1.80	1.85	0.05	9.43
8	+	+	+	2.42	2.37	-0.05	9.43

Remarque : La littérature stipule que si le résidu est inférieur à 30% le modèle physique est admissible. Dans notre cas d'étude tous les résidus ne dépassent pas les 10%, donc notre modèle est acceptable.

Formule simplifiée (modèle physique) :

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

Simplification en fonction de X_1 :

Courbes de variation du taux de pénétration PR selon la pression de rotation X_1

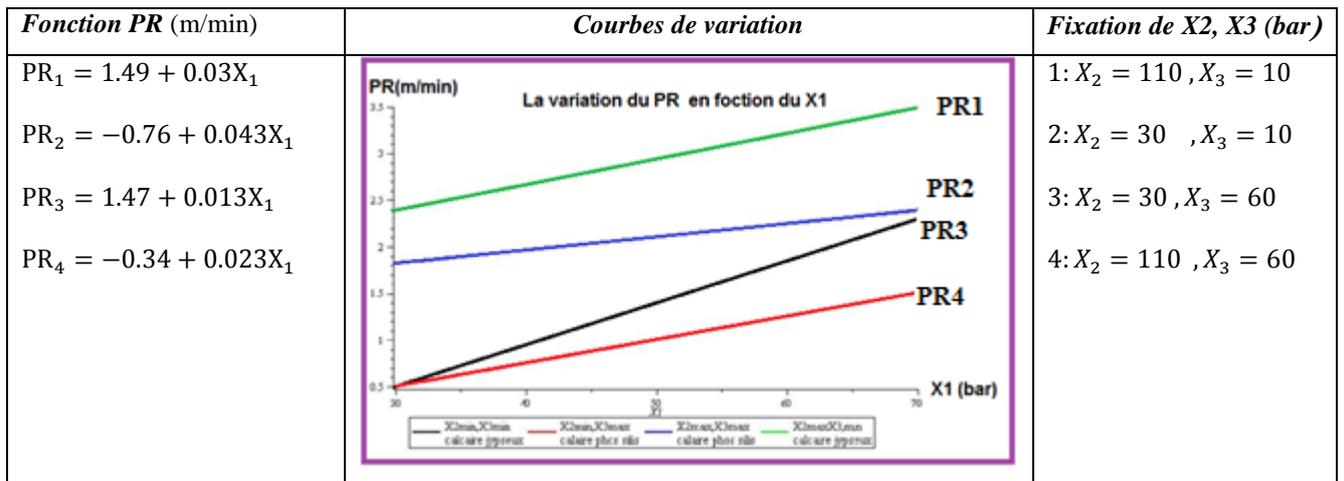


Figure 28 : Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X_1

Simplification en fonction de X_2 :

Courbes de variation du taux de pénétration PR selon la pression de rotation X_2

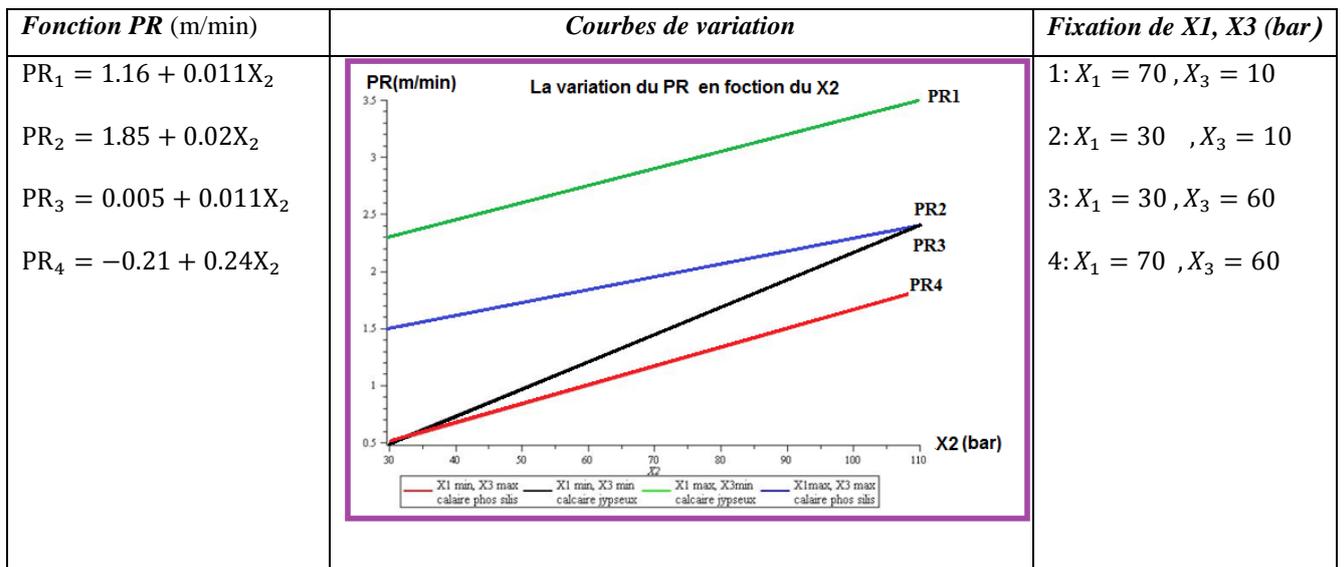


Figure 29 : Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X2

Simplification en fonction de X₃ :

Courbes de variation du taux de pénétration PR selon la pression de rotation X3

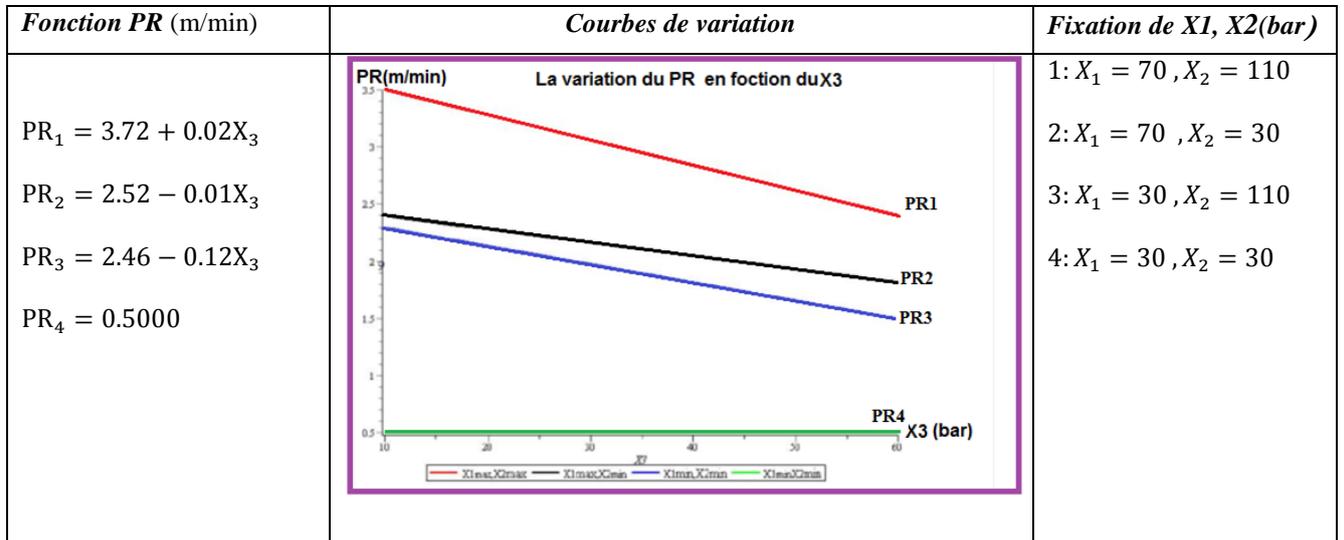


Figure 30 : Courbes de variation du PR selon la pression de rotation X3

IV. Vérification de la représentativité du modèle dans les conditions de la mine de Djebel- Onk

L'application du 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.

IV.1 La variation du taux de penetration dans la couche du Calcaire phosphate' siliceux

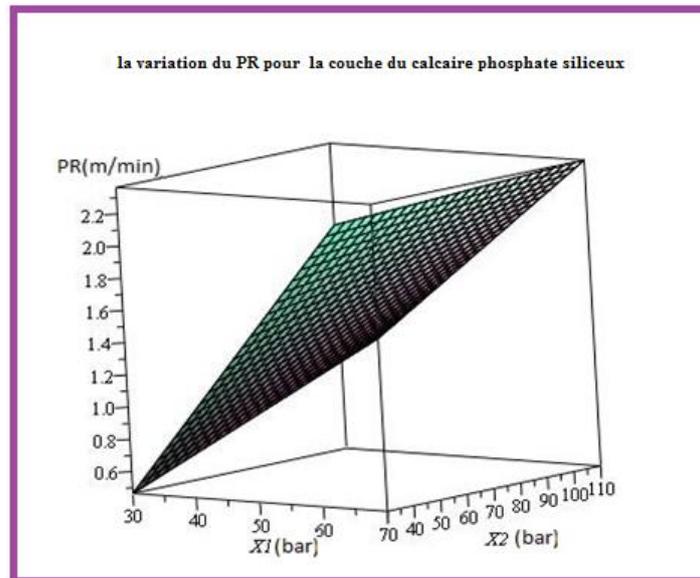


Figure 31 : surface de réponse pour la couche de calcaire phosphate siliceux

IV..2 .La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire gypseux

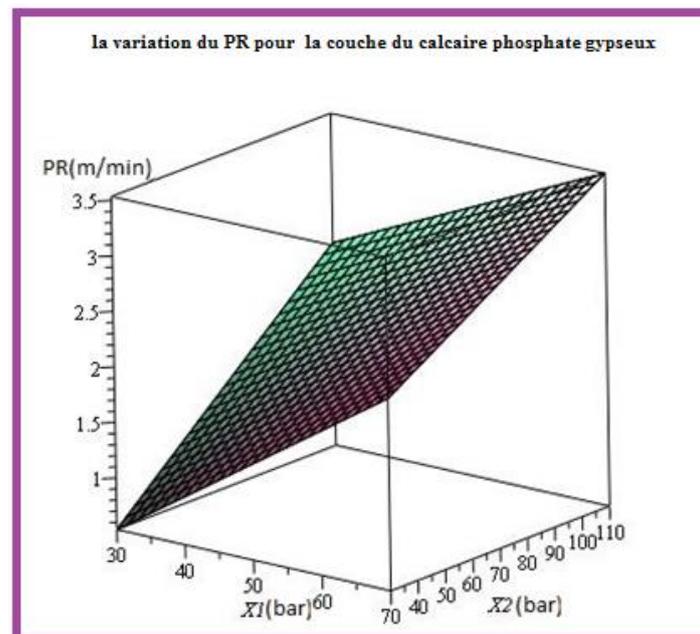


Figure 32 : surface de réponse pour la couche de calcaire phosphate gypseux

IV.3. La variation du taux de pénétration dans la couche du Phosphate

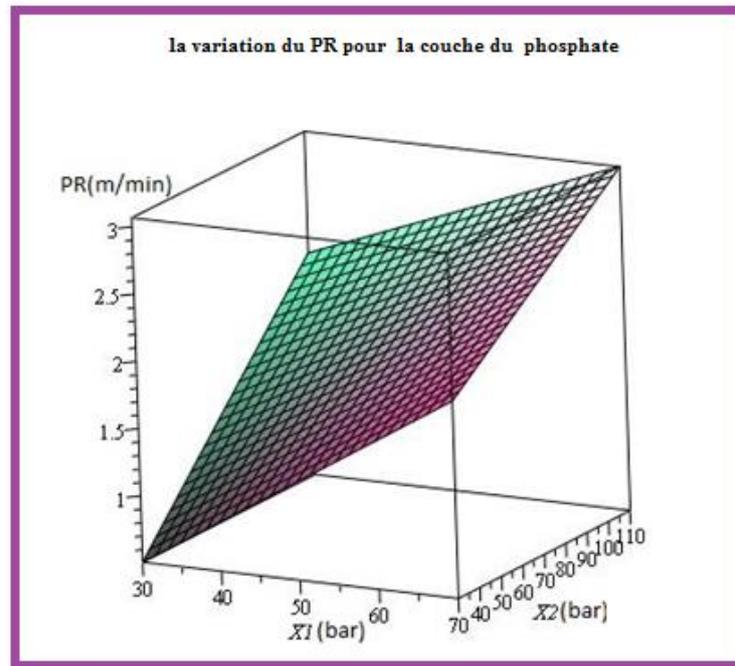


Figure 33 : surface de réponse pour la couche de calcaire Phosphate

IV.4 La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire phosphate blanc

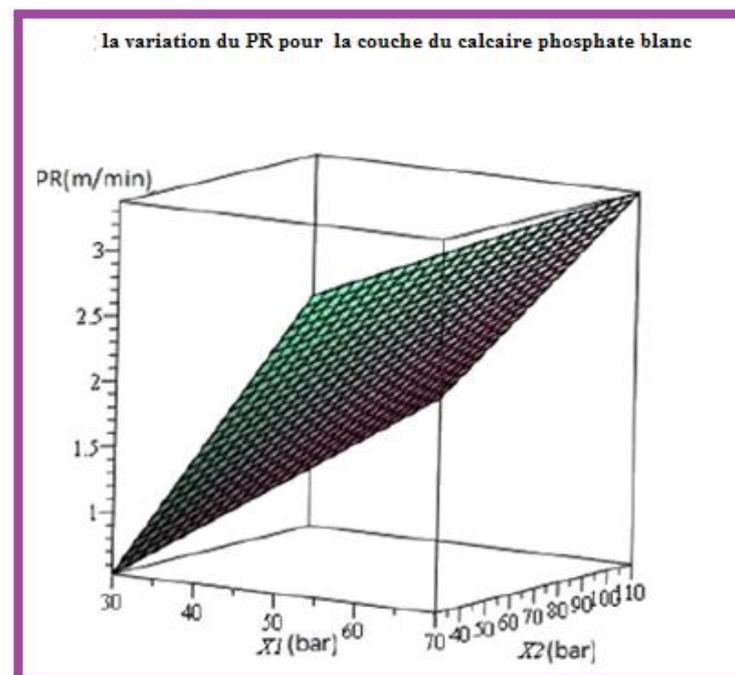


Figure 34 : surface de réponse pour la couche de Calcaire phosphate blanc

IV.5 La variation du taux de pénétration dans la couche du Calcaire phosphate noir

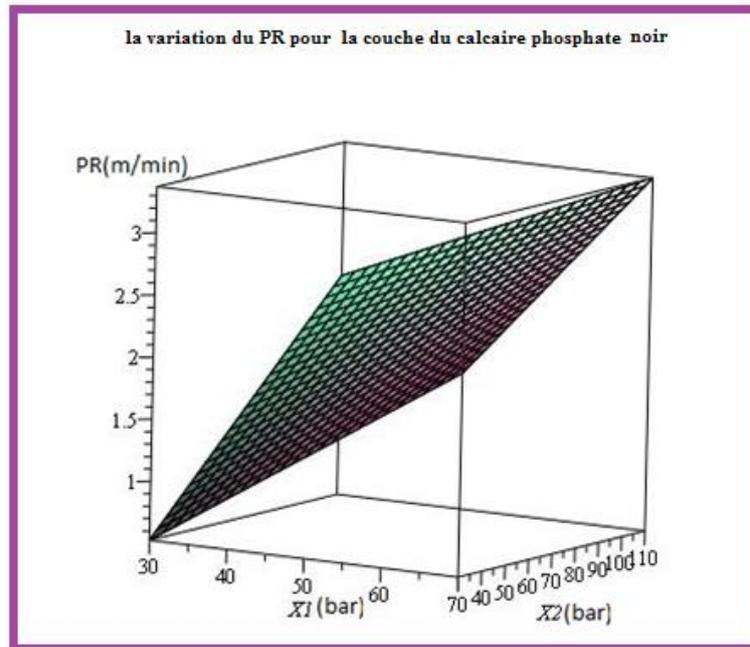


Figure 35 : surface de réponse pour la couche de Calcaire phosphate noir

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

Tableau 27 : Récapitulatif des résultats pour les différentes formations rocheuses :

Type de roche	PR5 (m/min)	PR1 (m/min)	PR2 (m/min)	PR3 (m/min)	PR4 (m/min)
	50-50 (bar)	30-30 (bar)	70-30 (bar)	30-110 (bar)	70-110 (bar)
	Actuel	Proposé	Proposé	Proposé	Proposé
Calcaire phosphaté gypseux 10 MPa	1.78	0.50	2.30	2.40	3.50
Calcaire phosphaté noir 17 MPa	1.71	0.50	2.18	2.31	3.34
Calcaire phosphaté blanc 20 MPa	1.68	0.50	2.14	2.28	3.28
Phosphate 30 MPa	1.58	0.50	1.92	2.16	3.06
Calcaire phosphate siliceux 60MPa	1.27	0.50	1.50	1.82	2.40

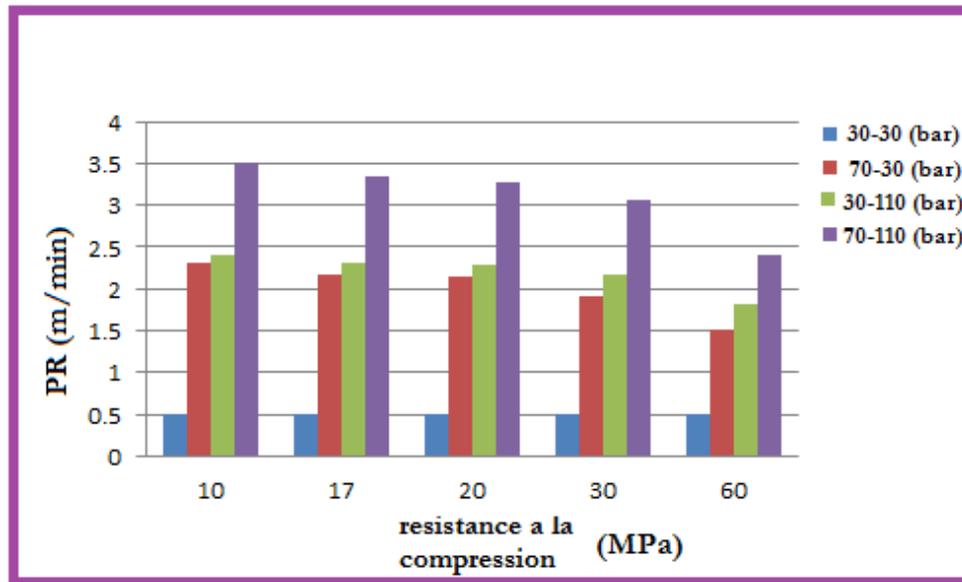


Figure 36 : Histogramme des régimes de fonctionnement

V.1 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 de 50 bars et la pression de poussée est de 50 bars pour toutes les formations rocheuses. 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.

Détermination du taux de pénétration (PR₅) Pour les différentes roches.

$$\text{pour } \begin{cases} X1 & \text{pression de rotation} = 50 \text{ bar} \\ X2 & \text{pression de pousse} = 50 \text{ bar} \end{cases}$$

Calcaire gypseux : $PR_5 = 1.78 \text{ m/min}$

Calcaire phosphate noir : $PR_5 = 1.71 \text{ m/min}$

Calcaire phosphate blanc : $PR_5 = 1.68 \text{ m/min}$

Phosphate: $PR_5 = 1.58 \text{ m/min}$

Calcaire phosphaté siliceux : $PR_5 = 1.27 \text{ m/min}$

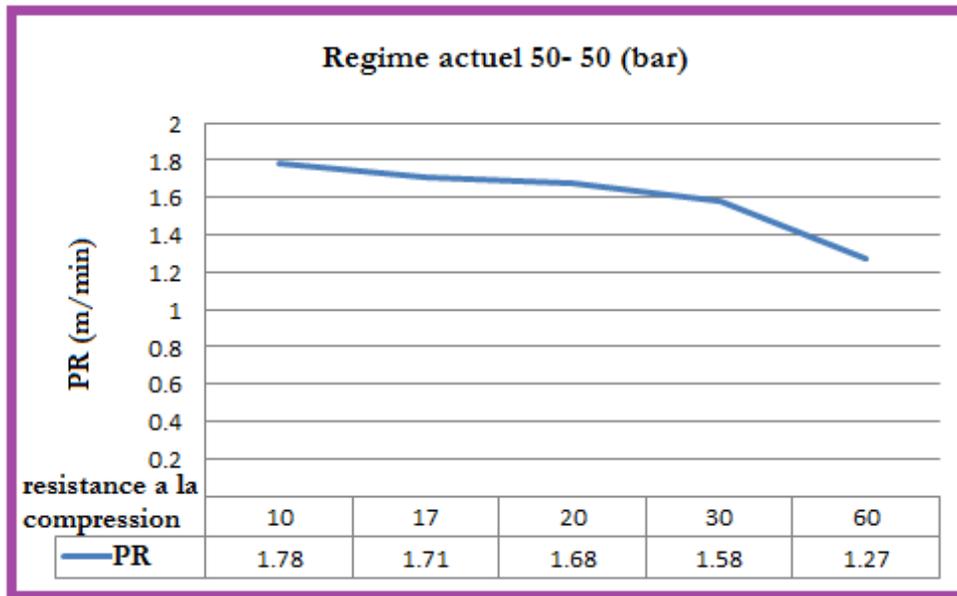


Figure 37 : Régime actuel (50-50) (bar)

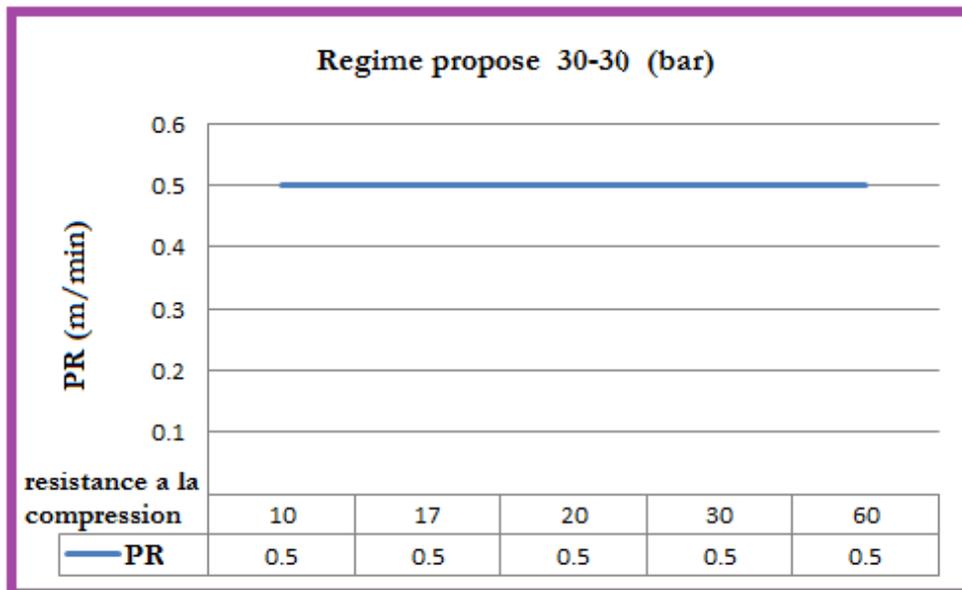


Figure 38 : Régime propose (30-30) (bar)

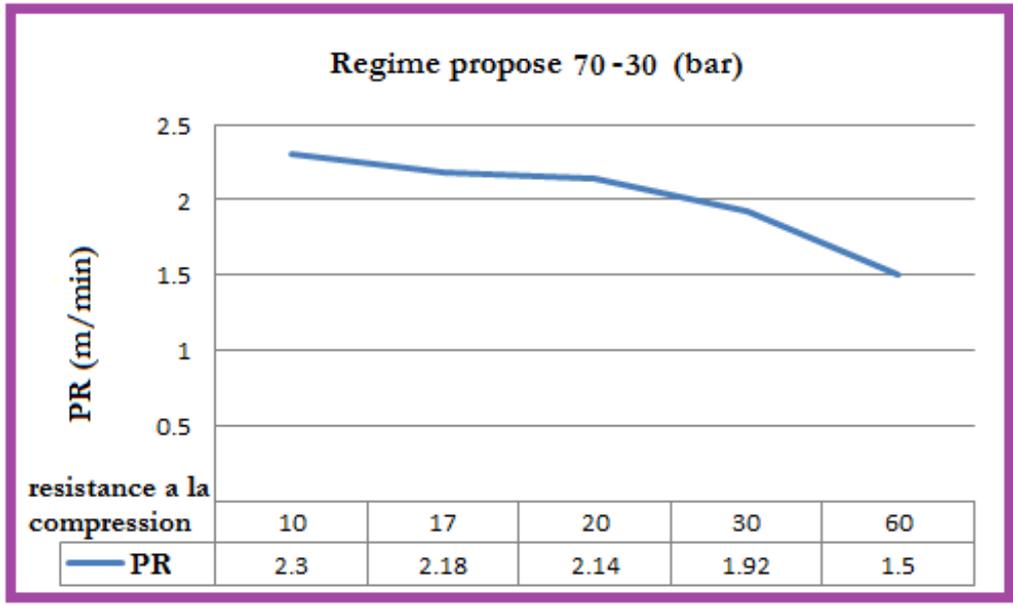


Figure 39 : Régime propose (70-30) (bar)

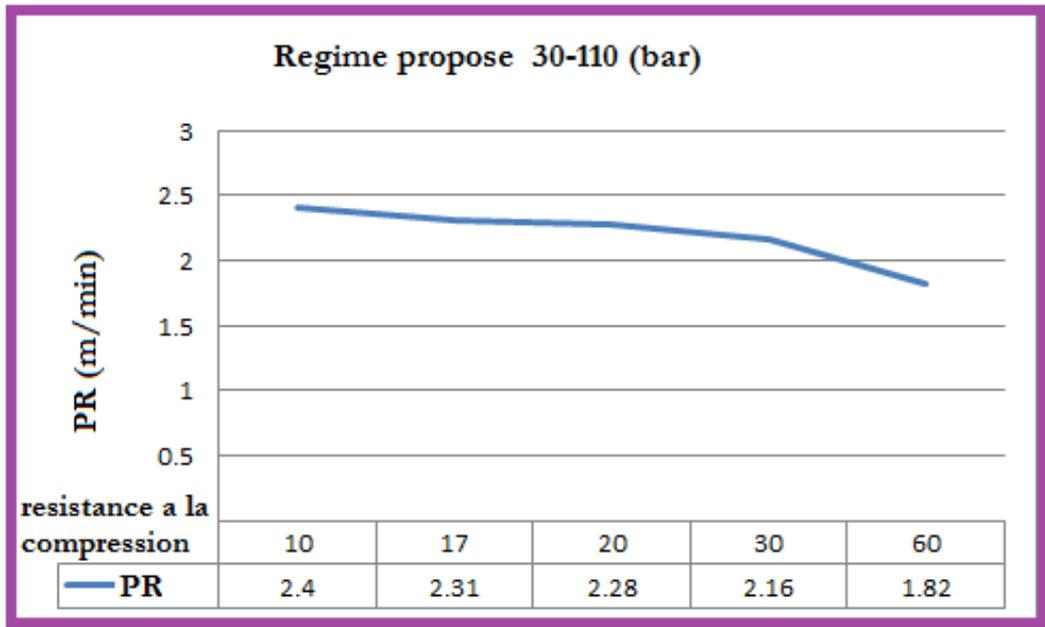


Figure 40 : Régime propose (30-110) (bar)

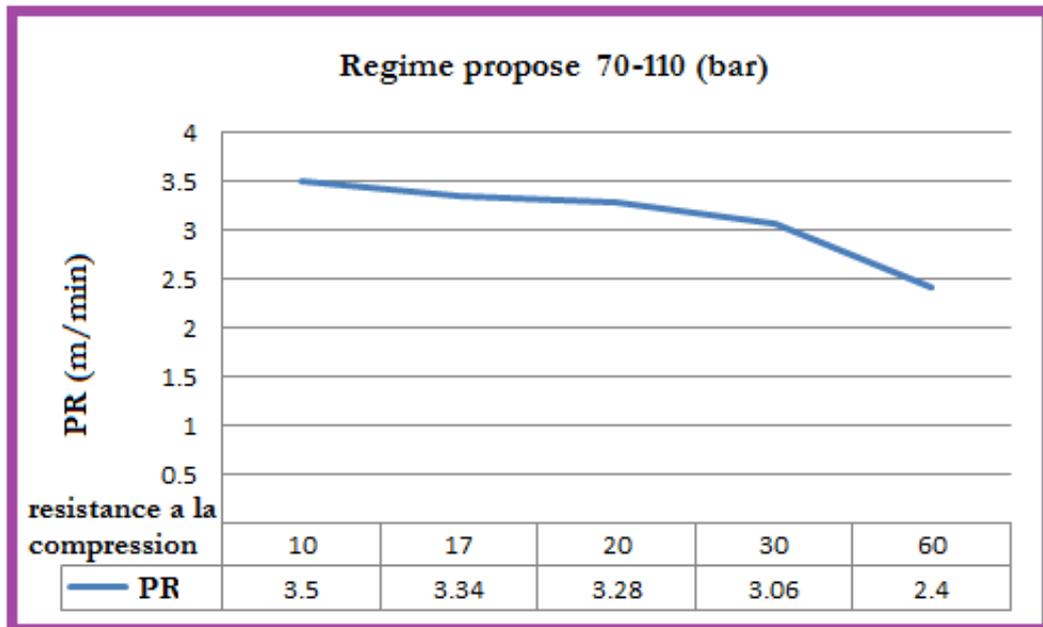


Figure 41 : Régime propose (70-110) (bar)

V.2 Interprétation mathématique et graphique :

Les résultats du model ainsi que l'optimisation des régimes de fonctionnement des machines de forages dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk seront présentées dans le tableau suivant :

Tableau 28 : interprétation mathématique et graphique des variables contrôlable :

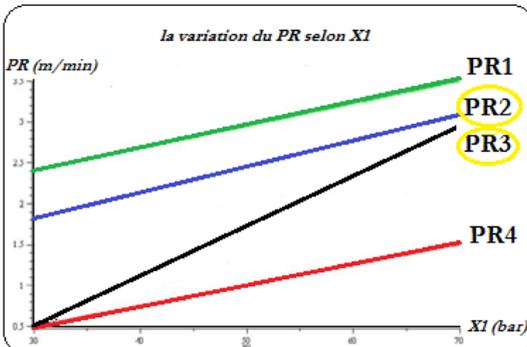
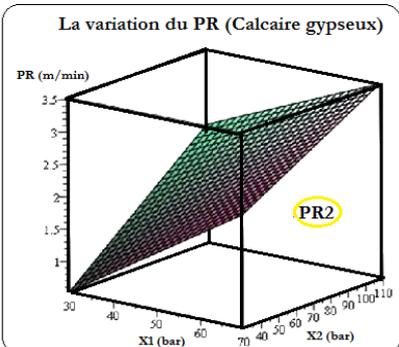
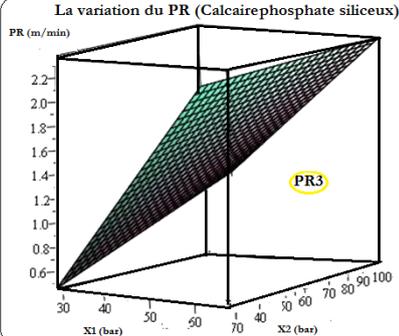
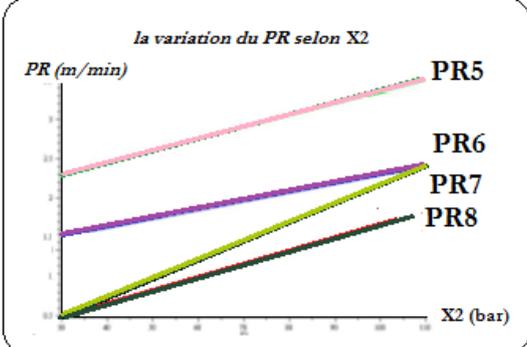
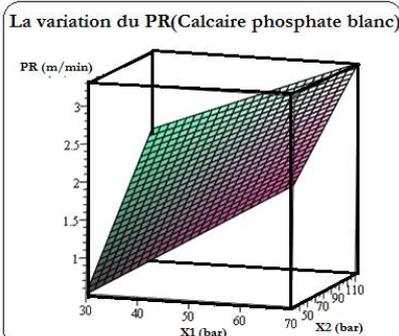
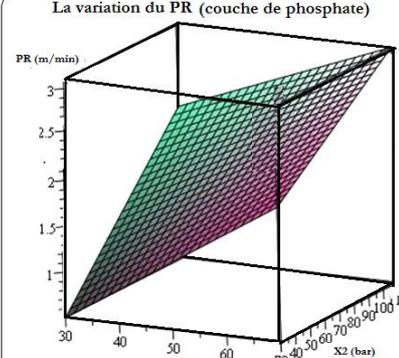
Equation du model	Représentation graphique	Surface de réponses
<p>PR1 = X3 min--X2max, PR2 = X3 min--X2min PR3 = X3 max--X2 max PR4 = X3 max---X2 min</p> <p>PR1 = 1.47250 + 0.01275X₁ PR2 = 1.48750 + 0.02925X₁ PR3 = - 0.76250 + 0.04325X₁ PR4 = - 0.33750 + 0.02675X₁</p> <p>PR2 : optimale pour le calcaire gypseux. PR3 : optimale pour le calcaire phosphaté siliceux.</p>	<p>la variation du PR selon X1</p>  <p>Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction linéaire strictement croissante. La variation de la rotation dans le sens croissant montre la linéarité de ce paramètre et son influence sur la réponse. Pour une résistance maximale de la roche la pression de rotation joue un rôle considérable sur la réponse lorsque la poussée exercée sur l'outil passe du bord inférieur vers le bord supérieur.</p>	<p>La variation du PR (Calcaire gypseux)</p>  <p>La variation du PR (Calcaire phosphate siliceux)</p> 
<p>PR5 = X3 min---X1 max PR6 = X3 min--X1 min PR7 = X3 max---X1max PR8 = X3 max---X1min</p> <p>PR5 = 0.005 + 0.0165 X2 PR6 = 1.850 + 0.0150 X2 PR7 = 1.16250 + 0.01125 X2 PR8 = -0.21250 + 0.23750X2</p>	<p>la variation du PR selon X2</p>  <p>La variation de poussée présente également un caractère fortement linéaire. La corrélation entre la pression de poussée et celle de rotation montre l'influence de cette dernière sur la réponse, ce qui justifie la théorie évoquée dans le deuxième chapitre montrant que le mode de forage rotatif présente des avantages sur les autres modes dans les forages superficiels.</p>	<p>La variation du PR(Calcaire phosphate blanc)</p>  <p>La variation du PR (couche de phosphate)</p> 

Tableau 29 : interprétation mathématique et graphique des variables non contrôlables

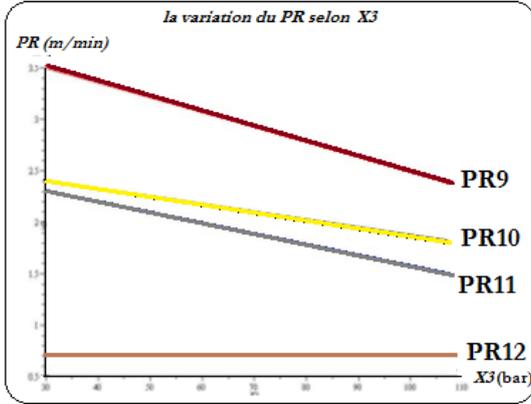
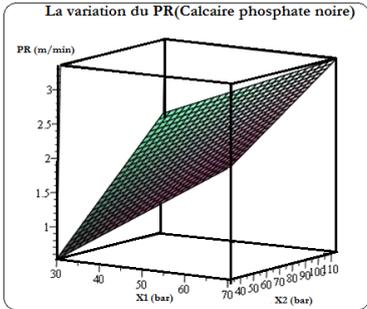
Equation du model	Représentation graphique	Surface de réponses
<p>PR9 = X1 max--X2 max PR10 = X1 max--X2 min PR11 = X1 min--X2max, PR12 = X1 min--X2min</p> <p>PR9 = 3.720-0.022X3 PR10 = 2.516-0.116X3 PR11 = 2.46-0.116X3 PR12 = 0.005</p>	<p>la variation du PR selon X3</p>  <p>Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction linéaire strictement décroissante. la résistance à la compression montre une influence incontestable sur la réponse, et définit la perte d'énergie qui peut se produire lors de l'augmentation de la poussée sur les formations rocheuses dures.</p>	<p>La variation du PR(Calcaire phosphate noire)</p> 

Tableau 30 : la variation du PR dans le domaine de variation des paramètres

Taux de pénétration pour les différentes couches				
Résistance de la roche X3 (MPa)	Poussée X2 (bar)	Rotation X1 (bar)=30	Rotation X1(bar)=70	régime optimal choisi
Calcaire gypseux 10	30	0.50	2.30	X1 max—X2min
	110	2.40	3.50	
Calcaire phosphate noir 17	30	0.50	2.18	X1 max—X2min
	110	2.31	3.34	
Calcaire phosphate blanc 20	30	0.50	2.14	X1 max—X2min
	110	2.28	3.28	
phosphate 30	30	0.50	1.92	X1 min —X2 max
	110	2.16	3.06	
Calcaire phosphate siliceux 60	30	0.50	1.50	X1 min—X2max
	110	1.82	2.40	

Choix optimal du regime de fonctionnement des machines de forage dans les conditions de Djebel-Onk

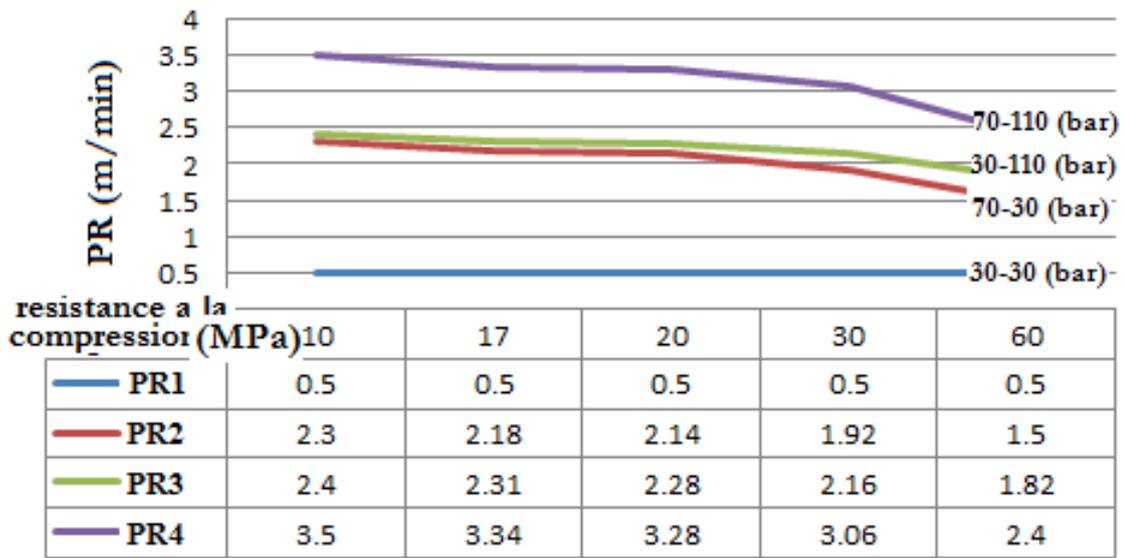


Figure 42 : Régimes proposes

Synthèse:

- ➔ Les formations rocheuses de faible résistance à la compression (Calcaire gypseux, Calcaire phosphate noir, Calcaire phosphate blanc) dont la valeur est comprise entre (10 à 20 MPa), réagissent plus au régime de poussée minimale et rotation maximale que les autres régimes.
- ➔ Tandis que les formations de moyenne et forte résistance a la compression (phosphate, Calcaire phosphate siliceux dont la valeur est comprise entre (30 à 60 MPa) réagissent plus au régime de poussée maximale et rotation minimale que les autres régimes.
- ➔ L'excès de pression de poussée et celui de rotation au niveau maximal donne le taux de pénétration maximale pour toutes les formations rocheuses, ce régime n'est pas choisi pour des fins de durabilités des équipements de forages.
- ➔ Le seul régime rejeté pour toutes les formations rocheuses est celui de pression de poussée minimale et pression de rotation minimale qui donne un taux de pénétration très faible.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les installations de forages dans le domaine minier doivent s'adapter aux conditions difficiles des terrains à forer (dureté, résistance mécanique des roches....etc.). Ces difficultés de formations rocheuses en contact direct avec les outils de forage influent sur la vitesse de pénétration. La propriété dominante des roches qui influe sur le processus de forage, prise par la majorité des chercheurs dans le domaine de forage minier est la résistance à la compression. Le forage minier est généralement peu profond, l'application du mode de forage roto percutant est le plus favorable pour les conditions minières. Ce choix s'appuie sur l'utilisation des outils PDC qui sont montrés une efficacité incontestable de point de vue longévité ainsi que leurs vitesses d'avancement très importante par rapport aux autres outils. Concrètement, un outil est qualifié de performant s'il permet d'obtenir des vitesses d'avance élevées ainsi que des coûts d'exploitation modérés.

La vitesse d'avancement la plus régulière possible est essentiellement liée au diamètre de l'outil d'une part et de la nature des terrains d'autre part. Les paramètres qui contrôlent l'avancement du forage sont spécifiques à la technique utilisée : rotation, poussée et air comprimé sur l'outil. Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour travailler dans de bonnes conditions : avancement, évacuation régulière des cutting, stabilisation des parois du trou. L'organisation de tous ces paramètres afin d'obtenir un rendement efficace du processus de forage, méritent d'être optimisés. Pour ce faire il est impératif de faire le choix de la meilleure méthode d'optimisation pour atteindre cet objectif. Les méthodes d'optimisations directes et indirectes sont des outils incontestables à cette fin. Les méthodes directes visent seulement à connaître les conditions optimales de fonctionnement. Alors que les méthodes indirectes apportent plus d'informations dans la mesure où il est possible de déterminer la réponse pour des valeurs données des facteurs autour de l'extremum. Grâce à un modèle mathématique issu des techniques utilisées par ces méthodes.

Dans le domaine minier, il n'existe pas de modèle mathématique universel acceptable qui décrit la variation du taux de pénétration en fonction des paramètres de forage avec précision en raison de la nature des terrains à forer. La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de ces modèles mathématiques. Pour formuler le plus clairement possible les objectifs visés, il est

conseillé de bien choisir les variables susceptibles d'influencer sur le résultat d'étude et de prévoir les réponses définissant clairement le but visé. Le gain de temps, de coût et de main d'œuvre, fait de la méthodologie des plans d'expérience un outil efficace pour mettre en œuvre des expériences. Pour aboutir à la fonction objective du plan d'expérience, plusieurs plans d'expérimentations sont mis en œuvre pour résoudre les problèmes d'ingénieries dans le domaine de l'industrie. Le plan de Taguchi nous a permis d'obtenir une fonction objective qui peut décrire la variation de la réponse en fonction des facteurs d'entrées. L'influence des facteurs et des interactions sur les variations constatées de la réponse sont traités par *l'analyse de la variance* afin de tester et valider le modèle déterminé.

Les recommandations tirées suites aux travaux réalisés par cette thèse pour les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk sont les suivantes :

- Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction linéaire strictement croissante. La variation de la rotation dans le sens croissant montre la linéarité de ce paramètre et son influence sur la réponse. Pour une résistance maximale de la roche la pression de rotation joue un rôle considérable sur la réponse lorsque la poussée exercée sur l'outil passe du bord inférieur vers le bord supérieur.
- La variation de poussée présente également un caractère fortement linéaire. La corrélation entre la pression de poussée et celle de rotation montre l'influence de cette dernière sur la réponse, ce qui justifie la théorie évoquée dans le deuxième chapitre montrant que le mode de forage rotatif présente des avantages sur les autres modes dans les forages superficiels.
- Le taux de pénétration de l'outil de forage est une fonction linéaire strictement décroissante. **La résistance à la compression** montre une influence incontestable sur la réponse, et définit la perte d'énergie qui peut se produire lors de l'augmentation de la poussée sur les formations rocheuses dures.
- Les formations rocheuses de faible résistance à la compression (Calcaire gypseux, Calcaire phosphate noir, Calcaire phosphate blanc) dont la valeur est comprise entre (10 à 20 MPa), réagissent plus au régime de poussée minimale et rotation maximale que les autres régimes.

- Tandis que les formations de moyenne et forte résistance à la compression (phosphate, Calcaire phosphate siliceux dont la valeur est comprise entre (30 à 60 MPa) réagissent plus au régime de poussée maximale et rotation minimale que les autres régimes.
- L'excès de pression de poussée et celui de rotation au niveau maximal donne le taux de pénétration maximale pour toutes les formations rocheuses, ce régime n'est pas choisi pour des fins de durabilités des équipements de forages.
- Le seul régime rejeté pour toutes les formations rocheuses est celui de pression de poussée minimale et pression de rotation minimale qui donne un taux de pénétration très faible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. Mabilot (1988). "Le forage d'eau ". tec et doc Lavoisier
2. Altındağ, R., (2003). " Estimation of penetration rate in percussive drilling by means of coarseness index and mean particle size". (Rock Mech Rock Eng, 36(4), 323-332.springer verlagl).
3. Atlas Copco (2009) " Surface drilling, third. (Reference Booklets (CD) from Atlas Copco Rock Drills AB,) ".(<https://www.pdfdrive.net>)
4. Atlas-Copco reference (2012) " Blasthole Drilling in Open Pit Mining". third edition (<https://www.pdfdrive.net>)
5. Atlas-Copco reference (2012) " third edition Blasthole Drilling in Open Pit Mining" (<https://www.pdfdrive.net>)
6. B.a. Kennedy, (1990)", Surface Mining, " 2e édition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)Baltimore, Maryland (Flider Eugene USA|)
7. Bilgin N, Shahriar K., (1986). " Evaluation of indirect methods used in determination of some mechanical properties of rocks and coal seams". . First National Rock Mechanics Congress Oct. 1986. Ankara, Turkey, pp. 86-97 (In Turkish).
8. Bilim, N., (2011). "Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties(<http://www.academicjournals.org/SRE>)
9. Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S., (1988) "A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection". (Society of Petroleum Engineers Journal Volume 14)
10. Chan S (1994) " Measuring rock drillability by mini-drillgauge. Metal Mine "
11. Dahl F et al (2011) " Classification of properties influencing the drillability of rock, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunn Undergr Space Technol". 28(2012):150–158
12. <https://www.osmre.gov/resources/blasting/btm/Module4.pdf>
13. E. M. Galle and H. B. Woods (1964) "Best Constant Weight and Rotary Speed for rotary Rock Bits", American Petroleum Institute,
14. F.GRONDIN, " Les Outils de Forage ", SONATRACH – Division forage, département de formation, édition janvier 2004.
15. F.GRONDIN(2015), " Les Outils de Forage ", SONATRACH – Division forage, département de formation, édition janvier 2015.
16. F. Viallet (1970) "Statistique et recherche appliquée " Edition Cholard et associes Paris .
17. Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z., (2006). "Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays. The Michigan chemical process dynamic and controls open text book", Michigan USA, 2(3), 4.
18. G. Atkins 2003, "Modelling Metal Cutting Using Modern Ductile Fracture Mechanics:

- Quantitative Explanations for Some Longstanding Problems," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 45, pp. 373-396,
19. G. Hareland, H. R. Motahhari, J. P. Hayes, and A. Qureshi (2008) "Increased drilling-efficiency of gas-storage wells proven using drilling simulator in Proceedings of the CIPC/SPE Gas Technology Symposium", Paper SPE 114798, Calgary, Canada, June
 20. Gadri, L., Hadji, R., Zahri, F., Benghazi, Z., Boumezbeur, A., Laid, B. M., & Raïs, K., (2015). "The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria".. *Arab J Geosci*, 8(11), 8987-8997.
 21. GERALD. Mentha (1961) "les tests statistiques au services des affaires" Université de Genève Edition Hommes et techniques Paris .
 22. GOUPY Jacques (1999)"Plans d'expériences pour surfaces de réponse ", Dunod. Paris.
 23. GOUPY Jacques (2000) "Plans d'expériences : les mélanges". Dunod. Paris.
 24. GOUPY Jacques (2000) "Boolean Experimental Designs " Dunod. Paris.
 25. GOUPY Jacques(2001) "Introduction aux Plans d'expériences", Dunod. Paris.
 26. GOUPY Jacques(2005) "Pratiquer les Plans d'Expériences". Dunod. Paris
 27. H. Rabia (1985), "Specific Energy as a Criterion for Bit Selection" .SPE Journal of Petroleum Technology, vol. 37
 28. H.Abdollahi, et al. 2004,"Drilling Optimization Using Minimum Energy Concept," presented at the 2nd Iranian Rock Mechanics Conference, Tehran.
 29. Hadji, R., Raïs, K., Gadri, L., Chouabi, A., & Hamed, Y., (2017). "Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria. ". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(1), 281-300.
 30. Hartman, H.L.(1992): " SME Mining Engineering Handbook, " 2e edition
Published by Society of Mining Engineers
 31. J. C. Jaeger and N. G. W. Cook (1969) "Fundamentals of Rock Mechanics". Methuen & Co Ltd, Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc. Littleton Colorado•
 32. J. F. Brett, et al (1990) "Bit Whirl A New Theory of PDC Bit Failure," *SPE Drilling Engineering*, vol. 5,pp. 275 281.
 33. Johnson Screen Joseph S. Dveinny "migration of hazardous wastes" Johnson Screen (1986) " Groundwater and Wells" Second Edition" Johnson Screen.
 34. Judzis Arnis (2007), "Optimization of Deep-Drilling Performance: Benchmark Testing Drives ROP Improvements for Bits and Drilling Fluids". University of Utah

35. KARA Mohammed (1992) "Dédution de la caractéristique énergétique du concasseur type a marteaux cimenterie AIN-TOTA ". thèse Magister option électromécanique minière centre universitaire Tébessa Algérie.
36. KHALED Rais (2013) "Optimisation du régime de fonctionnement des machines de forage dans le cas de la mine de djebel-el-onk «. thèse magister université de Tébessa. Diriger par Dr. KARA Mohammed Tébessa Algérie.
37. Khaled RAIS (2017), Mohammed KARA, Larbi GADRI, Riheb HADJI, Lakhdar KHOCHMAN " Original approach for the drilling process op-timization in open cast mines; case study of kefessenoun open pit mine northeast of algeria" Mining Science, vol. 24, 2017, 147–159
38. Khochman Lakhdar, Fatima Zohra, KEZZAR Mohamed. (2016)" Application de la méthode de Taguchi pour l'étude de l'influence des paramètres de réglage sur l'efficacité de fonctionnement d'une machine de forage" applied energetics and pollutant Constantine Algeria.
39. KARA Mohammed(2007) "Optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans les éléments du système d'alimentation "thèse doctorat option électromécanique université d'Annaba Algérie.
40. M. G. Bingham (1965) "A New Approach to Interpreting Rock Drillability", Petroleum Publishing Company USA,
41. Maurice Pillet(2013) " six sigma comment l'appliquer ". Eyrolles (2e édition)
42. Mitsubishi (2016) "Rock tools—RT01B, Mitsubishi Materials Corporation". <http://mrt.mitsubishicarbide.com>. Accessed 14 Apr 2016
43. Montgomery D.C., (1991). "Design and analysis of experiments", John Wiley and Sons, NewYork
44. Montgomery, D.C. and Runger G.C (2003) "Applied Statistics and Probability for Engineers ". 3rd ed. New York : John Wiley & Sons.
45. Nelson EP (2006) " Drill hole design for dilatational ore shoot targets in fault fill veins. Econ Geol".
46. Note technique n° 2 novembre (1995) " Les techniques de forage utilisées en eau minérale ".
47. P. R. Johann, A. F. Martini, A. Maul, and J. P. P. Nunes (2012) "Reservoir geophysics in Brazilian pre-salt oilfields" 12th International Congress. Brazil.
48. Phillip J. Ross (1996) Taguchi Techniques for Quality Engineering 2 edition McGraw Hill Professional. USA
49. Pillet (1994) " optimisation de la maîtrisé statistique des procédés par une méthode de filtrage d'ordre". [ttp://www.numdam.org/item?id=RSA_1996__44_2_61_0](http://www.numdam.org/item?id=RSA_1996__44_2_61_0)
50. PILLET Maurice(1992) "Introduction aux Plans d'expériences par la méthode Taguchi", Les Editions d'organisation. Paris SAS Institute, 2007.

51. Puhakka T (1997) " Underground drilling and loading handbook". Tamrock Editor
52. R. A. Cunningham (1960) "Laboratory Studies of the Effect of Rotary Speed on Rock-bit Performance and Drilling Cost", American Petroleum Institute,
53. R. A. Cunningham 1960, " Laboratory Studies of the Effect of Rotary Speed on Rock-bit Performance and Drilling Cost"., American Petroleum Institute.
54. R. K. Bratli (1997), G. Hareland, F. Stene, G. W. Dunsaed, and G. Gjelstad, "Drilling optimization software verified in the North Sea," in Proceedings of the SPE LACPEC Conference, Paper SPE 39007, Rio de Janeiro, Brazil, September 1997.
55. R. E. Goodman (1989) " Introduction to Rock Mechanics" .second edition John Wiley and Sons New York USA.
56. R. Feenstra, (1989) " Status of Polycrystalline Diamond-Compact Bits" PDC (polycrystalline Diamond Compact) Bit Research at Sandia National Laboratories Sandia National Laboratories, United States. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information Publisher Sandia National Laboratories., 1989
57. R. Lauga (1990) " Pratique du forage d'eau " Edition Seesam.
58. R. Teale (1965), "The concept of Specific Energy in Rock Drilling". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, vol. 2, pp. 57-73, 1965.
59. Rampersad, P.R., Hareland, G. and Pairintra, T (1993) " Drilling Optimization of an Oil or Gas Field ". Society of petroleum engineers, N°: 26949.
60. Rao, R. S., Kumar, C. G., Prakasham, R. S., & Hobbs, P. J. (2008). "The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications".
61. Rao, U. M. and Mishra, B., 1998; "Principles of Rock Drilling", A. A. Balkema Publishers.
62. Rehm, W.A. and McClendon, M.T., (1971). " Measurement of formation pressure from drilling data". SPE 3601. New Orleans: SPE Annual Fall Meeting.
63. Roger Marjoribanks (2010) " geological methods and mineral exploration and mining. Second edition Chapman and Hall USA.
64. S. Irwan (2012) and Keith R. Heldawey (2014) , "Harness oil and gas big data with analytics" Wiley USA.
65. SOMOPHOS Djebel-Onk Tébessa Algérie (2016) , (2017). "Rapport des travaux d'abattage annuel".
66. STEPHANE Vivier (2002) " Stratégies d'optimisation par la méthode des Plans d'Expériences, et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par Eléments Finis ". Thèse doctorat.

67. T. Bourgoyne (1986) " Applied Drilling Engineering Handbook", vol. 2, Society of Petroleum Engineers (SPE), Richardson, Tex, USA,
68. T. Bourgoyne, K. K. Millheim, M. E. Chenevert, and F. S. Young1986 " Applied Drilling Engineering". vol. 2 of SPE Textbook Series,
69. T. Eren (2015) " Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations " ,[Ph.D. thesis].
70. T. M. Warren (1981) " Drilling model for soft-formation bits ", Journal of Petroleum Technology, vol. 33, no. 6,. View at Publisher · View at Google Scholar.
71. T. M. Warren and M. B. Smith(1985) "Bottomhole Stress Factors Affecting Drilling Rate at Depth". willy USA.
72. Vivek K Prajapati, B. Tech " Modeling of Rock Failure Under PDC Cutter Based on Lab Experiments". willy USA.
73. W. C. Maurer, W.C., 1965, " Bit-Tooth Penetration under Simulated Borehole Conditions", SPE Annual Fall Meeting, Denver Colorado, Oct. 3-6, 1965.
74. W. C. Maurer1962, "The ‘Perfect—cleaning’ theory of rotary drilling ". Journal of Petroleum Technology, vol. 14, no. 11.
75. Waisberg, "Brazil’s Presalt Layer," University of Stanford, (2015), <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/waisberg1/>.
76. X. Wei, et al. (2003) "Study of Fracture Mechanism of Rock Cutting," Machining of Natural Stone Materials. willy USA.
77. Xiaohe X, Jing Y (1984) " Theory of rock breakage". Coal Industry Press (in Chinese).
78. J.J DROESBEKE, J. Fine (2000) "Plan d’expériences application à l’Enterprise "Edition TECHNIP Paris.

Annexes

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

\

Tableau 11 : valeurs des variables statistiques traitées dans les conditions 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
Σ		-	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
Σ		-	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
Σ		-	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
Σ		-	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
Σ		-	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
Σ		-	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
Σ		-	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

Received June 17, 2017; reviewed; accepted September 8, 2017

ORIGINAL APPROACH FOR THE DRILLING PROCESS OPTIMIZATION IN OPEN CAST MINES; CASE STUDY OF KEF ESSENOUN OPEN PIT MINE NORTHEAST OF ALGERIA

Khaled RAIS¹, Mohammed KARA², Larbi GADRI²,
Riheb HADJI^{3*}, Lakhdar KHOCHMAN¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, University of Skikda, Algeria.

² Department of Mining Engineering, Mines Laboratory, Tebessa University, 12002, Algeria.

³ Department of Earth Sciences, Institute of Architecture and Earth Sciences, Setif University, Algeria.

Abstract: The drill ability is a fundamental factor for bit penetration rate (PR) in mining engineering. The ability to predict the performance of rock drills is important for drilling operations. Not a single parameter defines the drill ability of a rock. For this task, a considerable amount of fieldwork must be done to provide the necessary data i.e.: rock properties and drilling technologies. The main purpose of this research is to conduct an experimental study under varying rotation and pressures on the drilling bit for different geological formations.

This paper presents a statistical analysis of process parameters of drilling in a phosphate mine in Jebel Onk, Tebessa, Algeria. Settings drilling parameters were determined by applying the design of experiments method. The level of importance of drilling parameters is determined by using analysis of variances. First, the teamwork determined the mathematical model for representative conditions of the phosphate mine of Jebel Onk. This mathematical model is a vital mathematical requirement for the operation engineers to deduce and determine the penetration rate according to the demands of work and to maximize the efficiency of the drilling machine and to minimize the bit wear in the abrasive layer.

Keywords: *statistical analysis, variance, design of experimental, Taguchi method, Phosphate mine.*

INTRODUCTION

Drill ability is a term used to describe the influence of a number of parameters on the drilling rate and the bit wear of the drilling machine (Thuro, 1997). Penetration

* Corresponding authors: hadjirihab@gmail.com (R. HADJI)

rate is the progression of the drilling bit into the rock in a specific period, expressed as m/min. According to the influential factors, penetration rate can be categorized as changeable and unchangeable factors (El Kacimi et al. 2017). A number of geoscientist have studied the relation between the penetration rate and the rock properties: Protodyakonov (1962) who developed drop tests and described the coefficient of rock strength (CRS) used as a measure of the resistance of rock by impact. Tandanand and Unger (1975), and Rabia and Brook (1981) then modified the Protodyakonov test. Paone et al. (1966), conducted research work on percussion drilling studies in the field. They concluded that the uni-axial compressive strength (UCS), tensile strength, shore hardness and static Young's modulus are correlated tolerably well with penetration rates of percussive drills in the mine- hard- abrasive rocks. Kahraman and Mülazimoğlu, (Bilim, 2011) developed penetration rate models for rotary, down the hole and hydraulic top hammer drills using multiple curvilinear regression analysis. Besides, for rotary drills uniaxial compressive strength, for drills Schmidt hammer-rebound number and for hydraulic top hammer drills. The geological parameters will basically influence the drilling performance and the bit wear. The others such as machine and operating parameters can be variable and controllable. However, rock properties and geological conditions are uncontrollable parameters (Besteet al. 2007; Zahri et al. 2016). The strength characteristics of rocks have been used as drill ability criteria for a long time. Recent studies have shown that using strength features alone can be misleading. It is necessary that pressure, torque, rotation speed and impact frequency are applied as operational parameters according to the formation characteristics (Bilgin and Shahriar, 1986). The penetration rate increases with the thrust until a peak penetration rate value is reached. At the low thrust, the bit will not be in constant contact with the fresh rock surface at the bottom of the hole. An insufficient thrust results in lower penetration rates (Altındağ, 2003). The main objective of this study is to present a systematic relation between the PR and the rock properties in drilling blast holes, thus Kef Essenoun open cast mine is selected as a case study to optimize the process of blast holes drilling. The research passes through four steps: First step consists on the development of tests on the drilling machine in the different layers of geological formations; followed by data collection; then a statistical analysis of the data obtained is done; to achieve by a development of a representative mathematical model. The results expected from this work constitute an important mathematical tool for operation engineers to estimate the penetration rate according to the requirements of work, to maximize the efficiency of the drilling machine in, and to minimize the bit wear in the abrasive layer as well.

GENERAL SETTINGS

GEOGRAPHICAL BACKGROUND

Kef Essenoun phosphate mine is located on the southern flank of Jebel Onk Cretaceous anticline (34.726784 E, 7.895978 N). It is about 7 Km in the southeast of Bir el Ater city in the South of Tebessa province, and about 21 Km to the Algerian-Tunisian border (Fig. 1).

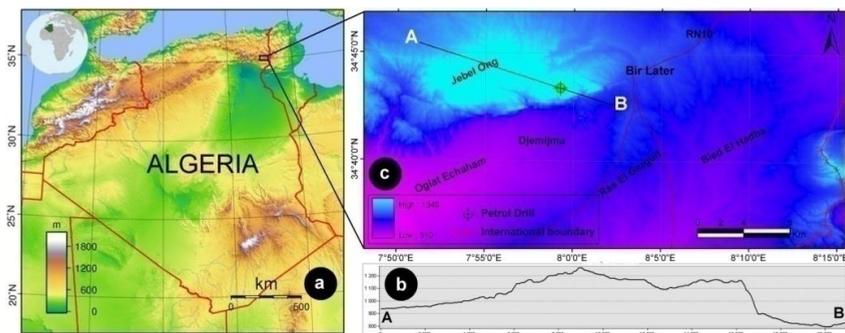


Fig. 1. Geographic location of the study area, b: Topography (DEM) of the study area; c: topographic cross section in the study area

GEOLOGICAL CONDITIONS

The study site has an area of approximately 250 km² and belongs to the same mining basin rather than Metlaoui phosphate mine (SW Tunisia) (Mokadem et al. 2016). This mining site has been in operating for 40 years (with about 20–30% of P₂O₅ and 2–3.1% of MgO). It contains approximately the half of Algerian phosphate reserves estimated at two billion tons (Fredj et al. 2017). The mine of Jebel Onk aspires to be an economic hub and a center of development, exploitation, and transformation of phosphate (Panda et al.2016). The complexity of the structural directions that characterizes the study region is referred to two major compressive deformation phases: a post Eocene Atlases phase marked by (NW–SE) faults system and a post sub meridian tightening phase. The structural inversion and the quasi-vertical, relief of the southern edge of Jebel Onk area, reflect a sub-meridian tightening conditioned by a deep accident of the base (Gadri, et al. 2015) (Fig. 2).

The pit is excavated as benches with slope angles of 75° to 85°, 30 m in height, and 10 m in width. The depth of the base of the mine is 70 m. The thickness of the phosphate layer is about 50 m; the barren covering consists of a series of Ypersian dolomite limestone with silex, locally overcome with Lutetium limestone, Miocene sands, and Quaternary alluvium. The total thickness of covering varies from 40 to 198 m, indicating a ratio of 1.3 to 6 (Fig. 3), (Youbai, 2004; Hadji et al. 2013; 2017).

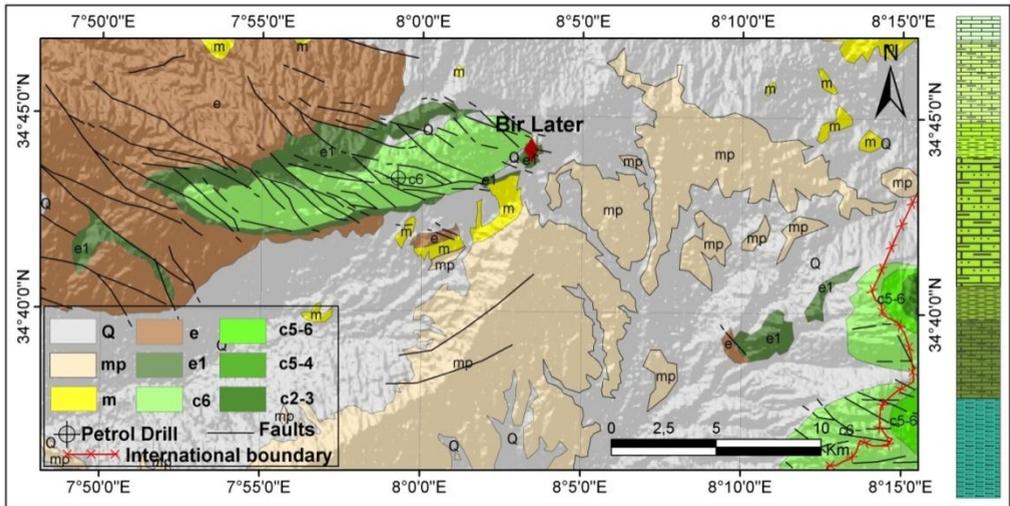


Fig. 2. Structural schema of the study region and its stratigraphic column. (Legend: Q = Quaternary; mp = Upper Miocene-Pliocene; m = Lower Miocene; e = Eocene with limestone and gypsum; e¹ = Upper Maestrichtian-Medium Paleocene; C⁶ = Calcarous Maestrichtian; C⁵⁻⁶ = Upper Campanian – Lower Maestrichtian; C⁵⁻⁴ = Santonian-Lower to Middle Campanian; C²⁻³ = Turonian-Coniacian)



Fig. 3. Lithological formations of Kef Essenoun Quarry

DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)

The Optimization process has several control factors that directly decide the target or the desired value of the output. This involves determining the best control factor levels for the output either at the target value. Such is called "static problem".

The adopted statistical approach called Taguchi method was largely applied to engineering (Rosa et al. 2009), biotechnology (Rao et al. 2008), and industry (Karna et al. 2012). Our study uses it to describe the variation of the response function by a polynomial model. The controlled factors are determined by varying the push pressure PP (bar) and rotation pressure RP(bar), the penetration rate PR (m/min) in different layers. For this task we have made 80 blast holes in the different layers.

MATHEMATICAL MODELING

The Taguchi matrix reduces the number of experimental configurations to be studied by Montgomery (1991). The effect of many different parameters on the performance characteristic in a process can be examined by using the orthogonal array experimental design proposed by Taguchi (Fraleley et al. 2006). Once the parameters affecting a process that can be controlled have been determined, the levels at which these parameters should be varied must be determined. Determining what levels of variable to test requires an in-depth understanding of the process, including the minimum, maximum, and current value of the parameter. If the difference between the min and max value of a parameter is large, the values being tested can be further apart or more values can be tested. If the range of a parameter is small, then less value can be tested or the values tested can be closer together. The method of experimental design is simply explained in the flow diagram in figure 4.

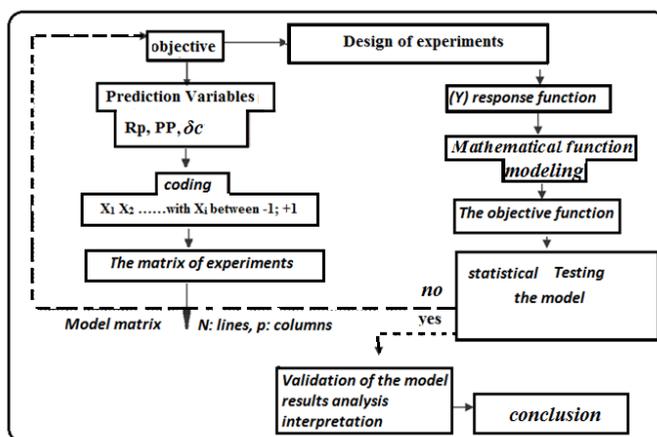


Fig. 4. Methodology of experimental design

LABORATORY TESTING AND IN SITU INVESTIGATIONS

Compressive strength is one of the most important mechanical properties of rock material used in drilling blast-holes. Compression testing machine (Controls device), (Fig. 5) was used to measure the universal compressive strength. In the phosphate open cast mine of jebel-Onk a lot of geological formations in work area. In different layers the drilling performance is taken as penetration rate of a blast hole. In each blast hole drillings, the net drilling time and penetration depth are reported. The penetration depth values are taken from digital panels of the drilling machine. Then, the penetration rates are calculated by using Eq.(1).

$$PR = \frac{H}{t} = \frac{\text{Blasthole Depth}}{\text{Net Drilling Time}} \quad (m/min) \quad (1)$$

An Atlas- Copco ROC-L8 drilling machine was used during the drilling tests in the field. It was equipped by button bit with 160 mm diameter and drill tubes with an outer diameter of 70 mm. The drilling parameters of the machine were kept constant during drilling process. The depth of hole was collected from the machine digital indicator panel. The net drilling time was measured by using a chronometer. The drilling parameters of ATLAS-COPCO Rock L8 machine which we have taking in our studies the PP (30-110bar) and the rotation pressure RP(30-70 bar). The penetration rate was correlated with other parameters by using a method of least square regression R^2 . The equation of the best-fit line and the correlation coefficient (r) were determined for each regression. A meaningful correlation between PR, PP and RP from the graphs was evident; it could be clearly observed that the increasing push pressure increases penetration rate. The results are summarised in table 01.

Nb: There is a correlation between PR and the drilling machine parameters in all layers except in the siliceous phosphate limestone layer by the presence of silex bolls.

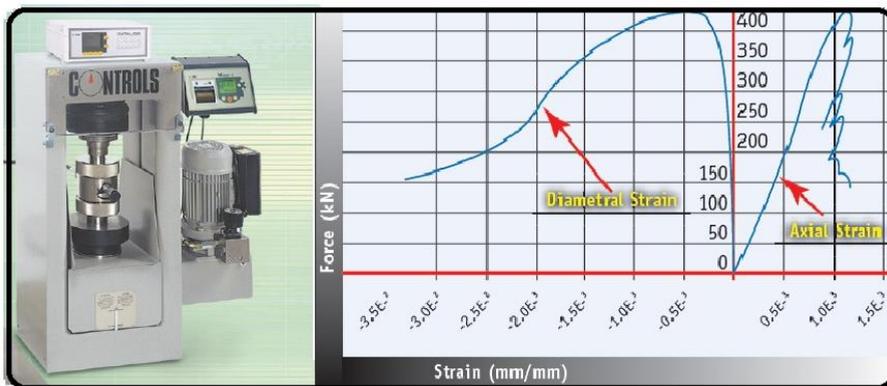
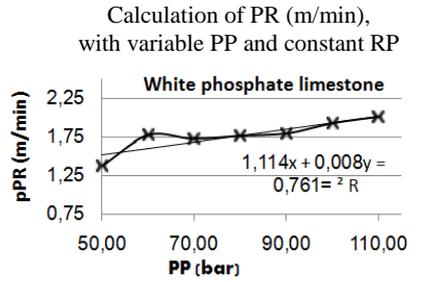
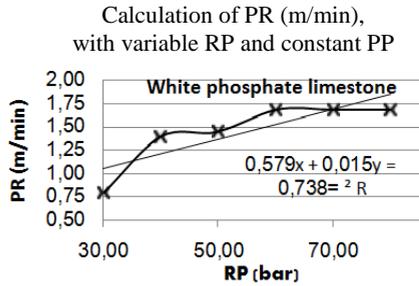


Fig. 5. The compression testing machine used for the study

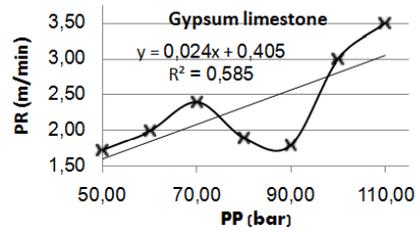
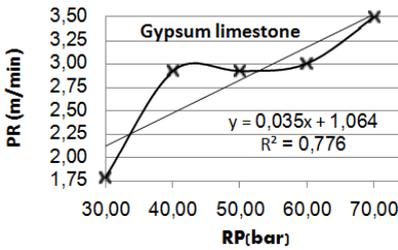
Tab. 1. Laboratory and *in situ* tests (calculation of PR according to RP and PP of all studied layers)

σ_c
Mpa

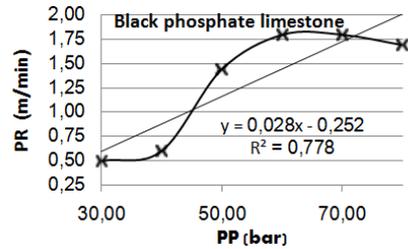
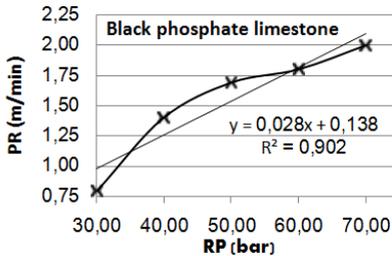
17



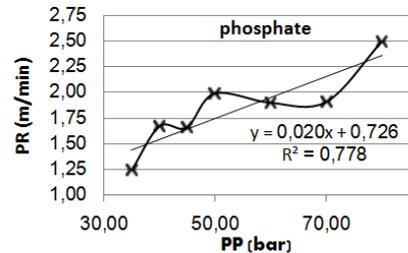
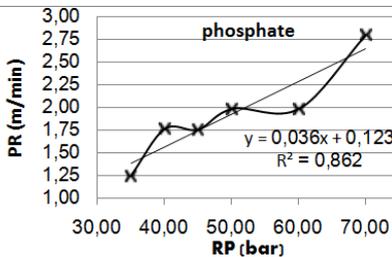
10



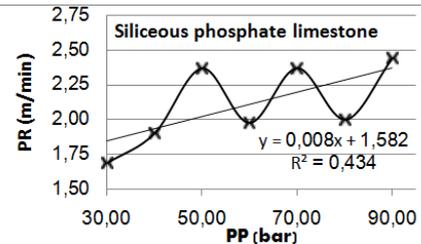
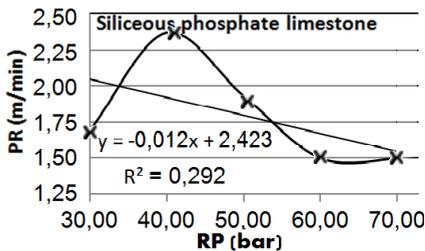
20



30



60



MODELING USING THE EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

The table (2) sum up all the tests. it consist of several columns the first identifies the tests . The following states indicate the states of the factors expressed in coded units whatever the factors replace natural variables with variable codes will make it possible to have for each factor the same rang of variation between +1 , -1.

Each column being representative of a factor the last column shows the answers obtained for each test the blower lines recall the values of the level in natural units.

Tab. 2. Planification matrix (matrix of experiment of Taguchi)

N	X ₀	Factors			Interactions				response Y	bi
		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
Level-1		30 bars	30 bars	10 MPa						
Level+1		70 bars	110 bars	60 Mpa						

MATHEMATICAL FUNCTION

$$y_{mod} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Objective function:

The response is well modeled by a linear function of the independent variables the expression of a polynomial model describing the variations of the response.

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56 \cdot x_1 + 0.665 \cdot x_2 - 0.31 \cdot x_3 - 0.14 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.165 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.11 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.035 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

5STATISTICAL ANALYSIS OF THE MODEL

MODEL VALIDATION

STUDENT TEST

Student's t-test is a set of parametric hypothesis tests where the calculated statistic follows a Student's law when the null hypothesis is true. A t-test can be used in particular to statistically test the hypothesis of equality of two averages (Tab. 3).

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{s_{bi}} > t_{t(q,f)} \quad (2)$$

It is necessary that the condition of student is satisfied for all coefficients of the model to be significant

$$t_{bi} > t_{(q,f)} \quad (3)$$

$t_{(q,f)}$: Value taken from the student table.

t_{bi} : Ratio between model coefficients and the dispersion of the model coefficients

$q = 0.05\%$;

f : Degree of freedom.

Tab. 3. T-testof all confessants of the model

Variables	effect	$t_{bi} \quad t_{(q,f)}$	Result
 	$b_0=1.865$	$36.5981771 > 2.08$	Significant
X_1	$b_1=0.56$	$10.989265 > 2.08$	Significant
X_2	$b_2=0.665$	$13.0497522 > 2.08$	Significant
X_3	$B_3 = 0.31$	$6.08334311 > 2.08$	Significant
X_1X_2	$b_4 = 0.14$	$2.74731624 > 2.08$	Significant
X_2X_3	$b_5 = 0.165$	$3.23790843 > 2.08$	Significant
X_1X_3	$b_6 = 0.11$	$2.15860562 > 2.08$	Significant
$X_1X_2X_3$	$b_7 = 0.035$	$0.68682906 < 2.08$	Not significant

The mathematical model satisfied the T-test and all coefficients b_i are significant except b_7 witch is rejected from the mathematical model. The objective function in Jebel Onk mine conditions is as follows:

$$y_{\text{mod}} = 1.865 + 0.56 \cdot x_1 + 0.665 \cdot x_2 - 0.31 \cdot x_3 - 0.14 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.165 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.11 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.035 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4)$$

FISHER TEST

The Fisher test helps us to find a relationship between the variation of the factors and the answers in the established model. So that the model is validated and the Fisher condition is confirmed.

$$F_{\text{obs}} < F_{\text{tab}} \quad (5)$$

$F_{\text{obs}} = 2.2$: Value calculated

$F_{\text{tab}} = 2.27$: Value taken from the fisher tableat $q = 0.05\%$

STANDARDIZATION OF VARIABLES

The use of reduced centered variables has the advantage of being able to generalize the theory of experimental design (Tab. 4).

Tab. 4. Replacement of the values coded by physical values

Coded Variables			Physical variables			reduced centered variables
Coded parameters	Min	Max	Physical parameters	Min (bar)	Max (bar)	$X_i = \frac{X_i - 0.5(X_{imax} + X_{imin})}{0.5(X_{imax} - X_{imin})}$
						X_1
X_2	-1	+1	PP	30	110	$\frac{X_2 - 70}{40}$
X_3	-1	+1	σc	10	60	$\frac{X_3 - 35}{25}$

Coded formula (mathematical model):

$$y_{mod} = 1.865 + 0.56X_1 + 0.665X_2 - 0.31X_3 - 0.14X_1X_2 - 0.165X_1X_3 - 0.11X_2X_3 \quad (6)$$

Replacing the variables coded by the reduced centered variables in the model formula.

Normalized formula (physical model):

$$PR = 1.865 + 0.56 \left(\frac{1}{20} RP - 2.5 \right) + 0.665 \left(\frac{1}{40} PP - 1.75 \right) - 0.31 \left(\frac{1}{25} \partial c - 1.4 \right) - 0.14 \left(\frac{1}{20} RP - 2.5 \right) \left(\frac{1}{40} PP - 1.75 \right) - 0.165 \left(\frac{1}{20} RP - 2.5 \right) \left(\frac{1}{25} \partial c - 1.4 \right) \text{ (m/min)} \quad (7)$$

$$PR = -1.72425 + 0.05180 \times RP + 0.029225 \times PP + 0.01180 \times \sigma c - 0.000175 \times RP \times PP - 0.00033 \times PP \times \sigma c - 0.00011 \times RP \times \sigma c \text{ (m/min)} \quad (8)$$

The equation (8) constitutes the main outcome of our study. The model satisfied the necessary statistical validation tests and can be used as a useful tool in the same conditions to predict the penetration rate. The necessity of optimizing time, costs and workmanship makes this design method an effective tool to implement experiments.

VERIFICATION

The series of tests used to evaluate the proposed model, between the experimental results and the theoretical predictions. The residuals obtained by differentiating between the calculated and the measured value. If the residue is less than 30% the physical model is admissible (Seibi 2001). In our case residual is less than 6% so the model

is a representative of Jebel Onk mine conditions except the siliceous phosphate limestone layer. Due to the random presence of the silex balls with great rigidity.

We return to the skill and experience of the operator in changing the appropriate Operating mode of the drilling machine according to needs of the work and the safety of the machine. We propose that this matter be the subject of future studies.

CONCLUSION RECOMMENDATIONS AND PERSPECTIVES

This study presents a statistical analysis of the parameters of the drilling process in Jebel Onk phosphate mine. The teamwork conducted experimental studies applying varying rotational pressure and push pressure upon the drilling bit in different geological formation. Drilling parameter settings were determined using the method of design of experiments. The level of importance of the drilling parameters was determined using the analysis of the variance. Accordingly, the research team determined a representative mathematical model conditions for Jebel Onk field. This representative model is a necessary mathematical tool for operational engineers to predict the penetration rate. In addition, to adjust it according to the needs of the work to maximize the performance of the drilling machine, and to minimize the wear of the drilling tool by the employment of a suitable regime in the abrasive layer as well.

The Student test showed that all factor coefficients are significant with the exception of the interaction coefficient of the three factors together ($X_1X_2X_3$).

The final significant model is:

$$PR = -1.72425 + 0.05180 \times RP + 0.029225 \times PP + 0.01180 \times \sigma c \\ - 0.000175 \times RP \times PP - 0.00033 \times PP \times \sigma c - 0.00011 \times RP \times \sigma c \quad (\text{m/min})$$

The residual variance and the repeat variance are 0.13836 and 0.06232 respectively.

The Fischer test $F = 2.22$. The representativeness of the model is clearly satisfactory.

This work allowed the researchers to propose an acceptable and applicable a physical model in the conditions of Jebel Onk phosphate mine.

The prospects of this work indicate the demands to adopt a model with a polynomial tendency instead of a model with linear tendency and to associate numerical modeling

ACKNOWLEDGMENT

Authors gratefully acknowledges Mines Laboratory, Tebessa University for providing logistics framework. Mr. Aouich B. (Kef essnoun Unity) for his help. They are deeply grateful to the anonymous reviewers for their careful review, contributions and critics that led to the improvement of the manuscript.

Without forgetting the staff of the International Association of Water Resources in the Southern Mediterranean Basin (Tunisia).

REFERENCES

- Altındağ, R., (2003). *Estimation of penetration rate in percussive drilling by means of coarseness index and mean particle size*. Rock Mech Rock Eng, 36(4), 323-332.
- Beste U, Jacobson S, Hogmark S., (2007). Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling. Wear, 264: 1142- 1151.
- Bilgin N, Shahriar K., (1986). *Evaluation of indirect methods used in determination of some mechanical properties of rocks and coal seams*. First National Rock Mechanics Congress Oct. 1986. Ankara, Turkey, pp. 86-97 (In Turkish).
- Bilim, N., (2011). *Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties*. Sci. Res. Essays, 6(2), 382-387.
- El Kacimi, Y., Azaroual, M. A., Tourir, R., Galai, M., Alaoui, K., Sfaira, M., ... & Kaya, S. (2017). *Corrosion inhibition studies for mild steel in 5.0 M HCl by substituted phenyltetrazole*. Euro-Mediterr J Environ Integr , 2(1), 1.
- Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Date, J. Z., (2006). *Design of experiments via Taguchi methods: orthogonal arrays*. The Michigan chemical process dynamic and controls open text book, USA, 2(3), 4.
- Fredj, M., Hafsaoui, A., Khadri, Y., Riadh, B., Nakache, R., Saadoun, A., & Menacer, K. (2017, July). *Study of Bench Stability in the Phosphate Mine (Algeria)*. In International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" (pp. 101-114). Springer, Cham.
- Gadri, L., Hadji, R., Zahri, F., Benghazi, Z., Boumezbeur, A., Laid, B. M., & Raïs, K., (2015). *The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria*. Arab J Geosci, 8(11), 8987-8997.
- Hadji, R., errahmane Boumazbeur, A., Limani, Y., Baghem, M., el Madjid Chouabi, A., & Demdoum, A., (2013). *Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria*. Quatern Int, 302, 224-237.
- Hadji, R., Rais, K., Gadri, L., Chouabi, A., & Hamed, Y., (2017). *Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria*. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(1), 281-300.
- Karna, S, Singh, D, Sahai, D., (2012). *Application of Taguchi method in indian industry*. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2(11), 387-391.
- Mokadem, N., Demdoum, A., Hamed, Y., Bouri, S., Hadji, R., Boyce, A., ... & Sâad, A., (2016). *Hydrogeochemical and stable isotope data of groundwater of a multi-aquifer system: Northern Gafsa basin–Central Tunisia*. J Afr Earth Sci, 114, 174-191.
- Montgomery D.C., 1991. Design and analysis of experiments, John Wiley and Sons, NewYork
- Panda, S., Mishra, S., & Akcil, A., (2016). *Bioremediation of acidic mine effluents and the role of sulfidogenic biosystems: a mini-review*. Euro-Mediterr J Environ Integr , 1(1), 8.
- Paone J, Madson D (1966). *Drillability Studies: Impregnated Diamond Bits*. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 6776, p.16.
- Protodyakonov M.M., (1962). *Mechanical properties and drillability of rocks. I: Proceedings of 5th Symposium on Rock Mechanics*. Univ. Minnesota. Minnesota University, pp. 103-118.

- Rabia H., Brook N., 1981. *The effects of apparatus size and surface area of charge on the impact strength of rock*. Int J Rock Mech Min Sci , 18:211-219.
- Rao, R. S., Kumar, C. G., Prakasham, R. S., & Hobbs, P. J. (2008). *The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: a critical appraisal*. Biotechnology journal, 3(4), 510-523.
- Rosa, J. L., Robin, A., Silva, M. B., Baldan, C. A., & Peres, M. P. (2009). *Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach*. Journal of Materials Processing Technology, 209(3), 1181-1188.
- Seibi, A.C., (2001). *Running force in medium to high-curvature wellbores: An experimental study and numerical simulation of laboratory and field cases*. Transactions-american society of mechanical engineers journal of energy resources technology, 123(2), 133-137.
- Tandanand S, Unger H.F., (1975). *Drillability determination - A drillability index of percussive drills*. USBM RI 8073.
- Thuro, K., (1997). *Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunneling*. GeolRundsch, 86(2), 426-438.
- Youbai, X., (2004). *Study on the modern design theory and methodology*. Chin. J. Mech. Eng., 40(4), 1-9.
- Zahri, F., Boukelloul, M. L., Hadji, R., & Talhi, K., (2016). *Slope stability analysis in open pit mines of Jebel Gustar career, NE Algeria, multisteps approach*. Mining Science, 23, 137-146.

Résumé

Prédire le taux de pénétration de l'outil de forage dans la roche est d'une importance capitale pour l'ingénieur exploitant. Il n'existe pas de modèle universel qui peut définir le taux de pénétration de l'outil de forage dans la roche. Les paramètres qui influent sur ce dernier sont mal connus, il est pratiquement très difficile de prédire exactement leurs nombre. Pour cette raison, une quantité considérable d'essais sur terrain doit être faite pour fournir les données nécessaires, à savoir les propriétés des roches et les techniques de forage utilisées. Le but principal de cette recherche est de réaliser une étude expérimentale basée sur la variation des paramètres de la machine de forage (pression de rotation, pression de poussée et d'air comprimé) sur différentes formations géologiques, afin de trouver un modèle mathématique qui relie ces différents paramètres d'études.

Une approche par méthode d'optimisation indirecte (méthode des plans d'expériences) sera appliquée dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk, Tébessa Algérie.

Mots-clés: Optimisation ; Forage ; Modélisation ; Plans d'expériences ; Variance.

Abstract

Predicting the penetration rate of the drilling bit in the rock is very important for the operator engineer. There is no universal model that can define the rate of penetration of the drilling bit into the rock. The parameters that affect the penetration rate are poorly known, it is very difficult to predict exactly their number. For this reason, a considerable amount of field testing must be done to provide the necessary data, namely the properties of the rocks and the drilling techniques used.

The main goal of this research is to carry out an experimental study based on the variation of the parameters of the drilling machine (rotational pressure, push pressure and compressed air) on different geological formations, in order to find a mathematical model that relieve the relationship between different study parameters.

An indirect optimization approach (design of experiments) has been applied in the conditions of the phosphate quarry of Jebel-Onk, Tebessa Algeria.

Keywords: Optimization Fodder; Modeling Plans of experiences; Variance.