

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 août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département: Génie mécanique
Réf : D012119012D

جامعة 20 أوت 1955
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية



Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat

Spécialité: Electromécanique

Option: Mécanisation industrielle

**Evaluation économique de l'influence des paramètres principaux sur
l'efficacité de fonctionnement des machines de forage**

Soutenue le : 22/07/2019

Présentée par :

M^{me} Fatima Zohra DERDOUR

Présenté devant le jury composé de :

Dr.Fouad INEL	Président	MCA à université 20 août 1955-Skikda
Pr.Abderrazak LACHOURI	Rapporteur	Professeur à université 20 août 1955-Skikda
Pr.Azzedine BOUZAOUIT	Rapporteur	Professeur à université 20 août 1955-Skikda
Pr.Abdelouahab BENRETEM	Examineur	Professeur à université Badji Mokhtar-Annaba
Pr.Tahar BAHI	Examineur	Professeur à université Badji Mokhtar-Annaba
Dr.Mohamed KEZZAR	Invité	MCA à université 20 août 1955-Skikda

Année universitaire **2018/2019**

Pensée

J'aimerais exprimer ici ma tristesse à la disparition de

M.Pr.Lakhder KHOCHEMANE.

C'est un bon homme qui nous a quitté et que je n'oublierai

jamais ce qu'il a fait pour moi.

Toutes mes condoléances à sa famille et ses proches,

Puisse Dieu le tout puissant, accueillir le défunt en son vaste

paradis.

A Dieu nous appartenons et à Dieu nous retournerons.

Dédicaces

*A ceux qui ont un cœur plein de tendresse et d'amour, à mes chers
parents.*

*A mon cher époux **Abdelkarim** pour son soutien et sa bonne
compréhension.*

A mes chers enfants :

Alaà, Bahaà Eddine et Israà

A mes adorables sœurs :

Karima et Noudjoud .

*A mon neveu **Mohamed Louai.***

A tous mes amis.

*A la mémoire de monsieur **Pr.KHOCHEMANE Lakhdar**, qui m'a été
un grand soutien jusqu'à son décès.*

Je dédie cette modeste thèse.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de la carrière de Hadjar-Soud de Skikda.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à monsieur feu **KHOCHEMANE Lakhdar** (Puisse Allah lui accorde sa miséricorde), mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses nombreux encouragements, et pour toute la confiance qu'il m'a accordée durant mon travail. Ses compétences et ses conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever mon travail.

Sur le plan expérimental, un grand merci est adressé à monsieur **KEZZAR Mohamed**, maître de conférence A à l'université de Skikda pour sa proposition afin de résoudre mon problème d'optimisation et que j'ai pu exploiter pour réussir ma thèse. Il m'a témoigné sa passion de recherche et m'a encouragé à avancer afin de finir ma thèse.

Mes plus vifs remerciements sont également adressés à monsieur **SARI Mohamed Rafik**, professeur à l'université d'Annaba, et l'enseignante madame **BOUZIOUKH Fella** pour leurs aides.

J'adresse mes chaleureux remerciements à monsieur **KHAROUAA Faouzi** directeur de la carrière de Hadjer Soud pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son équipe durant mon stage, et pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier aussi tous l'équipe de la carrière de Hadjer Soud.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux à monsieur **INEL Fouad**, maître de conférence A à l'université de Skikda, qui m'a fait l'honneur de d'accepter de présider mon jury de thèse. Je tiens à remercier également tous les membres de jury monsieur **BENRETEM Abdelouahab**, professeur à l'université Badji Mokhtar de Annaba, monsieur **BAHI Tahar**, professeur à l'université Badji Mokhtar-Annaba, monsieur **LACHOURI Abderrazak**, professeur à l'université de Skikda, monsieur **BOUZAOUIT Azzedine** professeur à l'université de Skikda pour avoir acceptés d'être examinateurs et pour l'honneur qu'ils me font en participant à ce jury.

مُلخَص

تكنولوجيا الحفر ضرورية في صناعة التنجيم في الجزائر تحقيقاً لهذه الغاية ، سيكون من الضروري القول إن تحسين معايير الحفر جزء لا يتجزأ من النجاح الاقتصادي أو فشل أي عملية تنجيم . ان التنبؤ بمعدل الاختراق يعتبر ضروريًا لنظام تشغيل عقلائي وهو أحد أهم العوامل في تخطيط الحفر وتقدير التكلفة. في هذا المنظور، ستركز الأعمال البحثية التي تتناول موضوع أطروحة الدكتوراه على تحسين الحفر طريقي- دوار ودراسة تأثير المعلمات الرئيسية على كفاءة التشغيل لآلات الحفر. تنظيم تنفيذ هذا العمل البحثي تم وفقًا للخطوات التالية: الخطوة الأولى تتضمن فحص المعلمات التي يمكن التحكم فيها والتي لا يمكن التحكم فيها والتي لها تأثير على معدل الاختراق في عملية الحفر. الخطوة الثانية تحديد نظام التشغيل العقلاني لآلة حفر طريقي- دوار. معلمات الضبط لآلة الحفر هي: القوة المحورية، ضغط الهواء المضغوط للمطرقة، سرعة دوران سلسلة الحفر. كما تم استخدام مستوى تاجوشي المتعامد ، نسبة الإشارة للضوضاء [S/B] ، تحليل التباين لباريتو (Anova Pareto) بالإضافة إلى تحليل الانحدار و ذلك لدراسة تأثير هذه العوامل على سرعة اختراق أداة الحفر في الصخر. تم إجراء سلسلة من التجارب على أساس شبكة متعامدة (L27) و النتائج تم تحليلها باستخدام البرنامج الإحصائي (Minitab 16). والخطوة الثالثة هي نمذجة سرعة الاختراق باستخدام منهجية سطح الاستجابة (MSR) ، مع الأخذ في الاعتبار معلمات الحفر الطريقي الدوار مثل ضغط الهواء وسرعة الدوران ، ضغط الدفع وكذلك قطر الأداة. في هذا السياق ، يستخدم تحليل التباين (ANOVA) لتقييم تأثير عوامل التحكم على الاستجابة. وأجريت التجارب على أساس تصميم تجريبي مختلط (Taguchi L18). المرحلة الرابعة من هذا العمل خصصت لتحسين ظروف الحفر باستخدام نهج Taguchi (تحليل الإشارة إلى الضوضاء) ووظيفة الرغبة (DF). لقد تم التحقق من صحة القيم المثلى التي تم الحصول عليها باستخدام نهج Taguchi وكذلك منهجية سطح الاستجابة (MSR) عن طريق التجارب التأكيدية.

الكلمات المفتاحية للبحث : الحفر الطريقي الدوار ، سرعة الاختراق ، منهجية تاجوشي، منهجية سطح الاستجابة ، تحليل التباين (نسبة الإشارة / ضوضاء) ، وظيفة الرغبة.

Résumé

Résumé

La technologie de forage occupe une importance cruciale dans l'industrie minière en Algérie. A cet effet, il serait nécessaire de dire que l'optimisation des paramètres de forage est une partie intégrante de la réussite économique ou l'échec de toute exploitation minière. La prédiction de la vitesse de pénétration jugée nécessaire pour un régime de fonctionnement rationnel constitue l'un des paramètres les plus importants dans la planification des travaux de forage dans les gisements miniers et l'estimation des coûts. Dans cette optique, le travail de recherche objet de la présente thèse de doctorat portera sur l'optimisation du mode roto-percutant et l'étude de l'influence des principaux paramètres sur l'efficacité de fonctionnement des machines de forage. La mise en œuvre de ce travail de recherche est organisée selon les étapes suivantes : La première étape concerne une investigation sur les paramètres contrôlables et incontrôlables affectant la vitesse de pénétration dans un processus de forage. La deuxième étape, a pour but de déterminer le régime rationnel de fonctionnement d'une machine de forage roto-percutant. Les paramètres de réglage de la machine de forage sont : la force axiale, la pression d'alimentation en air comprimé du marteau, la vitesse de rotation du train de tige sont étudiées. Un plan orthogonal de Taguchi, le ratio signal-bruit [S/B], l'analyse de variance (ANOVA Pareto) ainsi que l'analyse de régression sont aussi utilisées en vue d'analyser l'effet de ces paramètres sur la vitesse de pénétration de l'outil dans la roche. Une série d'expériences basées sur un réseau orthogonal (L_{27}) a été effectuée. Les résultats des expériences sont recueillis ainsi analysés à l'aide du logiciel statistique « Minitab 16 ». La troisième étape porte sur la modélisation de la vitesse de pénétration en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (MSR), et en tenant compte des paramètres de forage roto-percutant tels que, la pression d'air, la vitesse de rotation, la pression spécifique d'avance ainsi que le diamètre de l'outil. Dans ce contexte, l'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'effet des facteurs de contrôle sur la réponse. Les expériences ont été réalisées sur la base d'un plan expérimental mixte (L_{18}) de Taguchi. La quatrième étape de ce travail est consacrée à l'optimisation des conditions de forage en utilisant l'approche de Taguchi (analyse signal / bruit) et la fonction de désirabilité (DF). En effet, les valeurs optimales obtenues par l'utilisation de l'approche de Taguchi ainsi que la méthodologie de surface de réponse (MSR) ont été validées par des expériences de confirmation.

Mots-clés : Forage roto-percutant, Vitesse de pénétration, Méthode de Taguchi, Méthodologie de Surface de Réponse (MSR), ANOVA, le ratio signal/bruit, Désirabilité.

Abstract

Abstract

Drilling technology is of crucial importance in the mining industry in Algeria. To this end, it would be necessary to say that optimizing drilling parameters is an integral part of the economic success or failure of any mining operation. The prediction of the penetration rate deemed necessary for a rational operating regime is one of the most important parameters in the planning of drilling in the mineral deposits and the estimation of costs. With this in mind, the research work that is the subject of this doctoral thesis will focus on the optimization of the rotary percussive mode and the study of the influence of the main parameters on the operating efficiency of drilling machines. The implementation of this research work is organized according to the following steps: The first step concerns an investigation of the controllable and uncontrollable parameters affecting the penetration rate in a drilling process. The second step is to determine the rational operating regime of a rotary percussive drilling machine. The operational parameters of the drilling machine are: the thrust, the air pressure, the rotation speed are studied. An orthogonal array of Taguchi, signal-to-noise [S/N] ratio, ANOVA Pareto analysis, and regression analysis are used to investigate the effect of drilling operational factors on the penetration rate. A series of experiments based on orthogonal arrays L_{27} was carried out and the results were collected and analyzed using the statistical software Minitab 16. The third step is the modeling of the penetration rate using the Response Surface Methodology (RSM) taking into account the rotary percussive drilling parameters such as air pressure, specific advance pressure, rotation speed, and bit diameter, in this context, ANOVA is used to characterize the effect of control factors on the response. The experiments were carried out on the basis of a mixed experimental array Taguchi L_{18} . The fourth stage of this work is devoted to optimizing drilling conditions using the Taguchi approach (signal-to-noise analysis) and the desirability function (DF). Indeed, the optimal values obtained by using the Taguchi approach as well as the response surface methodology (RSM) were validated by confirmatory experiments.

Keywords: Rotary percussive drilling, Penetration rate, Taguchi method, Response surface model (RSM), ANOVA, Signal-to-noise ratio, Desirability function.

Liste des figures

Figure I. 1. Schéma de destruction de l'Epchtein (1939).....	9
Figure I. 2 . Schéma de destruction de l' Patsold (1953).	9
Figure I. 3. Schéma de destruction de l'O.Alimov (1959).	10
Figure I. 4. Schéma de destruction du Melekestsev (1960).	10
Figure I. 5. Schéma de destruction de l'Ikhara (1963).	11
Figure I. 6. Schéma de destruction de l'Israelit (1964).	12
Figure I. 7.Schéma de destruction de la roche par forage roto-percutant à l'aide de l'outil à lames.....	12
Figure I. 8. Extrait de la carte routière région Azzaba	15
Figure I. 9. Les différentes formations rocheuses de Hadjar-Soud de lieu de travail.	17
Figure I. 10. Influence de la résistance à l'empreinte (P_k) sur la vitesse de pénétration pour différents roches de calcaires de Hadjar-Soud.	20
Figure I. 11. Influence de la résistance à la compression (R_c) sur la vitesse pénétration pour différents roches de calcaires de Hadjar-Soud	21
Figure I. 12. L'effet de diamètre de l'outil sur la vitesse de pénétration.	23
Figure I. 13 . Influence de la pression sur la couronne sur la vitesse d'avancement dans du calcaire (Solétanche)	24
Figure I. 14. Influence de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement dans du calcaire (Solétanche).....	25
Figure I. 15. Influence de différents facteurs sur l'efficacité de forage roto-percutant	26
Figure I. 16. (a,b,c) .Influence de la pression d'alimentation sur la vitesse de pénétration.	28

Liste des figures

Figure I. 17. (a,b,c).Influence de la vitesse de rotation de tain de tige sur la vitesse de pénétration.....	30
Figure I. 18. Représentation de la loi de Fisher-Snedecor.	36
Figure II. 1.Sondeuse roto percutante INGERSOLL RAND CM-780D en régime de travail.....	50
Figure II. 2. Mécanismes de forage d'un système de forage rotatif à percussion: forage en fond de trou.	51
Figure II. 3 Outil de coupe (forage).	52
Figure II. 4. L'usure de l'outil de forage.....	55
Figure II. 5 . Graphique des effets principaux de A, B et C sur la vitesse de pénétration (V_p)	55
Figure II. 6. Graphique des effets principaux de A, B, et C sur ratio[S/B] pour V_p	56
Figure II. 7. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la vitesse de pénétration. .	57
Figure II. 8. Diagramme de Pareto.....	60
Figure II. 9. Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites et de la vitesse de Pénétration.....	64
Figure II. 10. Courbe de la probabilité normale de la vitesse pénétration.	64
Figure III. 1. Machines de forage pendant le régime de travail dans Hadjar-Soud.....	71
Figure III. 2. Le tachymètre optique "Beta 1760 / TC2 "	72
Figure III. 3. Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p).....	75
Figure III. 4. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la vitesse de pénétration. .	76
Figure III. 5.Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales de la vitesse de pénétration du modèle obtenu.....	79
Figure III. 6. Courbe de la probabilité normale pour la vitesse de pénétration.....	80
Figure III. 7. Analyse des résidus.....	81
Figure III.8 .Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées pour la vitesse de pénétration.....	82
Figure III. 9. Histogramme des valeurs résiduelles de la vitesse de pénétration.	83

Liste des figures

Figure III. 10. Les valeurs résiduelles en fonction de l'ordre d'observation de la vitesse de pénétration.....	84
Figure III. 11. Effet de diamètre de l'outil et la pression spécifique d'avance sur la vitesse de pénétration (V_p): (C=45 tr/min et D= 15 bar):a) Graphique de contour, b) Graphique 3D....	85
Figure III. 12. Effet de diamètre de l'outil et la pression spécifique d'avance sur la vitesse de pénétration (V_p): (C=45 tr/min et D= 15 bar): a) Graphique de contour, b) Graphique 3D...	86
Figure III. 13. Effet de la pression spécifique d'avance et de la vitesse de rotation sur la vitesse de pénétration (V_p): (A= 140 mm et D= 15 bar): a) Graphique de contour, b) Graphique 3D.	87
Figure III. 14. Effet de diamètre de l'outil et de la pression d'air sur la vitesse de pénétration (V_p): (B= 50 kgf/cm ² et C= 45 tr/min):a) Graphique de contour, b) Graphique 3D.....	88
Figure III. 15. Effet de diamètre de l'outil et de la vitesse de rotation sur la vitesse de pénétration (V_p): (B= 50 kgf/cm ² et D= 15 bar): a) Graphique de contour, b) Graphique 3D	89
Figure III. 16. Effet de la vitesse de rotation et la pression d'air sur la vitesse de pénétration (V_p): (A=140 mm et B= 50 kgf/cm ²):a) Graphique de contour, b) Graphique 3D.....	90
Figure IV. 1. Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p).....	96
Figure IV.2. Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p)	97
Figure IV.3. Interaction entre les facteurs d'entrée.....	98
Figure IV.4. Diagramme de désirabilité d'une réponse à maximiser.	101
Figure IV.5. Diagramme de désirabilité d'une réponse à minimiser.	102
Figure IV.6. Diagramme de désirabilité d'une réponse à cibler.	103
Figure IV.8. Graphique d'optimisation de la vitesse de pénétration dans le forage roto-percutant.	105
Figure IV. 9. Graphe d'optimisation pour (V_p , C_t).	108

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Les Propriétés physico-mécaniques du calcaire de Hadjar-Soud.	19
Tableau II. 1. Facteurs et niveaux sélectionnés.....	48
Tableau II. 2. Facteurs et niveaux sélectionnés.....	49
Tableau II. 3. Caractéristiques techniques du marteau COP 64.2.....	50
Tableau II. 4 . Résultats expérimentaux pour la vitesse de pénétration et le ratio [S/B].	54
Tableau II. 5. Tableau de réponse pour le signal à bruit.	58
Tableau II. 6. Analyse de variance (Anova-Pareto) des résultats de forage.	59
Tableau II. 7 . Les paramètres optimaux de réglage de la sondeuse.	60
Tableau II. 8.Résultat de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration V_p	62
Tableau II. 9. Coefficient de détermination.	63
Tableau II. 10. Comparaison des valeurs prédites de vitesse de pénétration par la méthode de Taguchi.	65
Tableau III. 1. Caractéristiques techniques du marteau COP 44.....	72
Tableau III. 2. Les facteurs et niveaux sélectionnés.....	72
Tableau III. 3. Plan orthogonal expérimental L_{18}	73
Tableau III. 4. Résultats expérimentaux pour un plan (L_{18}).....	74
Tableau III. 5. Résultats de l'analyse de Variance de la vitesse de pénétration.....	77
Tableau IV.1.Résultats expérimentaux du plan orthogonal L_{18} pour la vitesse de pénétration et le rapport	95
Tableau IV. 2 .Les rapports [S/B] moyens de la vitesse de pénétration.....	99
Tableau IV.3 . Condition optimale.....	99
Tableau IV.4.Test ANOVA pour les rapports [S/B].	100
Tableau IV. 5. Des tests de confirmation par la méthode de Taguchi et MSR.	106
Tableau IV. 6.Résultat de prix réel de forage.	107

Table des matières

ملخص.....	v
Résumé.....	vi
Abstract.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Table des matières.....	xii
Introduction générale.....	1
Références bibliographiques.....	4
<i>Chapitre I</i>	<i>Etude bibliographique et généralités</i>
I.1. Introduction.....	5
I.2. Etude théorique sur la prévision et l'optimisation de la vitesse de pénétration pendant le forage d'un trou.....	5
I.2.1. Les méthodes traditionnelles.....	5
I.2.2. Les méthodes avancées.....	7
I.3. Analyse des recherches du processus de forage roto-percutant.....	8
I.4. Influence des différents facteurs sur l'efficacité du forage.....	13
I.4.1. Les propriétés de la roche.....	13
I.4.1.1. Etude théorique sur l'influence des propriétés de la roche sur la vitesse de pénétration.....	13
I.4.1.2. Etude expérimentale de l'influence des propriétés de roche dans la carrière de Hadjar-Soud.....	15
I.4.1.2.1. Situation du gisement.....	15
I.4.1.2.2. Géologie du gisement.....	16
A. Lias.....	16
B. Jurassique.....	16
C. Crétacé.....	16
I.4.1.2.3. Analyse des propriétés physico-mécaniques des roches influant sur le processus de forage.....	17
A. Indice d'abrasivité.....	17
B. Indice de la résistance à l'empreinte.....	18
C. Indice de la résistance à la compression.....	19
I.4.1.2.4. Résultat et discussion.....	19
A. Influence de l'abrasivité sur la vitesse de pénétration.....	19
B. Influence de la résistance à la compression R_c et la résistance à l'empreinte P_k	20
I.4.2. Influence des propriétés géométriques de l'outil de forage sur la vitesse de pénétration.....	21
I.4.2.1. Etude théorique.....	21
I.4.2.1.1. Type de l'outil.....	21
I.4.2.1.2. Diamètre de l'outil.....	23
I.4.2.2. Etude expérimentale de l'influence de diamètre de l'outil sur la vitesse de pénétration.....	23
I.4.3. Influence des paramètres de réglage sur la vitesse de pénétration.....	24
I.4.3.1. Etude théorique sur l'influence des paramètres de réglage sur la vitesse de pénétration.....	24
I.4.3.2. Etude expérimentale de l'influence des paramètres de réglage des sondeuses sur la vitesse de pénétration (étude de notre cas).....	27
I.4.3.2.1. Influence de la pression d'alimentation sur la vitesse de pénétration.....	27
I.4.3.2.2. Influence de la vitesse de rotation de tain de tige sur la vitesse de pénétration.....	28
I.5. Planification expérimentale.....	30

Table des matières

I.5.1.Méthode mono-objectif (Méthode de Taguchi).....	31
I.5.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi	31
I.5.1.2 Le choix d'une matrice de Taguchi	32
I.5.2. La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR)	32
I.6. Analyse statistique	33
I.6.1 Analyse de la variance	33
I.6.1.1. Calcul de la variance des facteurs et interactions	33
I.6.1.2. Analyse de variance résiduelle (ANOVA)	35
I.6.2. Test de Fisher-Snedecor.....	36
I.6.3. Probabilité.....	37
I.7. Conclusion.....	37
Références bibliographiques	38
Chapitre II L'optimisation des paramètres opérationnels d'une sondeuse roto percutante selon la méthode de Taguchi	
II.1. Introduction	45
II.2. Optimisation par la méthode de Taguchi	45
II.3. Préparation du plan d'expériences	46
II.3.1. Objectifs	46
II.3.2. Réponse	47
II.3.3. Détermination des facteurs	47
II.3.3.1. Pression d'alimentation en air.....	47
II.3.3.2. Vitesse de rotation de la tige.....	47
II.3.3.3. Force axiale (Poussée)	48
II.3.4. Choix du plan d'expériences.....	48
II.4. Conduire les expériences	49
II.4.1. Matériels et préparation	49
II.4.2. Le marteau fond du trou.....	50
II.4.2.1. Caractéristique de marteau	50
II.4.2.2. Principe de fonctionnement	50
II.4.3. L'outils de forage.....	51
II.4.4. Outils de mesure	52
II.5. Plan de Taguchi	53
II.5.1. Paramètres de sortie (réponses étudiées).....	53
II.5.1.1. Vitesse de pénétration.....	53
II.5.1.2. Ratio signal -bruit (rapport [S/B]).....	53
II.5.2 Réalisation des essais.....	53
II.5.3. Représentation graphique des effets.....	54
II.5.3.1. Diagramme des effets principaux	54
II.5.3.2. Diagramme d'interaction	56
II.5.4. Analyse statistique des résultats.....	57
II.5.4.1. Analyse du signal bruit	57
II.5.4.2. Analyse d'ANOVA Pareto	58
II.5.4.3. La combinaison optimale.....	60
II.6. Modélisation mathématique.....	60
II.7. Test de confirmation.....	65
II.8. Conclusion.....	65
Références bibliographiques	66

Table des matières

Chapitre III	Modélisation par la méthodologie de surface de réponse
III.1. Introduction.....	69
III.2. Méthode de surface de réponse (MSR) appliquée.....	69
III.3.Réalisation de l'expérience.....	70
III.3.1. Déroulement de l'expérience.....	70
III.3.2.Caractéristique de marteau.....	72
III.3.3. Conception des expériences.....	72
III.3.4. Plans d'expériences.....	72
III.4. Résultat et discussion.....	73
III.5. Analyse statistique et modélisation de vitesse de pénétration.....	74
III.5.1. Graphes des effets moyens et des interactions.....	74
III.5.2. Modélisation mathématique.....	76
III.5.3. Analyse de la variance (ANOVA).....	77
III.6. Validation du modèle.....	79
III.6.1. Représentation graphique des réponses mesurées théoriquement en fonction des réponses prédites.....	79
III.6.2. Test de la normalité du plan de Taguchi.....	80
III.6.2.1. Droite de Henry des valeurs résiduelles.....	80
III.6.2.2. Valeurs Résiduelles en fonction des valeurs ajustées pour la vitesse de pénétration.....	81
III.6.2.3. L'histogramme des valeurs résiduelles de la vitesse de pénétration.....	82
III.6.2.4. Valeurs résiduelles en fonction de l'ordre des observations pour la vitesse de pénétration.....	83
III.7. Analyse des surfaces de réponse.....	84
Références bibliographiques.....	93
Chapitre IV	Optimisation par la méthode Taguchi et la fonction désirabilité
IV.1. Introduction.....	94
IV. 2. Optimisation mono-objectif par Taguchi.....	94
IV.2.1. La réalisation de l'expérience.....	94
IV.2.2. Résultats d'expérience.....	94
IV.2.3. Discussion des résultats.....	95
IV.2.3.1. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	95
IV.2.3.2. Diagramme d'interaction.....	97
IV.2.3.3. Analyse statistique.....	98
IV.2.3.3.1. Analyse du signal de bruit.....	98
IV.2.3.3.2. Analyse d'ANOVA du signal de bruit de la vitesse de pénétration.....	99
IV.3. Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité.....	100
IV.3.1. La fonction désirabilité.....	100
IV.3.1.1. Désirabilité d'une réponse à maximiser.....	101
IV.3.1.2. Désirabilité d'une réponse à minimiser.....	102
IV.3.1.3. Désirabilité cible.....	103
IV.3.2. Optimisation.....	104
IV.3.3. Optimisation de la vitesse de pénétration par la fonction désirabilité.....	104
IV.4. Validation expérimentale.....	106
IV.5. Considérations sur le coût d'un mètre foré.....	106
IV.5.1. Le coût d'un mètre foré par la combinaison entre la méthode de Taguchi et MSR.....	106

Table des matières

IV.5.2.Optimisation multi objectif de la vitesse de pénétration et le coût de forage par la fonction désirabilité	108
IV.6.Conclusion	109
Références bibliographiques	110
Conclusion générale	111
Perspectives.....	113
Annexe 1	114
Annexe 2	115

Introduction générale

Introduction générale

Le forage d'un trou dans la roche avec une machine à outil est l'une des opérations les plus courantes, voir, les importantes dans la géotechnique, dans la construction et l'industrie minières ainsi que l'industrie des hydrocarbures (gaz et pétrole) [1].

La communauté d'ingénierie a tenté d'influencer l'utilisation de l'énergie pour forer des formations rocheuses dès la fin des années 1940 quand elle a développé un certain nombre de machines de forage [2]. Jusqu'à présent, les méthodes de forage les plus développées pour le dynamitage sont le forage rotatif et le forage roto-percutant [3].

La technologie de forage joue un rôle majeur dans l'industrie minière algérienne. En fait, il serait juste de dire que l'optimisation des paramètres de forage est une partie intégrante de la réussite économique ou l'échec de toute exploitation minière [4].

L'utilisation de la machine de forage appropriée est toujours associée avec le coût de l'excavation et le coût global du projet [5]. Les opérateurs et les fabricants ne cessent d'explorer les moyens de réduire les coûts et accroître la productivité en améliorant la vitesse de pénétration de forage et de diminuer l'usure de l'outil de forage [6], la consommation d'énergie [7] et les vibrations produites dans la tige .

La vitesse de pénétration est généralement acceptée comme l'un des paramètres les plus importants dans la planification des travaux de forage dans les gisements miniers et l'estimation des coûts [8], donc la prédiction de la vitesse de pénétration, est essentielle pour évaluer le total des coûts de forage à l'aide d'une équation de prédiction [9]. En outre, on peut utiliser cette équation pour sélectionner le type de la machine de forage le mieux adapté à des conditions données [10]. La vitesse de pénétration dépend principalement à des variables opérationnelles ainsi que les propriétés de la roche. Cependant, les variables opérationnelles sont connues en tant que paramètres contrôlables, en cite entre autres, la vitesse de rotation, la poussée, la fréquence de soufflage et le rinçage. Cependant, les propriétés des roches dans les conditions géologiques et minières sont des paramètres incontrôlables [11].

Pour une planification efficace des travaux de forage, on doit tenir compte de l'influence des contraintes extérieures sur la vitesse de pénétration dans le processus de forage. À cet effet, une combinaison de plusieurs méthodes, notamment, les méthodes statistiques, les méthodes analytiques et celles expérimentales ont été mise en œuvre.

Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, il est avantageux d'utiliser des méthodes basées sur les plans d'expériences.

Les plans d'expériences est une méthodologie de choix qui permet d'optimiser la mise au point d'un produit ou d'un procédé industriel. D'une manière générale, cette

méthodologie consiste à déterminer et à établir les liens existants entre les variables d'entrée du processus et la grandeur d'intérêt, dite réponse. Les grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sont censées influencer sur le comportement de la réponse. Grâce aux plans d'expériences, on obtient le maximum de renseignements avec un minimum d'expériences.

Il existe plusieurs types de plans d'expériences qui se différencient par la façon du traitement des facteurs étudiés, et des niveaux qui sont leurs associés et les interactions qui peuvent exister [12].

Les méthodes de régression linéaire et surface de réponse nous ont permis d'obtenir une modélisation mathématique des paramètres de forage roto-percutant. Pour chacun des modèles, des tests statistiques ont été appliqués pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance a été menée pour vérifier la validité de ces modèles.

Optimiser la vitesse de pénétration revient à résoudre un problème d'optimisation de régime de fonctionnement de forage. On rencontre deux types de problèmes : le premier est mono-objectif, là on cherche une seule solution optimale et le second est un problème d'optimisation multi-objectif, où on recherche un ensemble de solutions optimales, connu sous le nom d'ensemble optimal.

L'objectif principal de notre étude est : i) étudier l'effet de certains facteurs tels que les propriétés physico-mécaniques de la roche, les paramètres de réglage des sondeuses roto-percutantes et le diamètre de l'outil de forage sur la vitesse de pénétration. ii) optimiser les paramètres de réglage d'une sondeuse roto-percutante en appliquant la méthode de Taguchi pour le cas de la carrière de Hadjar-Soud afin d'obtenir un régime de fonctionnement rationnel. iii) chercher le régime rationnel de forage roto-percutant pour deux sondeuses à la carrière de Hadjar-Soud en combinant la méthodologie de surface de réponse et celle de Taguchi.

Organisation de la thèse : Pour répondre aux objectifs fixés précédemment, nous avons structuré notre travail de recherche en deux parties, elles-mêmes divisées en plusieurs chapitres.

La première partie propose une analyse bibliographique du sujet. Le premier chapitre est orienté vers un état de l'art sur la prédiction de la vitesse de pénétration, le processus de destruction de la roche par le forage roto-percutant et une étude théorique liée par une investigation expérimentale sur les facteurs influençant la vitesse de pénétration sur site. A la fin de cette partie, des généralités sur les méthodes d'optimisation ainsi que les méthodes d'analyse statistique sont aussi présentées.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'aspect expérimental de ce travail de recherche. Le deuxième chapitre de cette thèse est destiné à l'optimisation de la vitesse de pénétration. Des essais selon la table orthogonale de Taguchi ont été exécutés pour déterminer les paramètres optimaux de réglage donnant un maximum de la vitesse de pénétration de la sondeuse type INGERSOLL RAND CM-780D. Cette étude concerne l'influence des paramètres de réglages et leurs interactions sur la vitesse de pénétration.

Le troisième chapitre s'intéresse à déterminer un modèle mathématique de la vitesse de pénétration à partir des résultats expérimentaux des essais réalisés selon un plan de Taguchi mixte L_{18} avec la méthodologie de surface de réponse. L'analyse de la variance ANOVA est utilisée afin de calculer la contribution de chaque facteur et leurs interactions sur la vitesse de pénétration. A la fin du chapitre, une attention particulière a été portée sur la topographie de 3D et les courbes de contour en fonction des conditions de forage.

Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation de la vitesse de pénétration des deux sondeuses afin de déterminer le régime optimal de forage au niveau des carrières de Hadjar-Soud. L'optimisation est réalisée suivant deux méthodes, optimisation mono-objectif, en se basant sur l'approche de Taguchi et l'analyse du signal bruit [S/B] et optimisation multi-objectif, en se basant sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF).

Une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus au cours de ce travail et une présentation des perspectives envisagées.

Références bibliographiques

- [1] Z.Q.Yue, C.F.Lee, K.T.Law, L.G.Tham, Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization – illustrated by a case example in Hong Kong, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 41(2004)573-612.
- [2] G.R. Samuel, Percussion drilling. Is it a lost technique? A review, SPE 35240, The Permian Basin Oil & Gas Recovery Conf., Midland, TX, 27–29 March 1996.
- [3] C.L. Jimeno, E.L. Jimeno, F.J.A. Carcedo, *Drilling and blasting rocks*, Rotterdam: Balkema, 1995.
- [4] I. Onederra, Development of an empirical model for fragmentation ring underground blasting confidential applications AMIRA / JKMRC P447, BART project report, August 2001.
- [5] T.N. Singh, A. Jain, K. Sarkar, Petrophysical parameters affecting the microbit drillability of rock, *Int. J. Mining and Mineral Engineering*. 1(3) (2009) 261-277.
- [6] F. Marta, K. Riihioja, G. Chitombo, Drilling composite carbon materials using a drill bit. Part I: Five-step drilling representation and factors affecting maximum force and torque. (2005) 70 – 75.
- [7] M.S. Sazidy, D.G. Rideout, S.D. Butt, F. Arvani, Modeling percussive drilling performance using simulated visco-elastic-plastic rock medium, 44th US Rock mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock mechanics Symposium, USA, (2010) 434–443.
- [8] N. Bilgin, S. Kahraman, "Drillability prediction in rotary blast hole drilling" 1ath International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, ISBN 975-395-605-3(2003).
- [9] S. Kahraman, Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36(1999) 981-989.
- [10] S. Kahraman, Performance analysis of drilling machines using rock modulus ratio, *J S Afr I Min Metall*. 103(5) (2003) 15–22.
- [11] S. Kahraman, N. Bilgin, C. Feridunoglu, Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40(2003) 711-723.
- [12] J. Goupy, *Introduction to Experimental Plans*, Dunod, Paris, 2001.

Chapitre I

Etude bibliographique et généralités

I.1. Introduction

L'optimisation du processus de forages joue un rôle primordial dans l'industrie pétrolière et minière pour réduire les coûts inutiles et, par conséquent, augmenter la rentabilité de production. La vitesse de pénétration dépend de divers facteurs tels que les propriétés de la masse rocheuse, la profondeur du puits, la poussée axiale sur l'outil de forage, la vitesse de rotation du train de tiges, les propriétés des pertes de fluide, le type de l'outil, l'usure de l'outil et le nettoyage des trous. Ces facteurs typiques influent sur la vitesse de pénétration de différentes manières [1]. À cet égard, la prévision et l'optimisation de la vitesse de pénétration seront cruciales pour pouvoir réduire les coûts des opérations de forage.

I.2. Etude théorique sur la prévision et l'optimisation de la vitesse de pénétration pendant le forage d'un trou

Toute recherche concernant l'optimisation de la vitesse de pénétration peut être divisée en deux catégories :

I.2.1. Les méthodes traditionnelles

Les méthodes traditionnelles sont basées sur des concepts et des théories mathématiques.

L'une des premières tentatives d'optimisation du forage a été présentée dans l'étude de Graham et Muench [2]. Ils ont évalué analytiquement, en combinant entre le poids sur l'outil et la vitesse de rotation, pour en déduire des expressions mathématiques empiriques indiquant la durée de vie de l'outil et la vitesse de pénétration en fonction de la profondeur, de la vitesse de rotation et du poids de l'outil.

Galle et Woods [3] sont les pionniers de l'optimisation de la vitesse de pénétration. Leur recherche a étudié la relation entre les paramètres de forage et la vitesse de pénétration pour la première fois. Galle et Woods [4] ont présenté un modèle analytique permettant d'estimer la vitesse de pénétration en fonction du poids sur l'outil, de la vitesse de rotation, du type de formation rocheuse et de l'usure des dents de l'outil. Maurer [5] a proposé une équation pour la vitesse de pénétration basée sur les mécanismes de roche conique avec le rouleau à cône, qui permet un nettoyage parfait du fond de puits. Cependant, le modèle n'a pas présenté une performance acceptable dans la réalité [6]. Mechem et Fullerton [7] ont développé un modèle basé sur la capacité de formation de forage, le poids de l'outil, la vitesse de rotation, la profondeur du puits, la pression de la boue et l'énergie hydraulique appliquée.

Bingham [8] a déclaré que la vitesse de pénétration peut être obtenue en fonction de la vitesse de rotation, le poids sur l'outil, diamètre d'outil, k et l'exposant de poids de l'outil (a_5). Il a

ignoré l'effet de la résistance de compression uni-axiale. Hemphill et Clark [9] ont effectué plusieurs essais de forage à grande échelle pour évaluer l'effet de la chimie de la boue sur la vitesse de pénétration à l'aide de deux outils compacts en diamant polycristallin (PDC) et de neuf boues différentes. Motahhari et al. [10] ont présenté une méthode permettant de prédire le poids optimal sur l'outil pour une section de trou à forer en manipulant les données de performances motrices, couplée à un modèle de la vitesse de pénétration. Ritto et al. [11] ont réalisé une optimisation robuste de la vitesse de pénétration en fonction de la vitesse de rotation à la limite maximale du sommet et de la force de l'interaction initiale à l'outil de forage, de vibration, la tension et les limites de la fatigue du système dynamique. Hareland et al. [12,13] comprenaient la géométrie de coupe et des paramètres mécaniques, générés par l'interaction entre l'outil de coupe et la roche, dans un modèle de la vitesse de pénétration.

L'analyse de régression est un outil puissant pour l'optimisation, plusieurs chercheurs ont utilisé cette technique pour l'optimisation de la vitesse de pénétration comme :

Bourgoyne et Young [14] ont développé un modèle mathématique pour l'estimation de la vitesse de pénétration de forage en utilisant une analyse de régression multiple. Ils ont étudié l'effet de la profondeur, la résistance de la formation, la compaction de la formation, la pression différentielle entre le puits et la formation, l'usure des dents de l'outil, du diamètre de l'outil, du poids sur l'outil, de la vitesse de rotation et la vitesse de pénétration. Bourgoyne et Young [15] ont proposé des procédures de sélection du poids sur l'outil et la vitesse de rotation, l'hydraulique pour prédire la pression de formation à l'aide d'une analyse de régression multiple à partir des données de forage détaillées. Tansu [16] a présenté une nouvelle approche d'optimisation de la vitesse de pénétration, de la durée de vie des outils et de la fonction de coût basée sur l'interaction des données brutes. Plusieurs équations de régression ont été établies pour prédire la vitesse de pénétration et la durée de vie de l'outil en utilisant trois variables de contrôle, du poids sur l'outil, de la vitesse de rotation et de la puissance hydraulique d'outil. Les équations de vitesse de pénétration et de la durée de vie des outils sont incorporées dans une équation du coût de forage, cette équation de coût est minimisée par rapport aux variables de contrôle. Walker et al. [17] ces derniers ont développé une corrélation de la vitesse de pénétration pour un outil tricône en fonction de poids sur l'outil, la résistance uni axial, porosité de la formation (PHI). Ainsi Warren [18] a développé une corrélation de la vitesse de pénétration qui inclut également l'efficacité d'élimination des boutures. Hareland et Hoberock [19] ont modifié le modèle de Warren [18] en incluant l'effet de l'usure de l'outil. Al-Betairi et al. [20] ont introduit un modèle utilisant l'analyse de régression multiple pour prédire les effets de divers paramètres de forage sur la vitesse de

pénétration. Ils ont utilisé le modèle pour estimer la vitesse de pénétration optimale, le poids sur le trépan et la vitesse de rotation sous l'effet de facteurs contrôlables et non contrôlables. En outre, ils ont étudié les coefficients de corrélation et la sensibilité à la multi colinéarité de chaque paramètre de forage sur la vitesse de pénétration. Alum et Egbon [21] ont introduit des modèles semi-analytiques pour l'estimation de la vitesse de pénétration basés sur le modèle original de Bourgoyne et Young. Les coefficients de corrélation obtenus pour les propriétés de la roche ont montré que seules les pertes de pression annulaires affectent la vitesse de pénétration de manière significative par une densité de circulation équivalente.

I.2.2. Les méthodes avancées

L'utilisation de l'outil d'informatique, le progrès d'avancement des logiciels statistiques a permis d'étudier les données de forage plus précis et développer des modèles complets. Maidla et Ohara [22] ont mis au point un programme informatique permettant la sélection simultanée d'un outil, d'un roulement, d'un poids sur un outil et d'une vitesse de rotation afin de minimiser le coût de forage par pied pour un seul passage de l'outil.

Des modèles intelligents tels que la méthodologie de surface de réponse, les réseaux de neurones et algorithmes génétiques sont quelques-uns des résultats de progrès de l'ordinateur. Bahari et al. [23] ont essayé de développer une formule permettant de prédire la vitesse de pénétration à partir des coefficients du modèle de Bourgoyne et Young au moyen d'un algorithme génétique, l'une des techniques d'optimisation intelligente inspirées du principe darwinien de la théorie de l'évolution. Monazami et al. [24] ont utilisé un réseau de neurones artificiels pour prédire la vitesse de pénétration dans l'un des champs pétroliers iraniens. AlArfaj et al. [25] ont présenté une application des modèles intelligents de calcul dans la prédiction de la vitesse de pénétration. Bhatnagar et Khandelwal [26] ont évalué les performances de forage en utilisant une approche intelligente. Jacinto [27] a développé un modèle de prévision de la vitesse de pénétration dans les formations salées du Brésil par un réseau de Clustering Bayésien. Basarir et al. [28] ont utilisé un modèle neuro-fuzzy adaptatif pour prédire la vitesse de pénétration du diamant. Shishavan et al. [29] ont utilisé une étude de cas préliminaire de forage sous pression gérée pour évaluer la performance au cours de différents événements de forage. Leur étude a montré que la combinaison du contrôle de la vitesse de pénétration et de la pression de fond minimisaient les risques, réduisaient les coûts de forage et réduisaient la charge de travail de l'opérateur. Duan et al. [30] qui ont utilisé les avantages d'un algorithme d'optimisation pour concevoir un modèle de réseau de neurones afin de prédire la vitesse de pénétration. Mantha et Samuel, [31] en utilisant les arbres ANN

(Artificiel Neural Network), SVR (Support Vector Regression) et de régression de classification dans leur étude, montrent que la vitesse de pénétration suit une relation complexe qui ne peut être expliquée que de manière exhaustive par les seuls modèles traditionnels. L'étude de Moraveji et Naderi [32] a conclu que la méthodologie de surface de réponse, modèle statistique (MSR), fournit un outil efficace pour prédire la vitesse de pénétration en fonction de variables contrôlables et non contrôlables avec une précision raisonnable. Rais et al. [33] ont réalisé 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 avec la vitesse de pénétration. Ils ont utilisé une méthode d'optimisation indirecte (méthode des plans d'expériences) dans les conditions de la carrière de phosphate de Djebel-Onk, Tébessa Algérie.

I. 3. Analyse des recherches du processus de forage roto-percutant

Nous savons que l'efficacité du forage rotatif augmente considérablement si l'on applique des chocs sur la tige tournante cela est provoqué par l'énergie supplémentaire de choc. Ce processus s'appelle le forage roto-percutant.

La puissance appliquée à l'outil est de trois sortes : puissance de choc (N_c), puissance de rotation (N_r) et puissance d'avance (H_a).

Le régime de forage est défini par les paramètres suivants :

- Poussée axiale (P) ;
- Avancement de l'outil (h) ;
- Vitesse de rotation de la tige (n) ;
- Couple de rotation (M) ;
- Energie d'un choc (A) ;
- Fréquence de coups (n_c).

Une meilleure destruction de la roche dépend d'un choix rationnel des principaux paramètres précédemment cités.

Plusieurs travaux de recherches ont été menés dans ce sens et sont analysés comme suit [34-37]:

Epchtein en 1939 a présenté le processus de destruction comme l'alternation de la pénétration instantanée de l'outil sous l'action de la force de choc (P_c) et de la poussée

axiale (P) « position I » et de la sortie rapide de la lame de l'outil le long de la trajectoire inclinée au niveau primaire qui a eu lieu avant le choc.

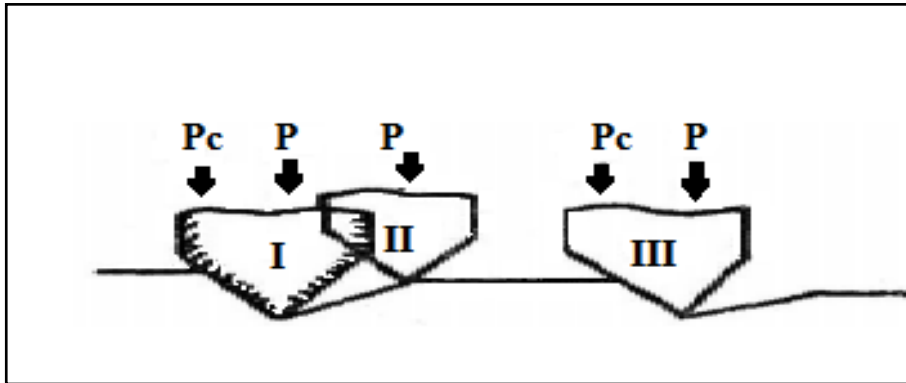


Figure I. 1. Schéma de destruction de l'Epchtein (1939).

Avec : $P_c + P \geq R_z \times S$ (I.1), sachant que : $P \prec P_c$

Où :

- R_z : résistance critique de la roche ;
- S : surface de contact.

Patsold en 1953 a présenté la destruction de la taille par l'outil comme la pénétration de l'outil sous l'action de la force de choc et le couple de rotation.

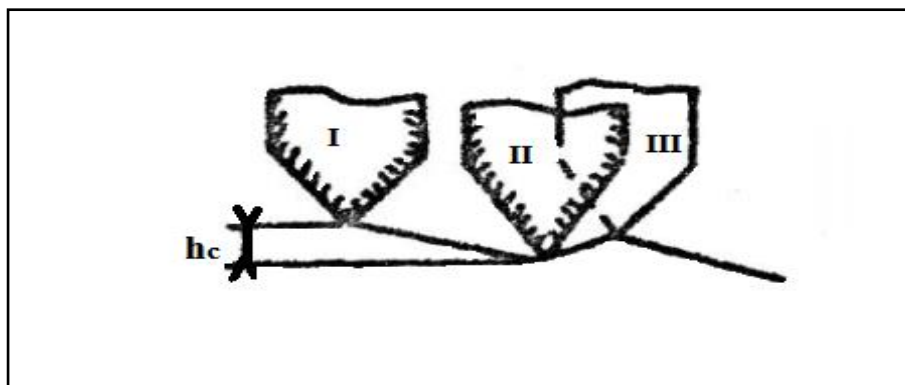


Figure I. 2 . Schéma de destruction de l' Patsold (1953).

Où :

- h_c : profondeur de la pénétration sous l'action du choc ;
- I : position avant le choc ;
- II : position à la fin du choc ;
- III : position avant le choc suivant.

Inete, Pfleider et Lacabane ont estimé que le chargement préalable de la taille par la force axiale et le couple de rotation améliorent considérablement les conditions de la destruction de la roche pendant le choc.

O.Alimov en 1959 a décrit le processus de destruction de la taille comme la pénétration de l'outil au moment du choc à la profondeur (h_c) et le coupage ultérieur de la roche pendant la rotation de l'outil ce qui donne la diminution successive du copeau de la roche après les coups.

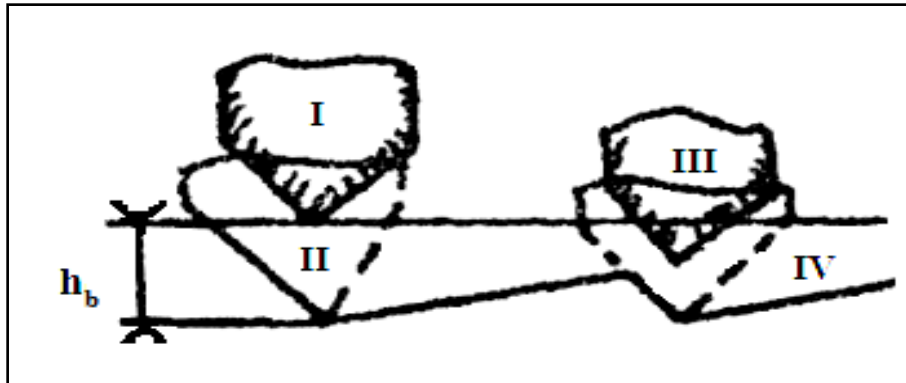


Figure I. 3. Schéma de destruction de l'O.Alimov (1959).

Où :

- h_b : hauteur de bondissement entre les chocs ;
- I : position avant le choc ;
- II : position après le choc ;
- III : position après la rotation ;
- IV : position avant le prochain choc.

Melekestsev en 1960 a présenté le processus comme l'alternation, successive de la pénétration de l'outil sous l'action de choc, bonds rapides de l'outil, coupage de la roche, nouvelle pénétration.

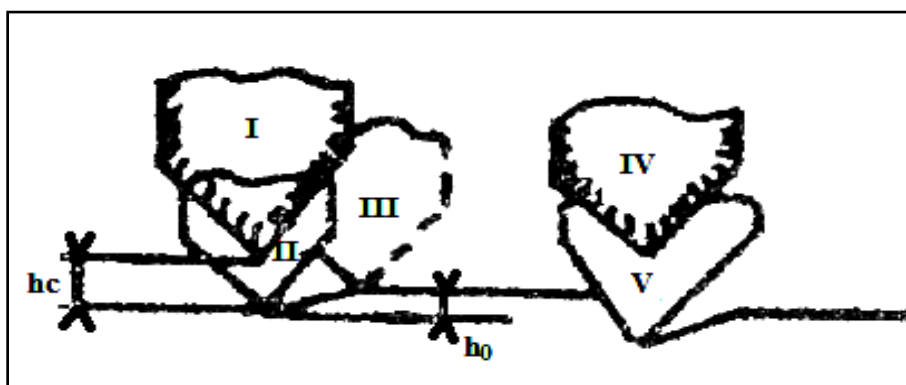


Figure I. 4. Schéma de destruction du Melekestsev (1960).

Sachant que : $h = h_c + \rho \times P$ (I.2)

Où :

- h_0 : hauteur de l'élevation ;
- ρ : coefficient de proportionnalité ;
- I : position avant le choc ;
- II : position après le choc ;
- III : position après l'élevation ;
- IV : position après la rotation ;
- V : position avant le choc suivant.

Ikhara en 1963 a présenté le processus de destruction pendant le forage roto-percutant comme la pénétration à la profondeur (h_c), après choc et coupage de la roche avec enfouissement à la profondeur (h_s), sous l'action de la force axiale. La grandeur sommaire de la pénétration pendant un cycle de la destruction est :

$$h = h_c + h_s \quad (I.3)$$

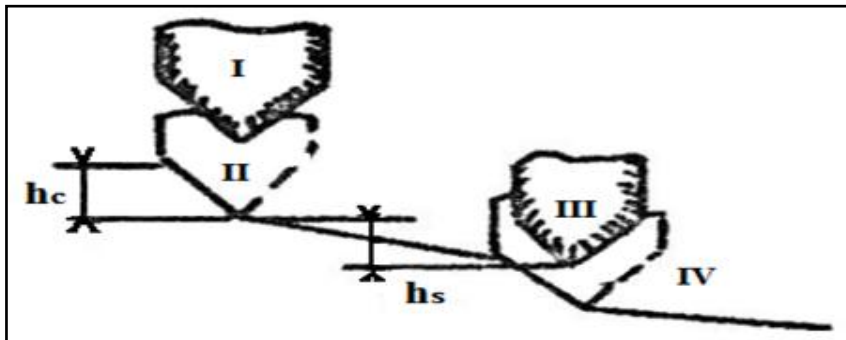


Figure I. 5. Schéma de destruction de l'Ikhara (1963).

Où :

- I : position avant le choc ;
- II : position après le choc ;
- III : position après le coupage pendant la rotation ;
- IV : position avant le choc suivant.

Israelit en 1964 a attiré l'attention sur l'existence de bondissements rapides de l'outil après le choc et sur l'interruption du mouvement de la lame entre les chocs. Selon l'avis de l'auteur, ce phénomène est provoqué par la rigidité du train de tige.

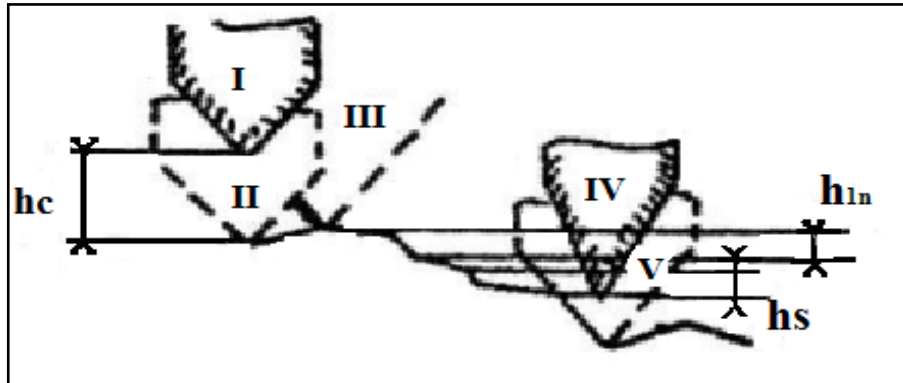


Figure I. 6. Schéma de destruction de l'Israelit (1964).

$$\text{Sachant que : } h = h_c + h_{ln} - h_s \quad (I.4)$$

Où :

I : Position avant le choc ;

II : Position après le choc ;

III : Position après le bondissement ;

IV : Position après la rotation et

V : Position avant le choc suivant.

En généralisant les diverses présentations concernant le processus de la destruction de la taille par l'outil pendant le forage roto-percutant est présenté selon le processus illustré par la figure I.7 établi par Alimov. O et al.[34].

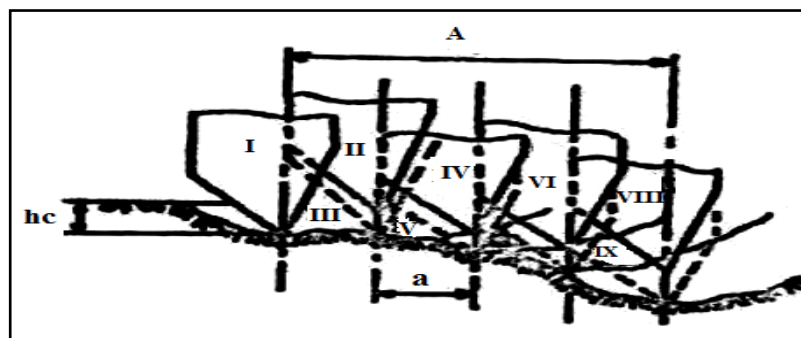


Figure I. 7. Schéma de destruction de la roche par forage roto-percutant à l'aide de l'outil à lames [34].

Sous l'action de la force de choc, les lames du taillant pénètrent très rapidement à la profondeur (h_c), à cause de la rigidité du mécanisme d'avancement de la machine de forage. Le serrage axial de l'outil contre la taille diminue et les lames de l'outil s'élèvent du niveau de la pénétration initiale. Pendant ce temps-là, les lames se déplacent de la position (I) à la position (II) et à la fin de ce mouvement la force axiale augmente sa grandeur jusqu'à ce qu'elle soit maximale. Dans la position (II), les lames ayant devant elles le copeau de la roche ralentissent leur mouvement et dans certains cas s'arrêtent jusqu'à ce que le couple de rotation dépasse la résistance de la roche. Pendant ce temps-là, les lames du taillant sous l'action de la force axiale pénètrent dans la taille « Position III » à la profondeur (h), qui est inférieure à (h_c), ($h_1 < h_c$). Après cela, sous l'action du couple de rotation, à lieu le coupage de la roche le long de la ligne (A). Les lames du taillant se déplacent à la position (IV), puis les lames sous l'action de la force axiale du taillant se déplacent à la position (V) et le cycle recommence jusqu'au choc suivant.

Le processus de destruction peut varier en fonction de la force axiale, de l'angle de rotation entre les coups et de l'énergie d'un choc. En effet, si par exemple, l'angle de rotation entre les coups successifs est inférieur à l'angle critique, l'arrêt de l'outil peut avoir lieu. C'est pourquoi la détermination des paramètres rationnels du processus de forage est un problème important.

Il est à noter que dans ce cas, la destruction est réalisée à l'aide de l'outil à lames, ce qui ne nous permet pas de l'utiliser directement, car dans les conditions des carrières de calcaire algériennes, on utilise le plus souvent l'outil à pastilles pour la destruction de la roche. Il est évident que la forme de la surface de travail de l'outil porte l'empreinte sur les régularités du processus étudié.

I.4. Influence des différents facteurs sur l'efficacité du forage

Les variables utilisées pour prédire la vitesse de pénétration pourraient être classées en trois catégories principales : les caractéristiques de l'outil de forage, les caractéristiques de la roche et les variables opérationnelles. Les variables opérationnelles connues sous le nom de paramètres contrôlables sont la vitesse de rotation, la poussée, la fréquence de soufflage et le rinçage. Cependant, les propriétés de la roche telles que la résistance à la compression, la porosité, la densité et les conditions géologiques sont paramètres incontrôlables [38-40].

I.4.1. Les propriétés de la roche

I.4.1.1. Etude théorique sur l'influence des propriétés de la roche sur la vitesse de pénétration

Un certain nombre de géoscientifiques ont étudié la relation entre la vitesse de pénétration et les propriétés de la roche. Protodyakonov [41] a mis au point des tests de chute et décrit le coefficient de la résistance de la roche, utilisé afin de mesurer la résistance de la roche au choc. Tandanand et Unger [42], Rabia et Brook [43] ont ensuite modifié le test de Protodyakonov. Paone et al. [44], ont mené des travaux de recherche sur les études de forage par percussion dans le champ. Ils ont conclu que la résistance à la compression uni-axiale (UCS), la résistance à la traction, la dureté du Shore statique et le module de Young statique sont assez bien corrélés avec la vitesse de pénétration des sondeuses à percussion dans les roches abrasives minces et dures. Wilbur [45] a souligné que la dureté de Mohs, la texture, la fracture et la structure de la masse rocheuse étaient des paramètres importants pour le forage. Howarth et al. [46] ont effectué des tests de forage percutant sur dix roches sédimentaires et cristallines. Ils ont établi une corrélation entre la vitesse de pénétration et les propriétés de la roche et ont constaté que la densité apparente, la résistance à la compression, la porosité apparente, la vitesse de l'onde (P) et la valeur du marteau de Schmidt montrent de fortes relations avec la vitesse de pénétration. Jimeno et al. [47] ont introduit la dureté, l'origine des roches, la résistance à la compression uni-axiale (UCS), l'élasticité, la plasticité, l'abrasion ainsi que la texture et la structure de la masse rocheuse comme paramètres du forage. Osanloo [48] a étudié la force de cohésion, la porosité, la densité, la texture, la résistance à la compression uni-axiale (UCS), le RQD (désignation de la qualité de la roche), l'élasticité, la plasticité, la rigidité, la dureté et la structure de la masse rocheuse lors du forage.

Kahraman et al. [49], en plus de présenter un nouvel indice de forabilité, ils ont étudié différents paramètres tels que la résistance à la compression (UCS), la résistance à la traction, l'indice de charge ponctuelle, la dureté au marteau de Schmidt, la vitesse de l'onde (P), le module d'élasticité et la densité. Hoseinie et al. [50] ont développé un indice de classification de la masse rocheuse permettant d'évaluer la capacité de forage de la masse rocheuse en tant que RDi (Rock Drillability Index). Néanmoins, les classifications antérieures de forabilité qui ont principalement porté sur les propriétés intactes de la roche, cet indice prend en compte les données géologiques archivées, y compris les paramètres de liaison des roches de la masse rocheuse, ainsi que les propriétés physico-mécaniques des roches. Néanmoins, les classifications antérieures de forabilité qui ont principalement porté sur les propriétés intactes de la roche.

Mohammad Ataei et al [51] ont mis au point un nouveau modèle associant non seulement les propriétés mécaniques des roches intactes, mais également les propriétés

structurelles des masses rocheuses. Ce modèle pourrait atteindre de meilleures prévisions par rapport au leur modèle précédent.

I.4.1.2. Etude expérimentale de l'influence des propriétés de roche dans la carrière de Hadjar-Soud

I.4.1.2.1. Situation du gisement

La carrière de calcaire de Hadjar-Soud est située à 59 km d'Annaba et à 114 km de Constantine. Le gisement de calcaire en question fait partie d'une structure anticlinale, le pendage du calcaire varié de 40° à 80° , et les coordonnées Lambert du centre du gisement sont : $x = 907$ à 908 , $y = 897$ à 398 [52].



- Carrière d'argile Oued Kebir
- Carrière de calcaire Djebel Safia
- Cimenterie Hadjar Soud

Figure I. 8. Extrait de la carte routière région Azzaba [53].

I.4.1.2.2. Géologie du gisement

Le mont Safia (**Djebel Safia**) est constitué par des formations géologiques plissées du jurassique et crétacé qui sont affectées par un bombement anticlinal. Elles se distinguent comme suit [53] :

A. Lias

1. La dolomie du lias

Ces roches constituent tout le flanc sud-ouest du Djebel Safia. La composition est variable, les teneurs en $MgCO_3$ peuvent varier de 6 à 40 %. Les dolomies affleurent à partir de la côte plus de 240 m et constituent une bande longue de 2 km et une largeur qui varie de 50 à 200 m. La puissance de la couche dolomitique varie de 60 à 80 m. Les dolomies sont compactes, présentent un aspect massif à grains fins et une couleur grise à nuance brune.

2. Calcaire du lias

Il s'agit d'une formation, d'une succession de calcaires cristallins massifs. Sa puissance varie de 100 à 200 m. Dans leur partie inférieure, les calcaires sont compactes et de couleur claire. Par contre dans sa partie inférieure, les calcaires passent à une couleur gris-bleuâtre. La porosité des calcaires est faible et leur poids volumique est 2.70 t/m^3 . Ce calcaire forme la butte du Djebel Safia. Il est pur et homogène (55.6 % de CaO).

B. Jurassique

Il s'agit d'une formation qui affleure d'une manière discontinue sur le flanc nord-est du Djebel Safia. Elle est constituée de :

- Calcaires à silex : ce calcaire est très hétérogène, très siliceux (puissance 14 m).
- Mamo-calcaire siliceux : cette couche se distingue par une grande hétérogénéité de composition (puissance 15 m).

C. Crétacé

1. Calcaires marneux (puissance 200 m) et les marnes (puissance 100 m) du crétacé inférieur : cette formation est disposée au pied de Djebel Safia.

2. Grés, schistes flysch crétacé supérieur (puissance 20 m) : les formations du jurassique et du crétacé sont situées dans la partie nord du gisement. La couverture est représentée par la couche végétale et par les blocs de calcaires de puissance variant de 0 à 0.5 m [50].



Figure I. 9. Les différentes formations rocheuses de Hadjar-Soud de lieu de travail.

I.4.1.2.3 Analyse des propriétés physico-mécaniques des roches influant sur le processus de forage

Un forage des trous a été effectué avec deux sondeuses roto-percutantes INGERSOLL RAND CM-780D et FLEXIROC D50, après les travaux de tirs, nous avons prélevé un nombre d'échantillons des quatre coins de lieu de travail.

Au cours de la collecte des échantillons, chaque bloc a été inspecté à la recherche de défauts macroscopiques afin de fournir des éprouvettes exemptes de fractures. Pour chaque analyse effectuée cinq échantillons de roches différents ont été traités au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction « (L.H.C) de Skikda », la taille des blocs de roche était d'environ 16 cm × 32 cm.

A. Indice d'abrasivité

L'essai des roches sur l'abrasivité a été réalisé d'après la méthodologie proposée par L. Baron et A. Kouznotsov [54]. L'essence de celle-ci consiste à frotter une tige d'acier sur une des facettes de l'échantillon de la roche et à déterminer la perte du poids de la tige lors de l'expérience. Ce qui revient à dire que le critère de l'abrasivité est une perte sommaire de poids d'une tige en acier (mg) durant 10 minutes de frottement. L'expérience a été faite avec une force axiale de 15 kgf et une vitesse de rotation de 400 tr/min créant le frottement de la tige.

La tige de mesure est fabriquée en acier non trempé. Avant l'essai, la tige est pesée à l'aide d'une balance analytique avec la précision de 0.1 mg. Après avoir effectué les essais durant 10 minutes nous déplaçons la tige de manière à ce qu'elle soit retournée de l'autre bout, puis nous refaisons l'opération pendant 10 minutes.

L'indice de l'abrasivité est calculé d'après la formule:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (P_{1i} - P_{2i})}{2N}; (mg) \quad (I.5)$$

Où :

- N : nombre d'essais de chaque échantillon ;
- P_{2i} : masse initiale de l'échantillon ;
- P_{1i} : masse finale de l'échantillon.

D'après les relevées des essais réalisés, nous avons obtenu les résultats suivants (tableau I.1). En comparant ces résultats avec les recommandations de la classification proposée par L. Baron, nous pouvons dire que les calcaires de la carrière de Hadjar-Soud se rapportent à la première classe, c'est-à-dire d'une très faible abrasivité.

B. Indice de la résistance à l'empreinte

La détermination de l'indice de la résistance à l'empreinte a été effectuée au moyen d'une presse mécanique de type -HRC, l'éprouvette de la roche est chargée par un étampe. L'étampe est fabriqué en acier trempé, lors des essais on augmente la charge sur l'étampe jusqu'au moment de formation d'un poquet dans l'échantillon. L'indice de la résistance à l'empreinte est déterminé à l'aide de la formule suivante:

$$P_k = \frac{\sum F_i}{N \times S}; [kgf / mm^2] \quad (I.6)$$

Où :

- F_i : charge au moment de la formation du poquet, [kgf];
- S : aire de la section transversale de l'étampe, [mm²];
- N : nombre d'essais de chaque échantillon.

D'après les résultats des essais présentés dans le tableau I.1, les roches étudiées ont une résistance à l'empreinte moyenne de 107 kgf/mm², d'après la classification de L. Baron et L. Gltman [55], ces roches se rapportent à la classe appelée "dureté moyenne".

C. Indice de la résistance à la compression

La résistance à la compression est déterminée en posant un échantillon sur la table d'une presse hydraulique puis on lui applique une charge sans cesse jusqu'à l'écrasement total de ce dernier, puis on calcule la résistance avec la formule suivante :

$$R_c = \frac{\sum F_i}{N \times S}; \left[\text{kgf} / \text{cm}^2 \right] \quad (I.7)$$

Où :

- F_i : charge appliquée, [kgf] ;
- S : section de la tige de la presse [cm²];
- N : nombre d'essais de chaque échantillon.

Tableau I. 1. Les Propriétés physico-mécaniques du calcaire de Hadjar-Soud.

Parties du gisement de forage traité	Abrasivité (a) ; [mg]	Résistance à la l'empreinte (P_k) ; [kgf /mm ²]	Résistance à la compression (R_c) ; [kgf /cm ²]
1	2,7	108	681
2	2,4	96	636
3	3,1	117	732

I.4.1.2.4. Résultat et discussion

La réalisation de forages roto-percutant a été réalisée sur un terrain de profondeur de quatre mètres recoupant des terrains de calcaire du lias, de dolomie de lias ainsi que du calcaire à silex du jurassique. L'étude de cette expérimentation a soulevé les constatations suivantes :

A. Influence de l'abrasivité sur la vitesse de pénétration

Les valeurs d'abrasivité des différentes roches testées sont données dans le tableau I.1, l'étude de l'influence de l'abrasivité sur la vitesse de pénétration a été effectuée à une pression d'alimentation d'air de 17 bar, une poussée spécifique d'avance de 50 kgf /cm² et

une vitesse de rotation de 50 tr/min pour deux sondeuses roto-percutantes ayant un diamètre d'outil de coupe différent.

Les roches ayant une plus grande abrasivité entraînent une usure accrue de l'outil de forage et une diminution de la vitesse de pénétration. Par conséquent, l'abrasivité de la roche augmente, la vitesse de pénétration décroît de manière non linéaire pour toutes les roches considérées. L'abrasivité était une propriété plus prédominante de la roche qui affecte la vitesse de pénétration dans le forage. Il en résulte une diminution de la vitesse de pénétration provoquée par l'augmentation de l'abrasivité pour les roches de calcaire [56].

Les calcaires de la carrière de Hadjar-Soud a une très faible abrasivité donc une très faible abrasivité n'entraînent aucune diminution de la vitesse de pénétration.

B. Influence de la résistance à la compression R_c et la résistance à l'empreinte P_k

Les valeurs de la résistance à la compression et la résistance à l'empreinte de différentes roches testées sont présentées dans le tableau I.1. L'étude de l'influence de la résistance à la compression R_c et la résistance à l'empreinte P_k sur la vitesse de pénétration ont été effectuées à une pression d'alimentation d'air de 17 bar, une poussée spécifique d'avance de 50 kgf/cm² et une vitesse de rotation de 50 tr/min pour deux sondeuses roto-percutantes ayant un diamètre d'outil de coupe différent.

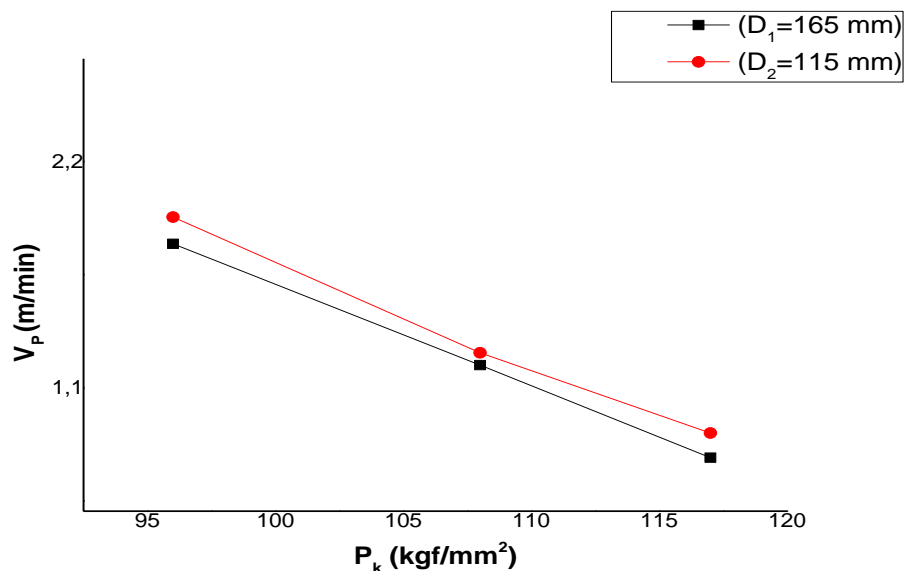


Figure I. 10. Influence de la résistance à l'empreinte (P_k) sur la vitesse de pénétration pour différents roches de calcaires de Hadjar-Soud.

Il a été observé qu'avec l'augmentation de la résistance à la compression et la résistance à l'empreinte, la vitesse de pénétration décroît de manière non linéaire pour toutes les roches considérées. Les roches ayant plus de résistance à la compression et plus de résistance à l'empreinte offrent plus de résistance à la pénétration. Par conséquent, la vitesse de pénétration diminue alors que la résistance à la compression et la résistance à l'empreinte augmentent pour les roches examinées.

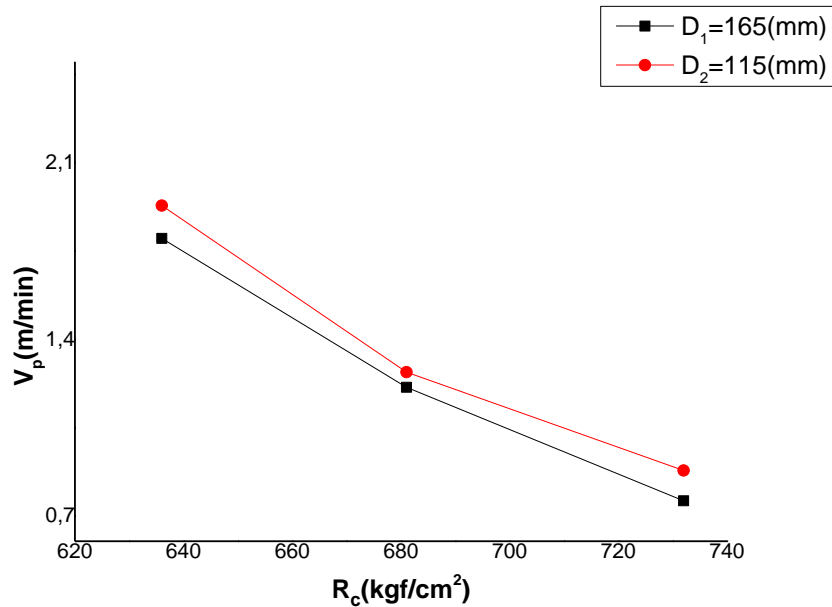


Figure I. 11. Influence de la résistance à la compression (R_c) sur la vitesse pénétration pour différents roches de calcaires de Hadjar-Soud

I.4.2. Influence des propriétés géométriques de l'outil de forage sur la vitesse de pénétration

I.4.2.1. Etude théorique

La nature de l'outil : type, diamètre, degré d'usure influent également sur les valeurs de la vitesse de pénétration.

I.4.2.1.1. Type de l'outil

Il existe sur le marché de nombreux type d'outil qui peuvent être utilisés pour l'exécution de forage destructifs, leurs caractéristiques dépendent de la vitesse d'avancement, certains types d'outils plus performants que d'autres, par exemple des taillants à boutons ont un rendement supérieure de 10 à 15 % à celui des taillants classiques [57].

J.B.Cailleux [57] a testé quatre types d'outils différents lors de l'exécution de forages destructifs avec enregistrement des paramètres.

Les outils utilisés sont comme suit :

1 - Un tricône diamant Boart type « 232-025-2 » présente des dents longues et espacées. Ce type d'outil préconisé par le fabricant pour les terrains tels que calcaire, argile, dont la résistance en compression est comprise entre 35 et 130×10^5 Pa.

2. Un tricône type « 232-026-2 » présente des dents plus petites et plus serrées. Ce type d'outil est destiné pour les terrains moyennement durs et peu abrasifs (calcaire, anhydrite), dont la résistance en compression est comprise entre 210 et 420×10^5 Pa.

3. Un trépan à lames type « CC 3 lames » pour terrain tendre.

4. Un trépan à lames types « CS 3 lames » pour roches dures.

Ces différents types d'outil d'un diamètre de 100 mm ont été utilisés pour la réalisation de forages destructifs profonds d'une quarantaine de mètres recoupant des terrains marna-argileux, du gypse saccharoïde ainsi que des zones de bourrage de vides.

- Avec un tricône type « 232-025-2 », la vitesse de pénétration obtenue dans le gypse saccharoïde est entre 15 à 20 m/h avec une poussée sur l'outil de l'ordre de 42×10^5 Pa. Dans les marnes la vitesse de pénétration est de l'ordre de 100 m/h à 300 m/h par contre dans les éboulis, elle atteint 400 à 600 m/h.
- Avec le tricône type 232-026-2 (terrains moyens), la vitesse de pénétration obtenue dans le gypse est légèrement supérieure $V = 30$ à 40 m/h à une poussée sur l'outil de 42×10^5 Pa. Par contre dans les marnes on obtient des vitesses du même ordre $V = 100$ à 200 m/h et dans les éboulis on atteint 700 m/h.
- Avec le trépan « CC » étagé à 3 lames (terrain tendre), la vitesse de pénétration relevée dans le gypse saccharoïde varie entre 10 et 20 m/h. Dans les marnes la vitesse de pénétration peut atteindre 300 m/h et 700 m/h dans les éboulis.
- Au trépan « CS » à 3 lames (roches dures), la perforation dans le gypse, aux mêmes conditions de poussée sur l'outil, est légèrement supérieure : elle est de l'ordre de 30 m/h. Par contre dans les marnes on reste dans une plage de vitesse comprise entre 100 et 300 m/h et pour les éboulis on se situe également entre 500 et 700 m/h.

J.B.Cailleux [57] a été prouvé avec ses essais de forage avec différents types d'outil que l'on peut obtenir des vitesses de pénétration légèrement différentes : cela a été mis en évidence dans le gypse où la vitesse peut passer de 15-20 m/h à 30-40 m/h, selon que l'on utilise un tricône « terrain tendre » ou un tricône « terrain moyen ».

I.4.2.1.2. Diamètre de l'outil

L. Pascal [58] a montré, par exemple, qu'un marteau perforateur H60 avec les mêmes réglages de rotation, la frappe et la poussée, la vitesse de pénétration dans une même roche (arkose) chutait de 90 m/h à 18 m/h selon que a forais respectivement en diamètre de 127 mm, avec le Roc710, la vitesse de pénétration dans un granit est de 60 m/h avec un taillant à bouton de 64 mm ,elle n'est plus que 30.6 m/h avec un même type d'outil de diamètre de 89 mm. Ces deux exemples montrent bien l'influence de diamètre de l'outil sur les valeurs de la vitesse de pénétration [57].

I.4.2.2. Étude expérimentale de l'influence de diamètre de l'outil sur la vitesse de pénétration

L'influence du diamètre de l'outil (115 mm et 165 mm) sur la vitesse de pénétration a été également analysée. Cette analyse a été réalisée en mesurant la vitesse de pénétration à une pression d'air constante de 17 bar et à une pression spécifique d'avance à trois niveaux, variant avec un pas de 5 kgf /cm², pour les différentes roches testées avec une profondeur de trou égale à douze mètres.

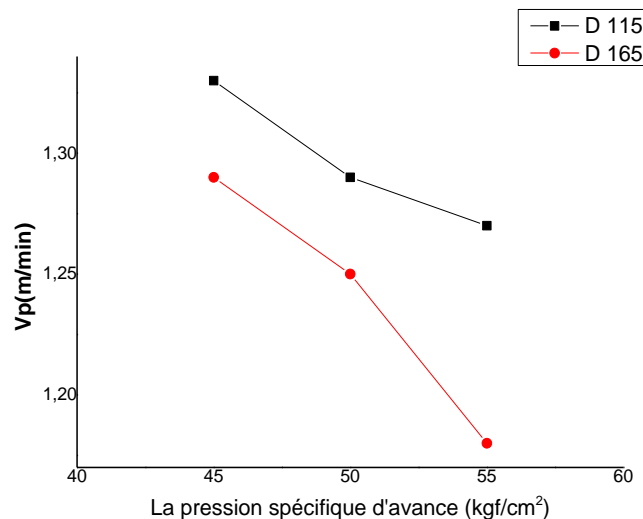


Figure I. 12. L'effet de diamètre de l'outil sur la vitesse de pénétration.

Ceci est illustré à la figure I.12. Il a été observé qu'avec une augmentation du diamètre de l'outil de forage, la vitesse de pénétration diminuait pour toutes les roches considérées. Ceci est expliqué par l'effet de la zone de contact (outil-roche). La force exercée est identique (pression d'air et pression spécifique de poussée) cependant, la zone de contact diminuera lorsque le diamètre de l'outil diminue, ce qui entraîne une augmentation de

l'énergie disponible pour la pénétration car l'énergie développée est le rapport de la force exercée entre la surface de contact (outil-roche) et la surface de l'outil.

I.4.3. Influence des paramètres de réglage sur la vitesse de pénétration

I.4.3.1. Etude théorique sur l'influence des paramètres de réglage sur la vitesse de pénétration

Influence des paramètres de réglage sur l'efficacité de forage est l'intérêt de plusieurs chercheurs, d'après H.Cambefort [59], il a montré que la vitesse de pénétration est proportionnelle à la poussée sur l'outil et augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation mais cette augmentation n'est pas d'une façon proportionnelle avec la vitesse de pénétration.

La figure I.13 et la figure I.14 représentent les résultats obtenus à partir d'essais en carottage sur un calcaire. Pour un même matériau, et avec une même vitesse de rotation, la valeur de la vitesse de pénétration de l'outil de forage peut passer de 1 à 5 lorsque la poussée croit dans le même rapport.

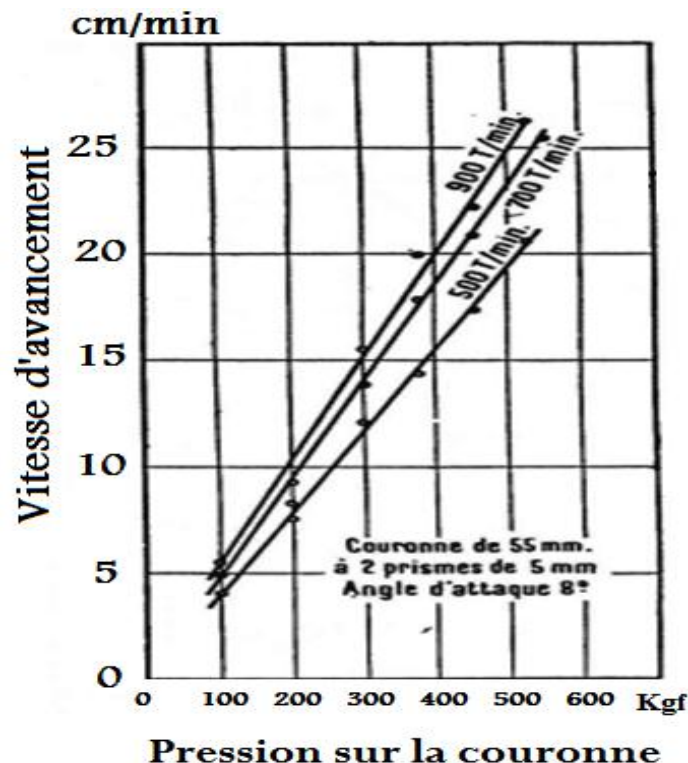


Figure I. 13 . Influence de la pression sur la couronne sur la vitesse d'avancement dans du calcaire (Solétanche)[57].

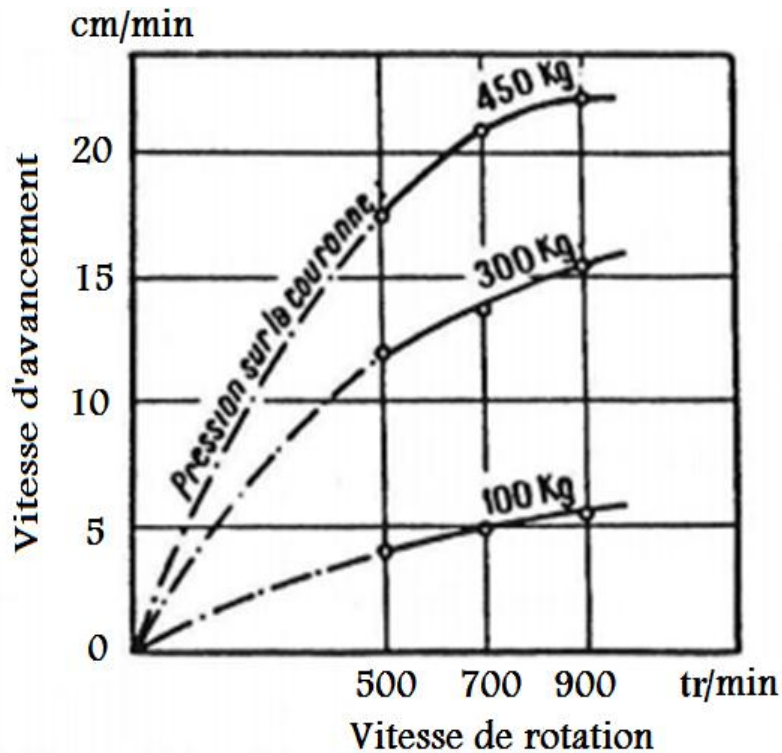


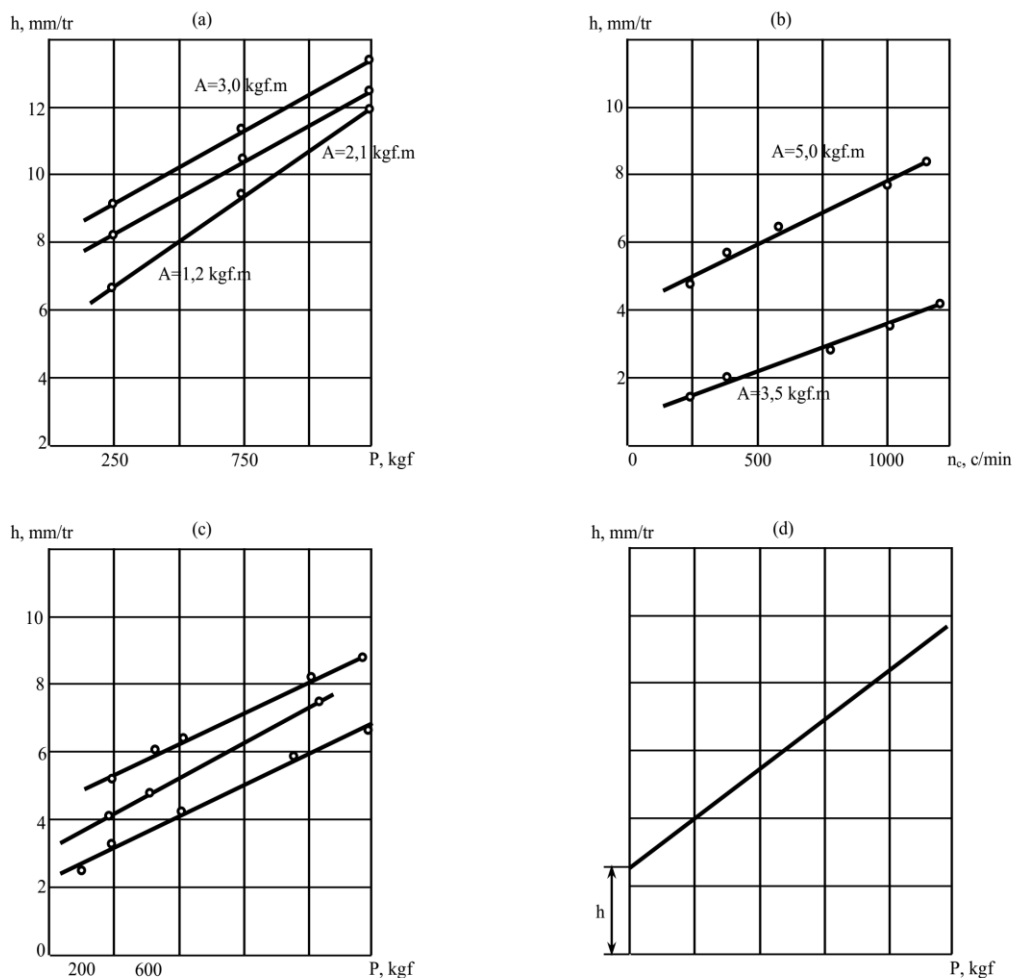
Figure I. 14. Influence de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement dans du calcaire (Solétanche) [57].

En généralisant les résultats des recherches [60,61] nous pouvons déterminer l'influence des paramètres du régime de forage par rapport à l'efficacité de l'utilisation des sondeuses roto-percutantes. L'analyse de ces travaux montre que la poussée axiale (P) influe sur l'avancement de l'outil (h) selon la loi linéaire (figure I.15.a). L'accroissement de l'énergie et de la fréquence de coups augmente l'avancement de l'outil. Par exemple, si on a $P = 1000$ kgf, le changement de l'énergie d'un choc (A) est de (1,2 - 3,0) kgf.m (figure I.15.a) donne l'accroissement de (h) est de (9 -11) mm/tr, c'est à dire 22%. L'augmentation de l'énergie d'un choc de 3,5-5 kgf.m (figure I.15.b) avec l'augmentation parallèle de la fréquence de coups de 1800-3100 coup/min provoque l'accroissement de la pénétration de l'outil de 2-3 fois.

Pendant le forage des roches élastiques (calcaire), l'influence de l'énergie d'un choc sur l'efficacité de la destruction est déterminée par la force axiale (figure I.15.c). Il existe aussi l'influence de la vitesse de rotation de la tige (n) sur l'avancement de l'outil.

Pendant le forage des grés avec la dureté (f est entre 5 et 6), l'abaissement de la vitesse de rotation peut varier de 100 à 300 tr/min provoque l'augmentation de la pénétration de l'outil en deux fois. Ce phénomène s'explique par le changement de l'angle de rotation entre deux coups.

En se basant sur les régularités considérées du processus de forage roto-percutant, la relation généralisée « $h = f(P, A, f, \gamma)$ » peut être présentée sous la forme d'une ligne inclinée par rapport aux axes des coordonnées " h et P " (figure I.15. d). La valeur de (h_1) correspond à l'avancement de l'outil quand il manque de poussée axiale. Ce régime de forage est le même que celui percutant. Quand on élimine les coups sur la tige de forage on a le régime de forage rotatif. La représentation de la figure (I.15. d) montre que l'avancement de l'outil pendant le forage roto-percutant est plus important que lors du forage percutant pour les mêmes valeurs de A , n_c et le forage rotatif pour la même valeur de P .



h : l'avancement de l'outil de forage, (mm/tr) ;

P : force axial, (kgf) ;

n_c : nombre du coup, (c/mn).

Figure I. 15. Influence de différents facteurs sur l'efficacité de forage roto-percutant [59 ,60].

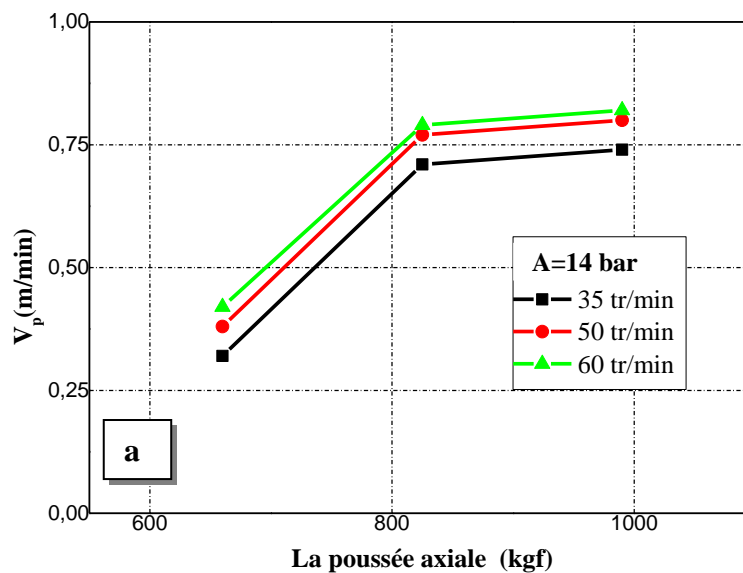
I.4.3. 2. Etude expérimentale de l'influence des paramètres de réglage des sondeuses sur la vitesse de pénétration (étude de notre cas)

Le forage est effectué avec une sondeuse roto-percutante INGERSOLL RAND CM-780D pour une profondeur de douze mètres, on prend en considération pour le choix du lieu de travail le type de la formation rocheuse (calcaire du Lias) où les propriétés de la roches sont homogènes.

I.4.3.2.1. Influence de la pression d'alimentation sur la vitesse de pénétration

L'influence de la pression d'alimentation en air (14 jusqu'à 17 bar) sur la vitesse de pénétration pour trois variations de la vitesse de rotation de train de tige et plusieurs variations des forces axiales variant de 660 jusqu'à 990 kgf d'un pas de 165 kgf est présentée sur la figure I.16 (a, b et c), on a observé clairement que la vitesse de pénétration s'accroît linéairement avec l'augmentation de la pression d'alimentation d'air lorsque la force axiale varie entre 660 et 825 kgf.

Au-delà de 825 kgf de la force axiale et pour une vitesse de rotation de tain de tige comprise entre 50 et 60 tr/min, la vitesse de pénétration décroît avec l'augmentation de la pression d'air ceci à cause de la naissance des vibrations et l'usure importante.



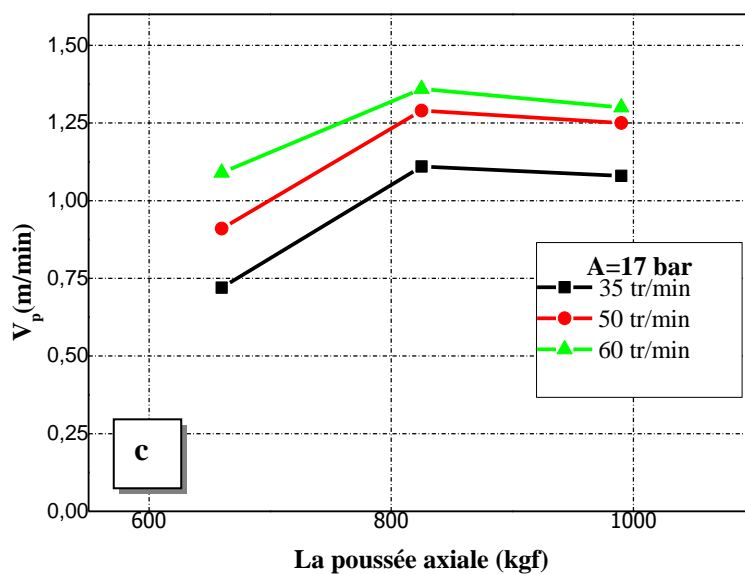
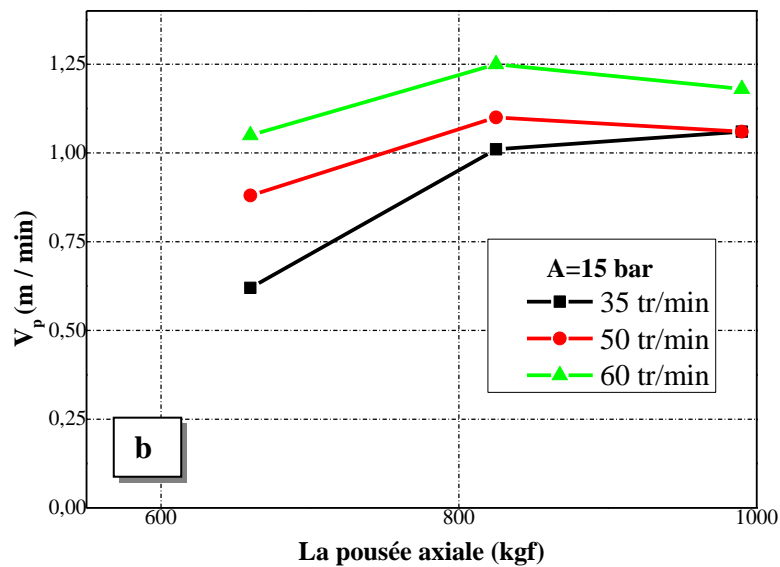


Figure I. 16. (a,b,c) .Influence de la pression d'alimentation sur la vitesse de pénétration.

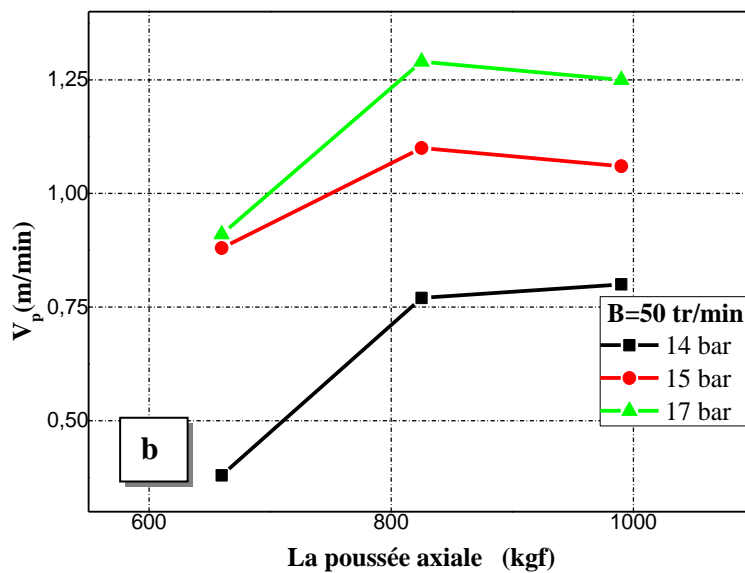
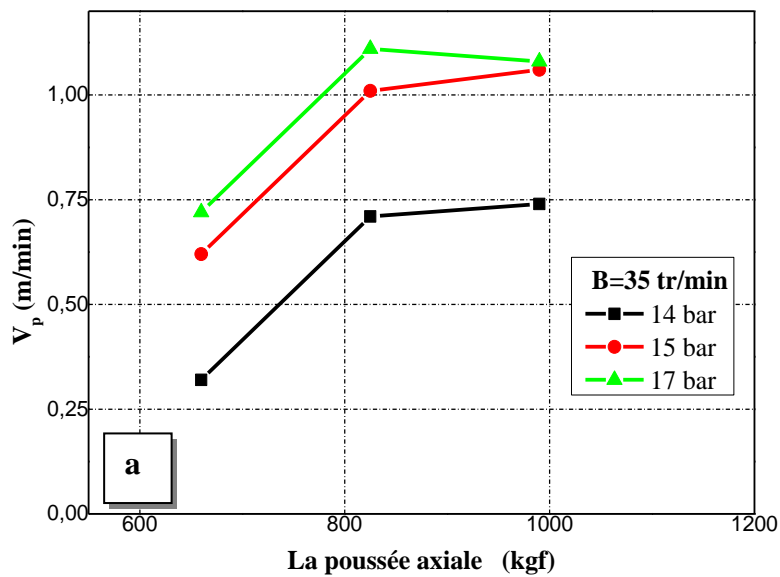
I.4.3.2.2. Influence de la vitesse de rotation de tain de tige sur la vitesse de pénétration

L'influence de la vitesse de rotation de tain de tige (35 jusqu'à 60 tr/min) sur la vitesse de pénétration pour trois variation de la pression d'alimentation du marteau 14 bar jusqu'à

17 bar à différentes forces axiales variant de 660 jusqu'à 990 kgf d'un pas de 165 kgf est illustrés dans la figure I.17 (a, b et c).

On observe clairement que la vitesse de pénétration s'accroît linéairement avec l'augmentation de la vitesse de rotation lorsque la force axiale varie entre 660 et 825 kgf.

Au-delà de 825 kgf de la force axiale et pour une pression d'alimentation d'air comprise entre 15 et 17 bar, la vitesse de pénétration décroît avec l'augmentation de la vitesse de rotation, ceci est dû à la naissance des vibrations et d'usure importantes.



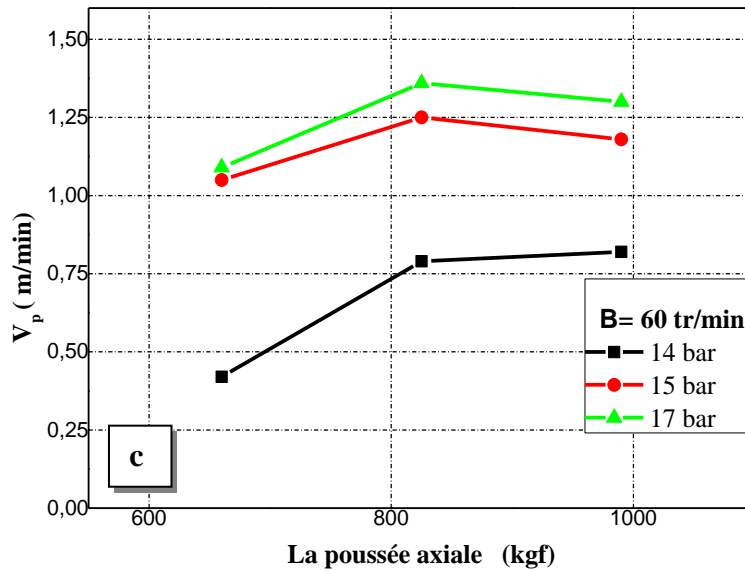


Figure I. 17. (a,b,c).Influence de la vitesse de rotation de tain de tige sur la vitesse de pénétration.

Cette étude n'a pas permis aux courbes d'essai de forage roto-percutant de détecter les effets significatifs des paramètres de réglage dans cette carrière. Cependant, elle a permis, même visuellement, de mettre en évidence les effets de la poussée axiale, de la pression d'alimentation en air et la vitesse de rotation sur la vitesse de pénétration. Par conséquent, afin de mieux comprendre et déterminer les effets de différents facteurs et leurs interactions possibles, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences (la méthode de Taguchi et la méthodologie de surface de réponse) et des outils d'analyse statistique.

I.5. Planification expérimentale

La planification expérimentale regroupe un ensemble de techniques statistiques destinées à analyser le comportement d'un système expérimental dans le but de comprendre et d'améliorer son fonctionnement. Dans le domaine industriel en particulier, l'utilisation des plans expérimentaux est en développement constant et peut servir de support pour l'optimisation des procédés de fabrication et de contrôle, comme dans le cas qui nous intéresse, ainsi que pour la formulation des produits [62].

La planification expérimentale consiste à imposer aux entrées du processus des variations particulières et mesurer les variations induites en sorties afin de déduire les relations de causes à effets. Elle peut donc être considérée comme un système donnant l'expression d'une ou plusieurs réponses dépendamment d'un certain nombre de facteurs. Les réponses de ce système sont constituées, généralement, de variables qui serviront à

l'optimisation. Ces variables d'entrées du système qui doivent varier indépendamment les unes des autres lors de l'expérimentation, sont appelées facteurs [63].

I.5.1.Méthode mono-objectif (Méthode de Taguchi)

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommée méthode Taguchi qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à effectuer pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une longue procédure qui pourra être complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standards, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plans d'expériences [64].

Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables [65].

I.5.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [66] :

- **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- **Etape 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- **Etape 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.
- **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignait les réponses dans un tableau.
- **Etape 5** : calculer le rapport [S/B] et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- **Etape 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener

(réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.)

I.5.1.2 Le choix d'une matrice de Taguchi

Afin de choisir une matrice existante, il faut calculer le nombre minimum d'essais à effectuer. Ce calcul est basé sur la notion de degré de liberté (*ddl*) qui est défini mathématiquement comme suit :

- le (*ddl*) d'un facteur est égal au nombre de ces niveaux moins un;
- le (*ddl*) d'une interaction est égal au produit des (*ddl*) des facteurs qui la compose;
- le (*ddl*) d'un modèle est égal à la somme des (*ddl*) des facteurs et des interactions;
- le (*ddl*) d'un plan est égal au nombre d'essais moins un.

I.5.2. La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR)

La méthodologie de surface de réponse (MSR) (en anglais : Response Surface Methodology) est une combinaison des techniques statistiques et mathématiques utiles pour le développement, l'amélioration et l'optimisation des processus [67, 68]. Elle est largement utilisée dans le monde industriel, particulièrement lorsque plusieurs variables d'entrée influencent les résultats (les variables de sortie). La méthodologie de surface de réponse est connue sous d'autres noms, par exemple « modèle de régression polynomiale » ou « modèle polynomial ».

Dans cette méthodologie, les modélisations de la fonction réponse peuvent également servir de base à la recherche de conditions optimales. On parle alors d'optimisation indirecte. L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. La modélisation d'une surface de réponse s'appuie sur l'analyse de la variation des résultats d'essais obtenus suite à un plan d'expérience [69].

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes [70]:

- Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie voulues;
- Adopter un plan de conception expérimentale ;
- Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de Méthodologie de surface de réponse (MSR) ;

- Analyser par (ANOVA) les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse;
- Déterminer la forme du modèle mathématique appropriée;
- Optimiser les paramètres d'entrée et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

I.6. Analyse statistique

I.6.1 Analyse de la variance

Les valeurs des réponses doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur la variation constatée de la réponse. La principale méthode statistique répondant à cet objectif est l'analyse de la variance. L'analyse de la variance (en anglais : Analysis Of Variance, ANOVA) nous permet de déterminer à partir de quel seuil un effet peut être considéré comme significatif. Pour ce faire, il faut comparer la variation d'un facteur pris en compte dans le modèle avec la variance résiduelle. Lorsque le facteur n'est pas pris en compte dans le modèle, l'effet du facteur est alors contenu dans la variance résiduelle. La variation de la variance résiduelle permet de déterminer si le facteur a une influence significative sur la réponse, c'est-à-dire si au moins une des variables associées à chacun des niveaux des facteurs a un effet non nul. La contribution de la variable x_i à la variation de y se détermine de différentes manières [69] :

I.6.1.1. Calcul de la variance des facteurs et interactions

La variance est une mesure de dispersion qui est la somme des carrés des écarts (SCE) des observations par rapport à leur moyenne, divisée par un nombre égal au nombre d'observations moins un (nombre de degrés de liberté ddl_i). La variance de l'échantillon est un estimateur sans biais de la variance de la population (NF ISO 3534-1) [71].

« D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et en une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième » [72].

Supposons que nous disposions de N observations désignées par y_{ijk} ($i = 1, \dots, p$; $j = 1, \dots, q$; $k = 1, \dots, n$). Les deux premiers indices concernent les deux facteurs contrôlés (avec respectivement p et q modalités, et donc un nombre total d'objets égal à $p \times q$). Le troisième indice concerne les répétitions (n répétitions de chacun des $p \times q$ objets). Dans ces conditions, nous pouvons calculer $p \times q$ moyennes y_{ij} relatives aux différents objets, p moyennes $y_{i..}$.

relatives aux différentes modalités du premier facteur, q moyennes $\bar{y}_{.j}$ relatives aux différentes modalités du deuxième facteur, et une moyenne générale $\bar{y}_{...}$.

Les éléments successifs du raisonnement sont alors :

Le modèle observé

$$y_{ijk} - \bar{y}_{...} = (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ij..} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.}) \quad (I.8)$$

Cette relation indique que les écarts entre les observations individuelles et la moyenne générale peuvent être considérés comme constitués d'une part d'une composante relative aux différences entre les moyennes observées pour les différentes modalités et la moyenne générale, et d'autre part d'une composante relative aux écarts entre les observations initiales et observées pour les différentes modalités.

Les nombres de degrés de liberté

Le nombre de degrés de liberté associé à un facteur x_i est le nombre de niveaux Nn_i qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1. Les nombres de degrés de liberté sont additifs :

$$Nn_i - 1 = pqn - 1 = (p - 1) + (q - 1) + (p - 1)(q - 1) + pq(n - 1) \quad (I.9)$$

L'équation de l'analyse de la variance

En élevant au carré les deux membres de la relation (I.8) et en sommant pour toutes les observations, on obtient l'équation de l'analyse de la variance :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= qn \sum_{i=1}^P (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + pn \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\ &+ n \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{ij..} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \end{aligned} \quad (I.10)$$

En utilisant l'indice a pour le premier facteur et l'indice b pour le deuxième facteur, l'équation (I.10) s'écrit :

$$SCE_t = SCE_a + SCE_b + SCE_{ab} + SCE_r \quad (I.11)$$

Avec :

- SCE_t : la somme des carrés des écarts totale ;
- SCE_a : la somme des carrés des écarts factorielles a ;
- SCE_b : la somme des carrés des écarts factoriels b ;

- SCE_{ab} : la somme des carrés des écarts de l'interaction $a \times b$;
- SCE_r : la somme des carrés des écarts des écarts résiduels.

Enfin, en divisant les sommes des carrés des écarts par leurs nombres de degrés de liberté, on définit les carrés moyens, à savoir :

- Le carré moyen total : $CM_t = SCE_t / (pqn - 1)$ (I.12) ;

- Le carré moyen factoriel : $CM_a = SCE_a / (p - 1)$ (I.13) ;

- Le carré moyen relatif à l'interaction : $CM_{ab} = SCE_{ab} / (p - 1)(q - 1)$ (I.14) ;

- Le carré moyen résiduel : $CM_r = SCE_r / pq(n - 1)$ (I.15).

Ces quantités sont des mesures, respectivement, de la dispersion de l'ensemble des observations (variation totale), de l'importance des différences existant entre les moyennes relatives aux différentes modalités (variation factorielle), et de l'importance des variations apparaissant à l'intérieur des différentes modalités (variation résiduelle).

I.6.1.2. Analyse de variance résiduelle (ANOVA)

La variance résiduelle est liée aux écarts entre les réponses mesurées et les réponses estimées. Elle permet de juger de la qualité du modèle linéaire indépendamment du nombre d'essais réalisés. L'analyse de la variance permet de déterminer l'aptitude du modèle à décrire les variations de la réponse en comparant les variations expliquées et celles non expliquées par le modèle :

1. La variation expliquée de la réponse correspond à la variance induite par les facteurs et les interactions.
2. La variation inexpliquée de la réponse correspond à la variation résiduelle. La variance résiduelle σ^2 peut être décomposée en deux sources de variabilité :
 - la variabilité intrinsèque du système étudié,
 - la variabilité due à des facteurs aléatoires non contrôlés au cours des essais.

La norme ISO 5725 [73] définit deux estimateurs de la variance σ^2 :

1. l'erreur de répétabilité : c'est la dispersion des résultats obtenus avec la même méthode de mesure, le même observateur, les mêmes instruments de mesure, le même lieu, les mêmes conditions d'utilisation, en effectuant les répétitions sur une courte période de temps,
2. l'erreur de reproductibilité : c'est la dispersion des résultats observée en faisant varier à chaque répétition les méthodes de mesure, les observateurs, les instruments de mesure, les

conditions d'utilisation, dans différents lieux et en échelonnant les mesures dans le temps, les répétitions.

I.6.2. Test de Fisher-Snedecor

Le test Fisher-Snedecor est un test qui permet de comparer les variances de deux échantillons statistiques. Cette loi a été tabulée par M. Snedecor qui lui a donné le nom de loi de Fisher-Snedecor en l'honneur du statisticien Fisher. Pour conclure que l'effet d'un facteur (a), par exemple, est significatif, nous cherchons à montrer que CM_a est supérieure à CM_r .

L'hypothèse H_0 , appelée hypothèse nulle, consiste à vérifier l'absence d'influence du facteur étudié.

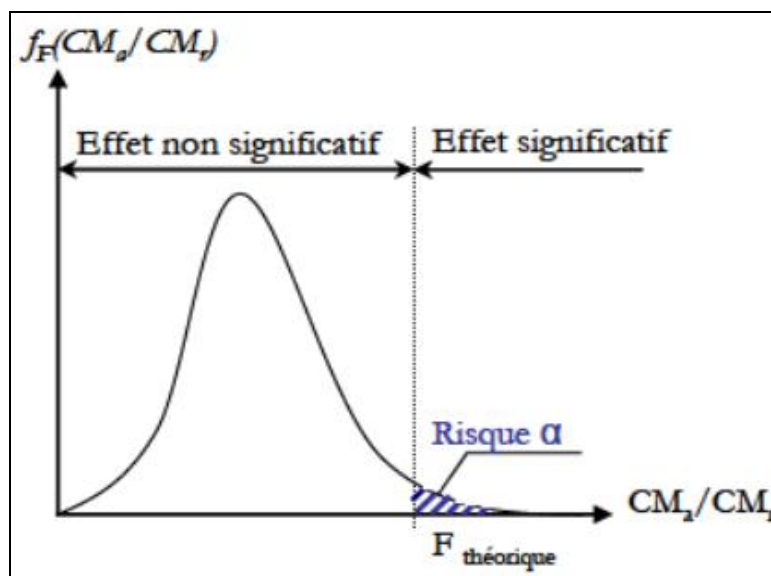


Figure I. 18. Représentation de la loi de Fisher-Snedecor [74].

La figure I.18 montre que dans le cadre de l'hypothèse nulle (où le facteur n'est pas influent), le rapport peut être égal à l'infini. Cependant, la probabilité est très faible. Pour conclure sur un effet, il faut donc prendre le risque de conclure que cet effet est significatif alors que nous sommes dans le cadre de l'hypothèse nulle. Nous le noterons risque (α). Il est généralement fixé à 5%. En fonction du risque (α), la loi de Fisher-Snedecor détermine un seuil de refus de l'hypothèse nulle que l'on appellera $F_{\text{théorique}}$. Ce test consiste donc à comparer le rapport entre CM_a et CM_r , noté (F_{obs}) avec la valeur $F_{\text{théorique}}$ que nous trouvons dans le tableau lié à la loi de Fisher-Snedecor, en fonction :

- de ddl_a et ddl_r , degrés de liberté du facteur étudié et de la résiduelle ;
- du risque (α) que l'on choisit.

I.6.3. Probabilité

La Probabilité ou « Prob » est la probabilité d'obtenir la même valeur (ou une valeur encore plus extrême) du test si l'hypothèse nulle était vraie. Si cette valeur « Prob » est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini (traditionnellement 5%), on rejette l'hypothèse nulle [75]. En d'autres termes, la valeur « Prob » est la probabilité de commettre une erreur de première espèce, c'est-à-dire de rejeter à tort l'hypothèse nulle et donc d'obtenir un faux positif.

Elle peut être utilisée comme repère de la confiance qu'on peut avoir dans un résultat particulier. Beaucoup de chercheurs utilisent une « Prob » de moins de 0.05 comme limite de significativité statistique, ce qui revient à dire que le résultat observé dans une étude peut se produire par hasard moins d'une fois en vingt études différentes. La « Prob » peut seulement prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Si elle est inférieure à 0.05 ; on conclut que l'effet est significatif et si elle est inférieure à 0.01, il est possible de conclure que le facteur est hautement significatif.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur quelques travaux de recherches liés à l'optimisation de la vitesse de pénétration ainsi que les paramètres qui l'influencent.

Une première étude a permis, de mettre en évidence seulement les effets des propriétés physico-mécaniques du calcaire de Hadjar-Soud, la géométrie de l'outil de coupe et les paramètres de réglage de forage roto-percutant sur la vitesse de pénétration par conséquent, afin de mieux comprendre, quantifier (la contribution de chaque facteur), les effets de différents facteurs de réglage de forage roto percutant et les interactions possibles entre eux, nous avons envisagé notre études sur les méthodes des plans d'expériences liés en particulier (la méthode de Taguchi et la méthodologie de surface de réponse) et des outils d'analyse statistique.

A la fin de ce chapitre nous avons discuté des moyens d'optimisation et des méthodes de modélisation choisis pour cette étude.

Références bibliographiques

- [1] M. E. O. T, Eren, Real-Time Drilling Rate Of Penetration Performance Monitoring, Offshore Mediterranean Conference, (2011)1.
- [2] J.W. Graham, N.L. Muench, Microbit Analytical Determination of Optimum Bit Weight and Rotary Speed Combinations''. Paper SPE 1349-G presented at the Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers, 4-7 October 1959,Dallas, Texas. DOI: 10.2118/1349-G.
- [3] E.M. Galle, H.B. Woods, Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits , API Drilling and Production Practice, 1960.
- [4] E.M. Galle, H.B. Woods, Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits, API Drilling and Production Practice, 1 January, New York, API-63-048, 1963.
- [5] W.C.Maurer, The Perfect-Cleaning Theory of Rotary Drilling, Journal of Petroleum Technology, 14(11) (1962) 1270-1274, SPE-408-PA.
- [6] E. Gholamreza, N. Ciências, M. Santa, Development of an imperialist competitive algorithm (ICA)-based committee machine to predict bit penetration rate in oil wells of Iran, Ayub Abbasi Garavand1, 37 (1) (2015), 173-182.
- [7] O.E.Mechem, H.B.Jr. Fullerton, Computers invade the rig floor, Oil and Gas Journal, (1965) 14.
- [8] M.G. Bingham, New Approach to Interpreting Rock Drillability, Petroleum Publishing Company, Tulsa ,1965.
- [9] T. Hemphill, R.K., Clark, The Effects of PDC Bit Selection and Mud Chemistry on Drilling Rates in Shale'',SPE Drilling & Completion, 9 (3) (1994)176-184, SPE-22579-PA.
- [10] H.R. Motahhari, G. Hareland, R. Nygaard, B. Bond, Method of Optimizing Motor and Bit Performance for Maximum ROP, Journal of Canadian Petroleum Technology, 48 (6) (2009), PETSOC-09-06-44-TB.
- [11] T.G. Ritto, S. Christian, R. Sampaio, Robust optimization of the rate of penetration of a drill-string using a stochastic nonlinear dynamical model, Computational Mechanics Springer, 45 (5) (2010) 415-42.

- [12] G.Hareland, A. Wu, B. Rashidi, A drilling rate model for roller cone bits and its application. In: Paper SPE No. 129592. Presented at the CPS/SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition. Beijing, China, 8–10 June ,2010a .
- [13] G. Hareland, A.Wu, B. Rashidi, A new drilling rate model for tricone bits and its application to predict rock compressive strength,ARMA 10-206. In: Presented at the 44th US Rock Mechanics Symposium. Salt Lake City, UT, 27–30 June ,2010b.
- [14] A.T.Jr. Bourgoyne, F.S., Jr. Young, A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detectiony, SPE-AIME Sixth Conference on Drilling and Rock Mechanics, January,Austin, TX, SPE 4238,1973.
- [15] A.T.Bourgoyne, F.S. Young, A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. SPE Journal 14 (4) (1974) 371–384, SPE-4238-P.
- [16] E.Tanseau, A Heuristic Approach to Drilling Optimization’, Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas, 28 September -1 October, 1975.
- [17] B.H.Walker, A.D. Black, W.P. Klauber et al, Roller-bit penetration rate response as a function of rock properties and well depth. In: Paper SPE 15620 Presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, LA, 5–8 October 1986.
- [18] T.M. Warren, Penetration-rate performance of roller-cone bits. SPE Drill. Eng. 2(1), (1987), 9–18.
- [19] G. Hareland, L.L. Hoberock, Use of drilling parameters to predict in-situ stress bounds. In: Paper SPE 25727 Presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, 22–25 February 1993.
- [20] Emad A. Al-Betairi, Mohamed M. Moussa, Saud Al-Otaibi,. ‘Multiple Regression Approach To Optimize Drilling Operations in the Arabian Gulf Area’, SPE Drilling Engineering, 3(1) 1988, SPE-13694-PA.

- [21] M. A. Alum, F. Egbon, Semi-Analytical Models on the Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration (ROP), Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 30 July - 3 August, Abuja, Nigeria, 2011, SPE-150806-MS.
- [22] E.E. Maidla, ShinitiOhara, 1991. Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit,WOB, and Drillstring Rotation, SPE Drilling Engineering, 6 (3)189-195, SPE-19130-PA
- [23] M.H. Bahari, A. Bahari, F.N. Moharami, M.B.N. Sistani, Determining Bourgoyne and Young Model Coefficients using Genetic Algorithm to Predict Drilling Rate ,Applied Siences, 8 (17) (2008) 3050-3054.
- [24] M.Monazami, A. Hashemi, M. Shahbazian, Drilling rate of penetration prediction using artificial neural network: a case study of one of Iranian southern oil fields, Journal of Oil and gas Business, No 6(2012) 21-31.
- [25] I. AlArfaj, A. Khoukhi, T. Eren , Application Of Advanced Computational Intelligence To Rate Of Penetration Prediction." Computer Modeling and Simulation (EMS), Sixth UKSim/AMSS European Symposium on IEEE, 2012.
- [26] A.Bhatnagar, M. Khandelwal, An intelligent approach to evaluate drilling performance, Neural Computing and Applications 21(4) (2012) 763-770.
- [27] C.Jacinto ,P.J.F. Filho ,S.M. Nassar ,M.Rosenberg .D.G. Rodrigues ,M.D.C. Lima, Optimization models and prediction of drilling rate (ROP) for the Brazilian pre-salt layer, Chemical Engineering Transactions, 33(2013)823-828.
- [28] H. Basarir, L. Tutluoglu, C. Karpuz, Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions."Engineering Geology 173, (2014) 1-9.
- [29] R.A.Shishavan ,C. Hubbell ,H. Perez ,J. Hedengren ,D. Pixton ,Combined Rate of Penetration and Pressure Regulation for Drilling Optimization by Use of High-Speed Telemetry, SPE Drilling & Completion, 30 (1) (2015), SPE-170275-PA.
- [30] D.Jinan, Z.Jinhai, X.Li ,Y.Chuanshu, L.Changsheng, A ROP Optimization Approach Based on Improved BP Neural Network PSO, Advances in Swarm and Computational IntelligenceLecture Notes in Computer Science , 9142 (2015) 11-18.

- [31] B.Mantha, R. Samuel, ROP optimization using artificial intelligence techniques with statistical regression coupling. SPE Annu. Tech. Conf. Exhib. 2016. <https://doi.org/10.2118/181382-MS>.
- [32] M.K.Moraveji, M. Naderi, Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm. J. Nat. Gas Sci. Eng,31(2016) 829–841.
- [33] K.Rais,M. Kara,L. Gadri, R.Hadji, L.Khochman, Original approach for the drilling process optimization in open cast mines; case study of kef essenoun open pit mine northeast of Algeria, mining Science, 24(2017) 147–159.
- [34] O.Alimov, M.Krapivin , Outil minier, Edition NEDRA, Moscou 1979 .
- [35] K. Cheiretov, A. Kinov, B. Vassilien , Manuel de projection des machines minières, Edition TECHNIKA, Sofia, 1980.
- [36] L .Baron, L. Kouznitsov, Appareils et moyens de contrôles des processus de forage, Edition NEDRA, Moscou, 1989.
- [37] Rabinder G., Kirpitchenk V, Equipement minier et de forage Edition NEDRA,Moscou, 1983.
- [38] S.Kahraman, N. Bilgin, C. Feridunoglu, Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (5) (2003), 711-723.
- [39] McGregor, K. (1967). “The drilling of rock.”C.R. Books Ltd., London.
- [40] U.Beste, S. Jacobson, S. Hogmark, Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling, Wear, 264 (2007) 1142-1151.
- [41] M.M.Protodyakonov, Mechanical properties and drillability of rocks, I: Proceedings of 5th Symposium on Rock Mechanics , Univ. Minnesota. Minnesota University, (1962)103-118.
- [42] S.Tandanand , H.F.Unger ,Drillability determination - A drillability index of percussive drills ,USBM RI 8073, (1975).
- [43] H.Rabia,N.Brook, The effects of apparatus size and surface area of charge on the impact strength of rock, Int J Rock Mech Min Sci , 18(1981) 211-219.
- [44] J.Paone,D. Madson, Drillability Studies: Impregnated Diamond Bits, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, RI 6776 (1966), 16.

- [45] Wilbur, L. In: Kuesel TR, King EH, Bickel JO, editors. Rock tunnel engineering handbook. Melbourne, FL: Krieger; 1982.
- [46] D.F. Howarth, W.R. Adamson, J.R. Berndt, Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties, *Int J Rock Mech Min Sci*, 23(1986) 171–5.
- [47] C.L. Jimeno, E.L. Jimeno, F.G.A. Carcedo, *Drilling and blasting of rocks*, Rotterdam: Balkema, 1995.
- [48] M. Osanloo, *Drilling methods*, Teheran, Sadra Pub, 1998.
- [49] Kahraman, S, Balci, C, Yazici, S, Bilgin. N. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drilling using a new drillability index. *Int J Rock Mech Min Sci*, 43 (2000) 37-729.
- [50] Sh. Hoseinie, H. Aghababaei, Y. Pourrahimian, Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi). *Int J Rock Mech Min Sci*, (2008)45-110.
- [51] A. Mohammad, K. Reza, G. Mehdi, S. Omid, Drilling rate prediction of an open pit mine using the rock mass drillability index'. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 73 (2015) 130–138.
- [52] A.L. Hadjadj, *Prédiction et analyse de la fragmentation des roches dans les conditions algériennes*, thèse de doctorat en électromécanique, Annaba, 2002.
- [53] Sociétés des Ciments de Hadjar -Soud (SCHS), *Plan d'exploitation annuel, gisement de calcaire « Djebel Safia »*, Skikda, CETIM/Boumerdes, 2014.
- [54] *Abrasivité des roches lors de l'abattage*, Moscou, Edition des sciences URSS, 1961.
- [55] *Usure de l'outil lors du découpage des roches*, Moscou, Edition NEDRA 1969.
- [56] S. B. Kivade, Ch. S. N. Murthy, H. Vardhan, Experimental Investigations on Penetration Rate of Percussive Drill, *Global Challenges, Policy Framework & Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF2015)*, *Procedia Earth and Planetary Science* 11 (2015) 89 – 99.
- [57] J.B. Cailleux, *Etude des diagraphies instantanées en forage, rapports des laboratoires série: géotechnique - mécanique des sols - sciences de la terre GT-12*, Février 1986.

- [58] L.Pascal, 500.000 m de mine avec la perforation hydraulique percutante à la mine de l'argentière (Ardèche), Industrie Minérale Mine, Nov, 1974.
- [59] H. Cambefort, Forages et sondages ; Leur emploi dans les travaux publics, Edition Eyrolles ,1963.
- [60] I.Bouiny,N. Trebougov, Sondeuses, Technologie et économie du forage à molettes, Edition NEDRA, Moscou ,1975.
- [61] E.Mendeli,L.G. Krassavine, Machines minières et complexes ,Edition NEDRA, Moscou ,1975.
- [62] J.N.Baléo,B. Bourges ,Ph. Courcoux ,C. F.Brasquet, Le Cloirec P, Méthodologie expérimentale : Méthodes et outils pour les expérimentations scientifiques, Paris : Editions THC et DOC, 2003.
- [63] M.F. Etsinda, Nouvelle approche hybride d'optimisation multi-objectif basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis, thèse de maîtrise en génie de la production automatisée, M. Ing, Université du QUÉBEC, 2008.
- [64] G.Taguchi, Taguchi on robust technology development methods, ASME Press, New York, (1993)1– 40 .
- [65] M.Pillet, Les plans d'expériences par la méthode Taguchi, 3^{ème} édition, Paris, France, (2005).
- [66] G. Taguchi. System of experimental design, unipub/kraus, international publication ,1987.
- [67] G.E.P.Box, W.G, Hunter, J.S.Hunter, Statistics for experimenters an introduction to design data analysis and model building, New York : J. Wiley and Sons, c1978, ISBN : 0-471-09315-7.
- [68] J.Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Paris : Dunod, c1999, ISBN :2-10-003993-8.
- [69] C.Hicham, Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire application aux matériaux métal, thèse de doctorat, France,2013.
- [70] K.T.Chiang, Modeling and analysis of the effects of machining parameters on the performance characteristics in the EDM process of Al₂O₃+TiC mixed ceramic, International Journal of Advanced Manufacturing Technology,37(2008)523-533.

- [71] Norme Internationale ISO 3534-3, Statistics Vocabulary and symbols Part 3, Design of experiments, 1999.
- [72] J.J.Droesbeke, J. FINE, G. Saporta, Plans d'expériences : applications en entreprise [7e Journées d'étude en statistique, 1996, Marseille], l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France ;Paris : Éd. Technip, 1997,ISBN :2-7108-0733-5.
- [73] B.Soulier , Sur la modélisation expérimentale en mécanique : précision, optimisation et applications industrielles , Thèse réalisée dans le secteur Structures et CMAO du Laboratoire de Mécanique et Technologie, en collaboration avec la société Dassault Aviation. Laboratoire de mécanique et technologie (E.N.S. de Cachan, C.N.R.S., Uni. Paris 6), 1994, ISBN : 2-11-088806-7.
- [74] J.Goupy ,Pratiquer les plans d'expériences, Dunod, Paris,2005.
- [75] L.Wasserman, All of Statistics : A Concise Course in Statistical Inference, ,New York, Springer-Verlag,2004, ISBN 978-0387402727.

Chapitre II

*L'optimisation des paramètres
opérationnels d'une sondeuse
roto percutante selon la
méthode de Taguchi*

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié l'influence des paramètres contrôlables et non contrôlables du processus de forage sur l'évolution de la vitesse de pénétration. En effet, une attention particulière a été dédiée aux effets des paramètres de contrôlables telles que : la force axiale, la pression d'alimentation du marteau, la vitesse de rotation du train de tige sur la vitesse de pénétration pendant le forage d'un trou avec la sondeuse roto-percutante INGERSOLL RAND CM-780D dans la carrière de Hadjar-Soud. D'autre part, comme il a été également mentionné au chapitre précédent, la technique mono - objectif de Taguchi a été menée pour trouver le régime rationnel de cette sondeuse. A partir des résultats des expériences planifiées, une analyse de Pareto (ANOVA) est réalisée et un modèle mathématique de type quadratique est déduit pour estimer la vitesse de pénétration.

II.2. Optimisation par la méthode de Taguchi

Taguchi a développé une conception spéciale de tableaux orthogonaux pour étudier l'ensemble de l'espace des paramètres avec un minimum d'expériences seulement. L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal-bruit [S/B]. Le rapport [S/B] développé par Dr. Taguchi est une performance [1] pour mesurer la caractéristique de qualité s'écartant des valeurs souhaitées [2]. Ici, le 'signal' représente la valeur souhaitable et le 'bruit' représente la valeur indésirable, où le rapport signal sur bruit exprime la dispersion autour de la valeur souhaitée. Le résultat expérimental devrait être transformé en rapports [S/B] [3], il existe trois types standard de rapports [S/B] en fonction de la performance souhaitée : la valeur nominale est la meilleure, le plus bas est le meilleur, et le plus grand est le meilleur [4] :

1. La valeur nominale est la meilleure (Nominal the best):

Elle est utilisée lorsque la valeur nominale ou cible et la variation autour de cette valeur sont minimales.

L'équation du calcul du ratio signal-bruit [S/B] proposée par Taguchi est la suivante :

$$S/B \text{ ratio } (\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2} \quad (II.1)$$

Où :

\bar{Y} : moyenne des réponses pour la combinaison de niveaux facteurs donnée

σ : écart type des réponses pour la combinaison de niveaux de facteurs donné

2. Le plus petit c'est le meilleur (Smaller-the-better)

Dans le cas où la caractéristique de qualité correspond à l'optimum est une valeur minimale, l'équation du calcul du ratio signal-bruit [S/B] proposée par Taguchi est la suivante :

$$S/B \text{ ratio } (\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (II.2)$$

3. Le plus grand est le meilleur (Larger the better)

Dans le cas où la caractéristique de qualité correspond à l'optimum est une valeur maximale, l'équation du calcul du ratio signal-bruit [S/B] proposée par Taguchi est la suivante :

$$S/B \text{ ratio } (\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (II.3)$$

Où :

- y_i : valeur mesurée de la réponse, Avec : $i = 1, 2, \dots, n$;
- n : nombre de mesures effectuées.

Le ratio [S/B] pour chaque niveau des paramètres du procédé est calculé en fonction de l'analyse [S/B]. Quelle que soit la catégorie de la caractéristique de qualité, le maximum des résultats entre le ratio [S/B] correspond à une meilleure caractéristique de qualité. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du procédé est le niveau le plus haut ratio[S/B] [5, 6].

II.3. Préparation du plan d'expériences

II.3.1. Objectifs

Dans le but de planifier des travaux de forage efficace avec une productivité maximale et un coût minimum, nous devons tenir compte de l'influence des paramètres de réglage du forage roto-percutant sur la vitesse de pénétration. Ces paramètres devraient être correctement choisis pour prédire la vitesse de pénétration. Le but principale de notre tâche est d'utiliser la méthode de Taguchi pour trouver les conditions opératoires optimales qui permettent d'atteindre un régime rationnel de fonctionnement de la sondeuse

INGERSOLL RAND CM-780D. Ce qui revient à réaliser une série de 27 expériences et à déterminer la valeur de la fonction réponse pour les 27 configurations. Une relation de modélisation en est alors déduite.

II.3.2. Réponse

La réponse choisie est la vitesse de pénétration de l'outil de forage (V_p). Les valeurs de la vitesse de pénétration sont déterminées à partir des expériences de forage selon l'équation suivante :

$$V_p = \frac{L}{t} [m / \text{min}] \quad (II.4)$$

où :

- L : profondeur d'un trou forée [m] ;
- t : temps réel de forage du trou [min].

II.3.3. Détermination des facteurs

Lors de cette étude expérimentale, on s'est intéressé aux effets de la pression d'alimentation en air (A), à la vitesse de rotation de la tige (B) et à la force axiale « la poussée » (C).

II.3.3.1. Pression d'alimentation en air

Ce paramètre assure l'avancement du marteau avec l'outil fond de trou et l'évacuation des débris. Le déplacement du piston à l'intérieur du corps du marteau ce fait par des percussions, ces percussions permettent de générer une énergie cinétique qui va être transmise à l'emmanchement ou directement au taillant fond de trou [7]. Le soufflage est le paramètre le plus important de la foration roto-percutante. S'il ne permet pas de remonter les débris de foration créés par le taillant, la foration ne pourra pas s'effectuer dans les meilleures conditions [7], les percussions et le soufflage dépendent fortement de la pression d'alimentation. Pour confirmer la signification de l'effet de ce facteur sur la vitesse de pénétration, on a considéré un forage à 14, 15 et 17 bar.

II.3.3.2. Vitesse de rotation de la tige

Dans ce processus de forage la vitesse de rotation assure la rotation de l'outil, nous avons choisi comme valeurs 35, 50, 60 tr/min.

La rotation a pour but de faire en sorte, qu'à chaque impact, les boutons du taillant détruisent une partie saine de la roche, c'est-à-dire que le déplacement des boutons périphériques soit [7]:

- très légèrement inférieur à leur diamètre dans le cas d'une roche dure ;
- très légèrement supérieur à leur diamètre dans le cas d'une roche tendre.

II.3.3.3. Force axiale (Poussée)

La force axiale est un facteur fondamental de la foration roto-percutante. L'objectif de la poussée est de maintenir en permanence le contact entre le taillant et la roche [7], nous avons choisi trois valeurs avec un pas de 165 kgf donc 660, 825 et 990 kgf.

Les niveaux de chaque facteur, en valeurs codées et en valeurs réelles, sont donnés dans le tableau II. 1.

Tableau II. 1. Facteurs et niveaux sélectionnés.

Facteurs	Code	Niveaux		
		1	2	3
Pression d'alimentation en air (bar)	A	14	15	17
Vitesse de rotation (tr/min)	B	35	50	60
Force axiale (kgf)	C	660	825	990

II.3.4. Choix du plan d'expériences

Un plan orthogonal de Taguchi L_{27} a été choisi pour planifier l'expérience. C'est un plan qui permet de trier les facteurs en faisant ressortir les plus influents. Le plan L_{27} est un plan factoriel complet, ces essais montrent clairement l'effet des paramètres d'entrée avec leurs interactions. De plus, les modèles obtenus sont fiables et reflètent au mieux l'expérimentation. La sélection d'un plan orthogonal appropriée dépend du nombre de facteurs de contrôle et de leurs niveaux. Dans notre étude, on a trois (03) facteurs et trois (03) niveaux donc $3^3 = 27$. C'est la raison pour laquelle qu'il faut choisir L_{27} que L_9 pour une meilleure résolution et précision.

Tableau II. 2. Facteurs et niveaux sélectionnés.

N Essais	Facteurs codés			Valeurs actuelles			N Essais	Facteurs codés			Valeurs actuelles		
	X ₁	X ₂	X ₃	A	B	C		X ₁	X ₂	X ₃	A	B	C
1	1	1	1	14	35	660	15	2	2	3	15	50	990
2	1	1	2	14	35	825	16	2	3	1	15	60	660
3	1	1	3	14	35	990	17	2	3	2	15	60	825
4	1	2	1	14	50	660	18	2	3	3	15	60	990
5	1	2	2	14	50	825	19	3	1	1	17	35	660
6	1	2	3	14	50	990	20	3	1	2	17	35	825
7	1	3	1	14	60	660	21	3	1	3	17	35	990
8	1	3	2	14	60	825	22	3	2	1	17	50	660
9	1	3	3	14	60	990	23	3	2	2	17	50	825
10	2	1	1	15	35	660	24	3	2	3	17	50	990
11	2	1	2	15	35	825	25	3	3	1	17	60	660
12	2	1	3	15	35	990	26	3	3	2	17	60	825
13	2	2	1	15	50	660	27	3	3	3	17	60	990
14	2	2	2	15	50	825							

II.4. Conduire les expériences

II.4.1. Matériels et préparation

La réalisation expérimentale du forage a été programmée dans les conditions de la carrière de Hadjar-Soud à l'aide d'une sondeuse INGERSOLL RAND CM-780D équipée d'un marteau fond du trou COP 64.2 pneumatique. L'outil de coupe utilisé est de type à bouton. Une étude plus poussée a été effectuée sur l'effet des paramètres de réglage à savoir la poussée (force axiale), la pression d'alimentation du marteau et la vitesse de rotation du train de tige sur la vitesse de pénétration pendant le forage du trou.

L'expérience du forage a été effectuée sur huit (08) coins de la carrière dont les propriétés physico-mécaniques de la roche sont homogènes, avec la variation des paramètres de réglage pendant trois fois pour chacun d'eux.



Figure II. 1. Sondeuse roto percutante INGERSOLL RAND CM-780D en régime de travail.

II.4.2. Le marteau fond du trou

II.4.2.1. Caractéristique de marteau

Les caractéristiques techniques du marteau COP 64.2 utilisé pour la sondeuse INGERSOLL RAND CM-780D sont données comme suit dans le tableau II.3.

Tableau II. 3. Caractéristiques techniques du marteau COP 64.2 [8].

Le marteau fond du trou	Diamètre du taillant [mm]	Vitesse de rotation [tr/min]	La force axiale [KN]	Pression d'alimentation en air [bar]
COP 64.2	165	15 – 60	7 - 15	6 – 25

II.4.2.2. Principe de fonctionnement

En termes simples, un mécanisme de forage à percussion utilise l'énergie de percussion résultant de l'impact répété du marteau fond du trou (DTH), la pression d'alimentation et la force de rotation qui sont transmises au taillant à travers la tige de forage.

L'énergie générée par les impacts répétés est ensuite convertie en énergie des ondes, qui est transmise à la roche par l'intermédiaire du trépan. Enfin, le trépan, qui dispose maintenant de suffisamment d'énergie de percussion, coupe et broie la roche [9].

Le flux d'air permet de remonter les cuttings du terrain [10]. 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 [11, 12].

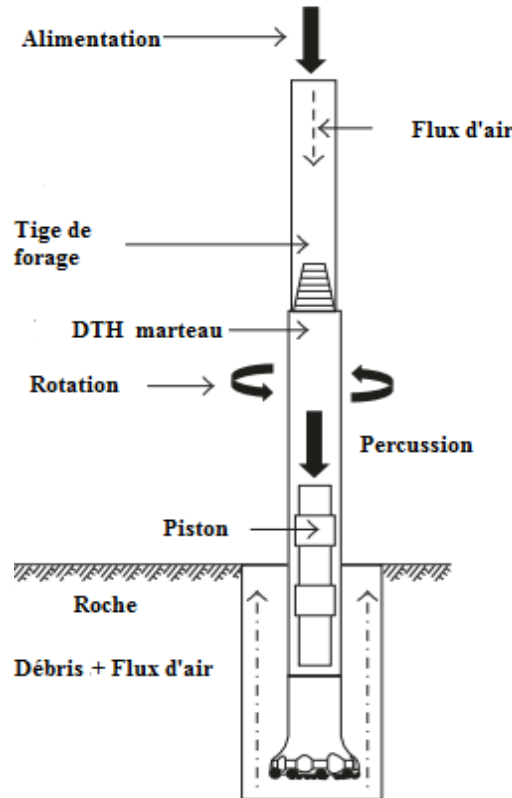


Figure II. 2. Mécanismes de forage d'un système de forage rotatif à percussion: forage en fond de trou [13].

II.4.3.L'outils de forage

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 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.

Les outils de forage PDC comportent des taillants formés d'un cylindre en carbure de tungstène cobalt surmonté d'une partie en diamant polycristallin. 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 [14-16]. 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 [17]. La figure II.3 représente l'outil de coupe utilisée pour cette expérience. C'est un taillant à boutons en carbure de tungstène fixé directement sur un marteau pneumatique.

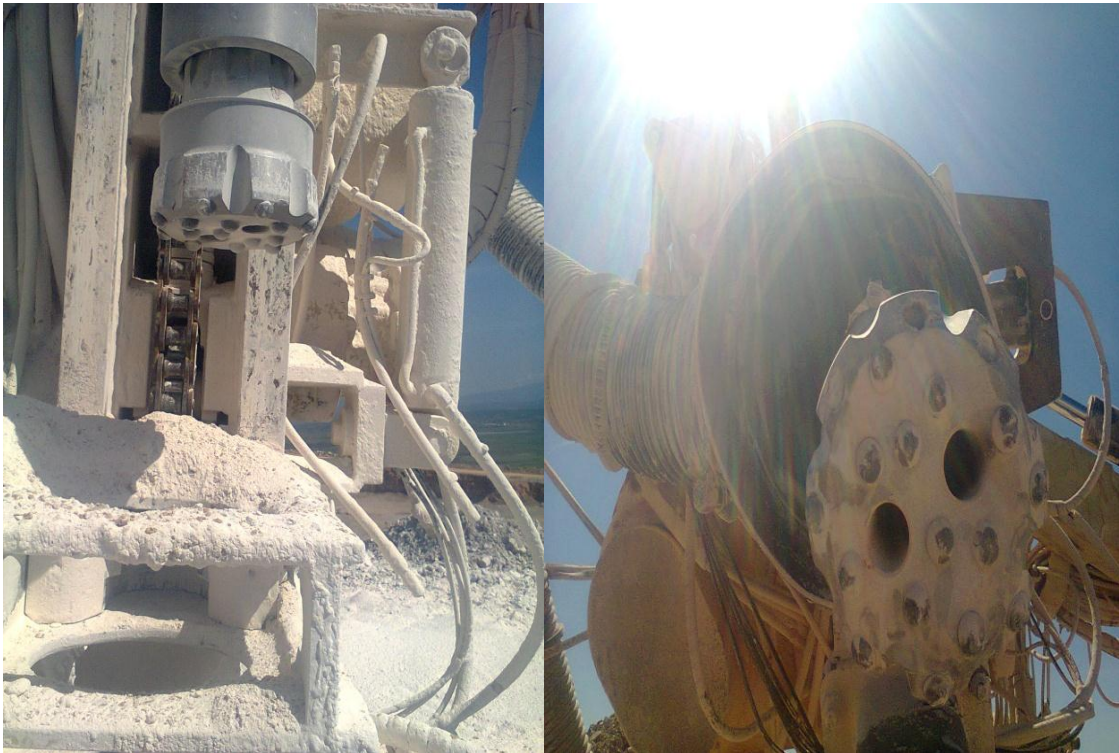


Figure II. 3 Outil de coupe (forage).

II .4.4. Outils de mesure

Durant la réalisation des expériences on a utilisé comme moyens de mesure l'appareillage suivant :

- Un dynamomètre à la compression du type HRC;
- Un tachymètre optique « Beta 1760/TC2 »;
- Un chronomètre.

II.4.5. Procédure expérimentale

Vu la complexité de la détermination de la force axiale ,on a placé un dynamomètre à la compression entre le sol et l'outil de forage , et à l'aide de la manette, on a fait descendre l'ensemble rotateur, moteur, tige, plus l'outil de 165 mm de diamètre, puis on a éliminé le dynamomètre, après avoir fixé une pression sur le manomètre de la centrale hydraulique, on a effectué le forage. Au fur et à mesure que l'avancement s'effectue, on procède au prélèvement de la vitesse de rotation de la tige avec un tachymètre optique tout en gardant ce tachymètre entre nos mains à une distance de 1.5 m de train de tige et on aligne le faisceau

de lumière visible sur l'adhésif catadioptrique collé sur la circonférence de la tige ainsi les résultats sont affichés sur l'écran du tachymètre. Or, pour la variation de la pression d'alimentation d'air on a agi sur la manette du diaphragme dont la valeur s'affichera sur le baromètre du générateur d'air.

II.5. Plan de Taguchi

II.5.1. Paramètres de sortie (réponses étudiées)

II.5.1.1. Vitesse de pénétration

Les valeurs de la vitesse de pénétration sont déterminées en m/min à partir des expériences selon l'équation (II.4).

II.5.1.2. Ratio signal -bruit (rapport [S/B])

Les valeurs du ratio signal-bruit [S/B] correspondant à des valeurs de la vitesse de pénétration sont calculées avec l'utilisation du critère le plus élevé, mieux représenté comme dans l'équation (II.3) en db.

II.5.2 Réalisation des essais

La table orthogonale L_{27} a été utilisée pour la réalisation de la série d'expériences est donnée par le tableau II.4. La matrice d'expériences est composée de 3 colonnes correspondants aux facteurs sélectionnés et 27 lignes représentant la série d'expérience de forage à réaliser. Dans les deux dernières colonnes, les valeurs expérimentales de la vitesse de pénétration et les valeurs calculées du ratio signal-bruit [S/B] sont respectivement reportées.

Tableau II. 4 . Résultats expérimentaux pour la vitesse de pénétration et le ratio [S/B].

Essais	A	B	C	V_p	[S/B]	Essais	A	B	C	V_p	[S/B]
1	14	35	660	0.32	- 9.89700	15	15	50	990	1.06	0.50612
2	14	35	825	0.71	- 2.97483	16	15	60	660	1.05	0.42379
3	14	35	990	0.74	- 2.61537	17	15	60	825	1.25	1.93820
4	14	50	660	0.38	- 8.40433	18	15	60	990	1.18	1.43764
5	14	50	825	0.77	- 2.27019	19	17	35	660	0.72	- 2.85335
6	14	50	990	0.80	- 1.93820	20	17	35	825	1.11	0.90646
7	14	60	660	0.42	- 7.53501	21	17	35	990	1.08	0.66848
8	14	60	825	0.79	- 2.04746	22	17	50	660	0.91	- 0.81917
9	14	60	990	0.82	- 1.72372	23	17	50	825	1.29	2.21179
10	15	35	660	0.62	- 4.15217	24	17	50	990	1.25	1.93820
11	15	35	825	1.01	0.08643	25	17	60	660	1.09	0.74853
12	15	35	990	1.06	0.50612	26	17	60	825	1.36	2.67078
13	15	50	660	0.88	- 1.11035	27	17	60	990	1.30	2.27887
14	15	50	825	1.10	0.82785						

L'analyse des résultats du tableau II.4 montre que la vitesse de pénétration est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre (0.32 et 1.36 m/min) et les valeurs du rapport signal /bruit sont comprise entre (-9.89700 et 2.67078 db).

II.5.3. Représentation graphique des effets

II.5.3.1. Diagramme des effets principaux

La figure II.5 montre l'effet des facteurs sources sur les valeurs moyennes de la vitesse de pénétration, on remarque que toute augmentation des paramètres de réglage de la machine de forage entraine en principe un accroissement de la vitesse de pénétration. Ceci peut être vérifiée jusqu'à une certaine valeur par contre au-delà, la vitesse de pénétration cesse de s'accroître à cause du phénomène d'usure.



Figure II. 4. L'usure de l'outil de forage.

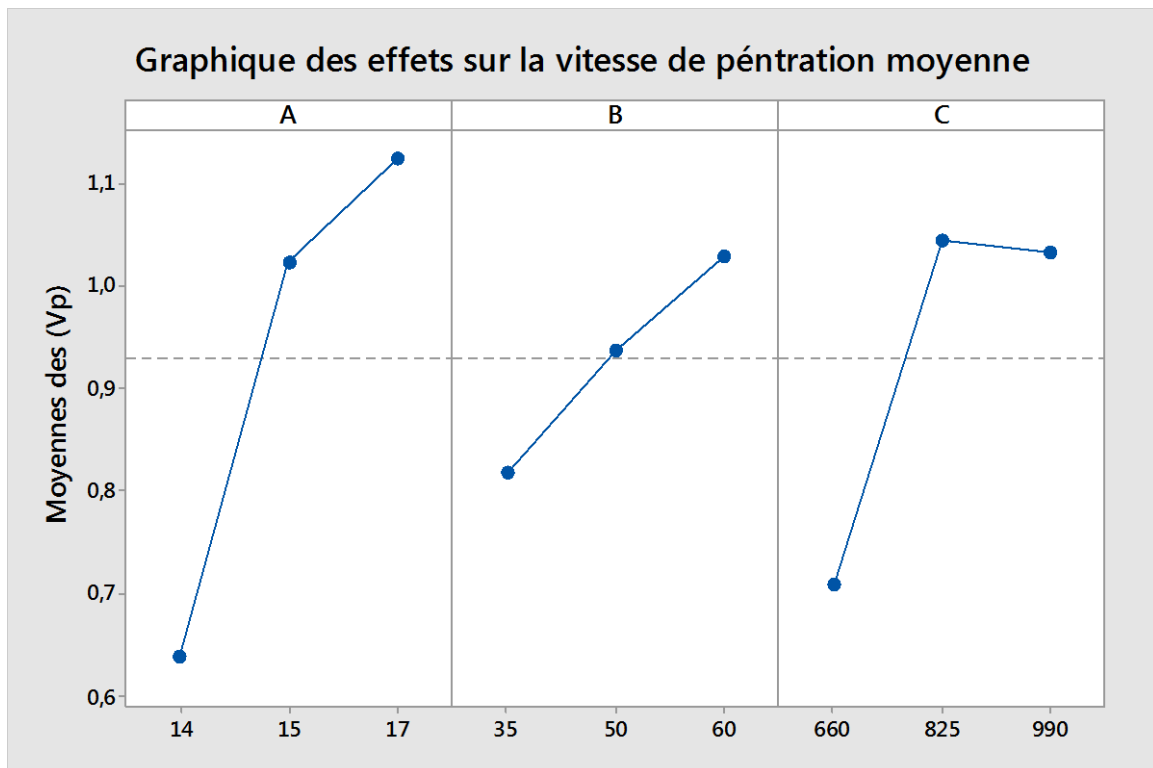


Figure II. 5 . Graphique des effets principaux de A, B et C sur la vitesse de pénétration (V_p).

La figure II.6 représente les valeurs moyennes des ratios signal/bruit ($[S/B]_{\text{moy}}$) en fonction des niveaux des facteurs affectant la vitesse de pénétration. Une valeur élevée de $[S/B]_{\text{moy}}$ donne un impact important du paramètre sur la vitesse de pénétration

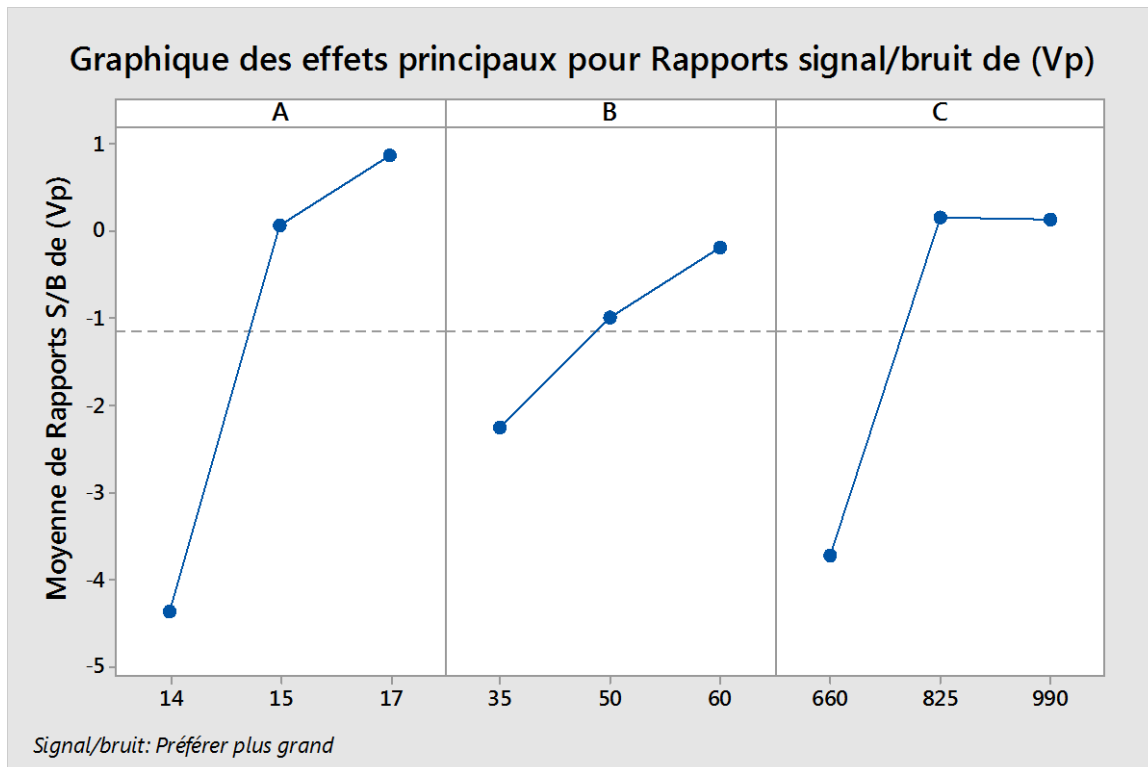


Figure II. 6. Graphique des effets principaux de A, B, et C sur ratio[S/B] pour V_p .

II.5.3.2. Diagramme d'interaction

La figure (II-7) illustre le diagramme des interactions des paramètres de réglage de forage roto-percutant pour la vitesse de pénétration (V_p).

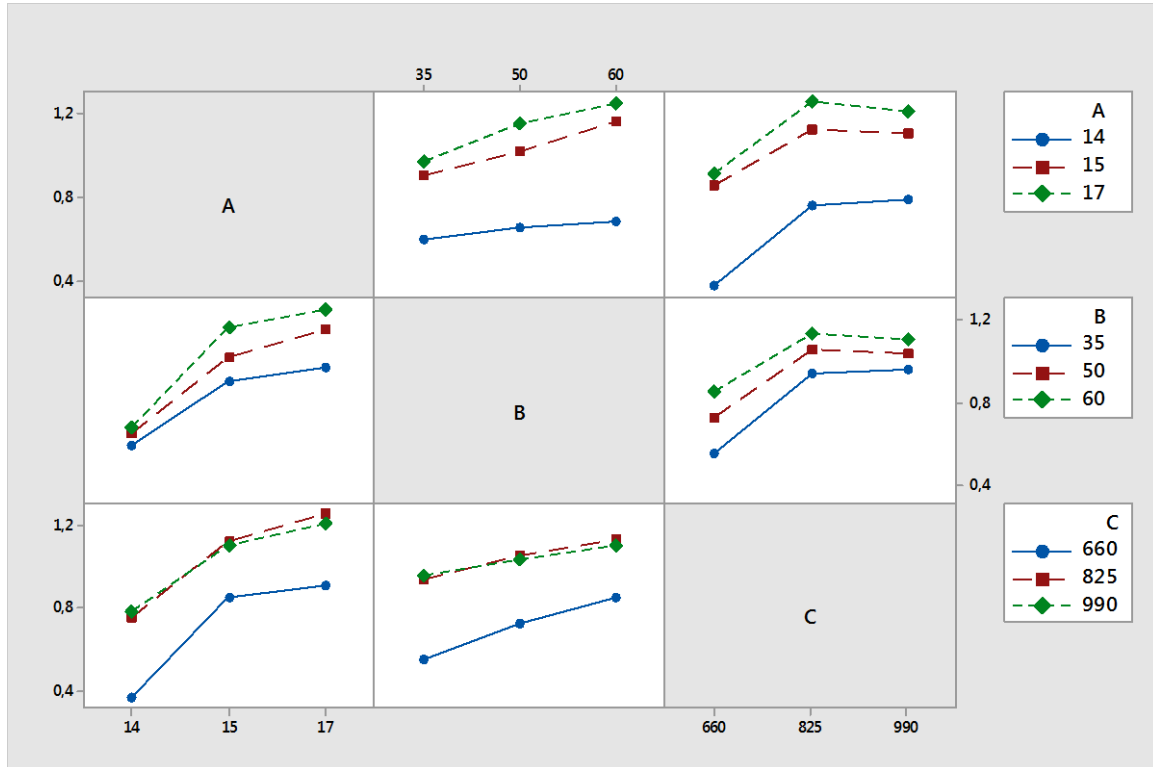


Figure II. 7. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la vitesse de pénétration.

Le diagramme suivant montre que les droites parallèles indiquent l'absence d'interactions des facteurs. Plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé. L'analyse des graphes dévoile que les courbes pour les interactions (A. C) ;(B .A) et (B. C) ne sont ni parallèles ni identiques, ce qui veut dire que l'interaction des paramètres de réglage ayant un effet important sur l'évolution de la vitesse de pénétration et cet effet apparaît avec l'augmentation et la diminution des niveaux des facteurs.

II.5.4. Analyse statistique des résultats

II.5.4.1. Analyse du signal bruit

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios [S/B] des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres de réglage (A, B et C). La moyenne des ratios [S/B] pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios [S/B] pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

Dans les conditions expérimentales étudiées, les résultats obtenus (voir le tableau II. 5 et la figure II.6) montrent que les paramètres de réglage de forage roto-percutant (A, B et C) présentent des effets différents sur la vitesse de pénétration (V_p). On remarque, le plus

significatif effet correspond à la pression d'alimentation (A) avec un effet de 5.23963 suivie par la force axiale (C) avec un effet de 3.88312 ensuite en dernier lieu vient la vitesse de rotation (B) avec un effet de 2.05743.

La valeur algébrique du plus grand ratio [S/B], correspond à la meilleure caractéristique de performance, et par conséquent, le niveau optimal du paramètre est le niveau le plus haut de ratio [S/B]. Le plus haut ratio[S/B] spécifique à chaque facteur donne le meilleur résultat expérimental. Ce dernier correspond à la vitesse de pénétration la plus élevée. Les rapports moyens [S/B] correspondants à chaque niveau des facteurs de contrôle de la vitesse de pénétration sont donnés dans la figure II.6, les ratios [S/B] relatives aux conditions optimales sont représentés dans le tableau II.5.

Tableau II. 5. Tableau de réponse pour le signal à bruit.

Niveau	Moyenne des ratio signal/bruit ($[S/B]_{\text{moy}}$ (db))		
	A	B	C
1	- 4.37846	- 2.25836	- 3.73323
2	0.05151	- 1.00647	0.14989
3	0.86118	- 0.20093	0.11757
Delta	5.23963	2.05743	3.88312
Rank	1	3	2

II.5.4.2. Analyse d'ANOVA Pareto

On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport [S/B] en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs du plan les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur [18].

L'analyse de variance (ANOVA Pareto) est une méthode statistique simplifiée de la méthode d'analyse Anova, basée sur le principe de Pareto, c'est une méthode d'analyse rapide et facile, elle a été appliquée pour analyser la contribution de chacun des paramètres optimisés, cette méthode ne nécessite pas le teste de Fisher.

Cette dernière identifie les paramètres signifiants et calcule la contribution de chaque paramètre sur les différentes caractéristiques de qualité.

L'utilisation à la fois de la méthode de Pareto ANOVA et le ratio signal/bruit, permettent facilement l'analyse des résultats [19].

L'analyse des résultats du forage roto-percutant a été effectuée par cette méthode, en utilisant les données du ratio [S/B] qui sont mentionnées dans le tableau II.5.

La somme des carrés des différences (S) pour chaque facteur (S_A, S_B, S_C) est obtenue par l'équation suivante [20]:

$$S_A = (A_1 - A_3)^2 + (A_1 - A_2)^2 + (A_2 - A_3)^2 \quad (II.5)$$

Et la contribution de chaque facteur est calculée selon la formule suivante :

$$C\% = \frac{S_A}{S_T} \quad (II.6)$$

Sachant que

$$S_T = S_A + S_B + S_C \quad (II.7)$$

Les résultats sont mentionnés dans le tableau II.6. Le diagramme de Pareto est présenté avec la dépendance du ratio de contribution et la contribution cumulative (figure II.8).

Tableau II. 6. Analyse de variance (Anova-Pareto) des résultats de forage.

Facteurs		A	B	C
[S/B] _{moy}	1	- 4.37846	- 2.25836	- 3.73323
	2	0.05151	- 1.00647	0.14989
	3	0.86118	- 0.20093	0.11757
Somme des carrés des différences		47.734027	6.44914147	29.9083262
Contribution (%)		56.76	7.67	35.57
Contribution cumulative		56,76	100	92.33

Ces résultats montrent clairement la dominance de la pression d'alimentation d'air (facteur A) avec une contribution de 56.76 % suivie de la force axiale (facteur C) avec une contribution de 35.57 % et en dernière position de la vitesse de rotation (facteur B) avec une contribution de 7.67 %.

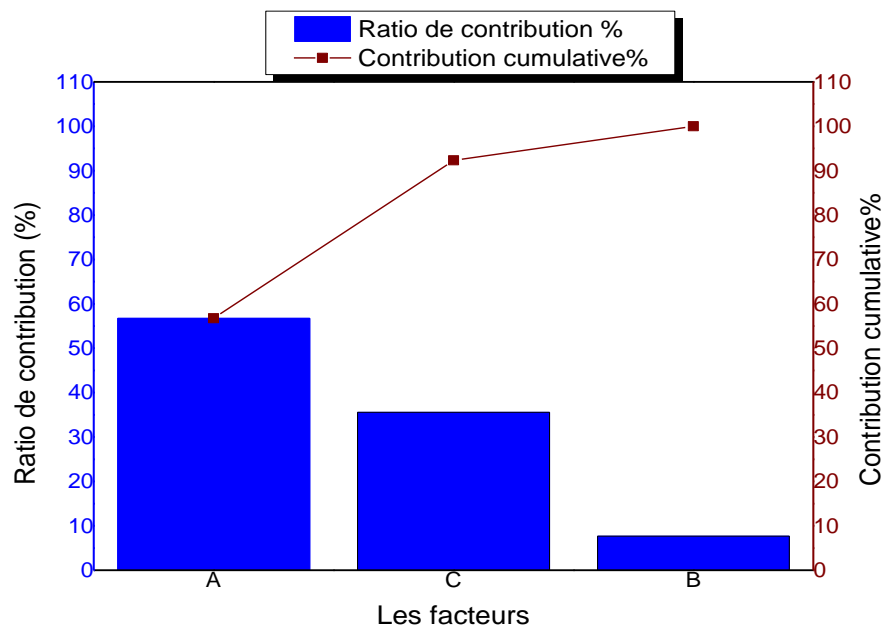


Figure II. 8. Diagramme de Pareto.

II.5.4.3. La combinaison optimale

Les conditions optimales du forage roto percutant qui maximisent la vitesse de pénétration obtenue sont une pression d'alimentation de 17 bar (niveau 3), une vitesse de rotation de 60 tr/min (niveau 3) et une force axiale de 825 kgf (niveau 2). Donc la combinaison optimale des paramètres d'entrée est: $A_3B_3C_2$.

Tableau II. 7 . Les paramètres optimaux de réglage de la sondeuse.

Facteur (niveau)	Valeur
A_3	17 (bar)
B_3	60 (tr/min)
C_2	825 (kgf)

II.6. Modélisation mathématique

Les résultats de l'expérience sont traités statistiquement en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). En effet, à partir des résultats obtenus, un modèle de régression quadratique sera établi. L'objectif principal est de montrer les paramètres les plus significatifs sur la réponse étudiée (V_p).

Le modèle mathématique pour la vitesse de pénétration est donné par la relation suivante [21, 22]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_i^k b_i x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (II.8)$$

Où:

- Y : représente la réponse;
- x_1, x_2, x_3 : paramètres d'entrée (facteurs);
- b_0 : constante de l'équation de régression;
- b_1, b_2, b_3 : coefficients linéaires;
- b_{11}, b_{22}, b_{33} : coefficients quadratiques;
- b_{12}, b_{13} et b_{23} : coefficients d'interaction ;
- ε : est l'erreur appropriée.

Dans cette étude, l'analyse de variance est menée à un niveau de signification $\alpha = 5\%$ (niveau de confiance égal à 95 %). Les résultats de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration sont donnés par le tableau II.8. Ce tableau montre les degrés de liberté (DF), la somme des carrés (SS), le carré moyen (CM), F -Valeur et la probabilité « Prob ».

Le "F-valeur" du modèle est calculé à partir de la moyenne de la somme des carrés du modèle divisé par la moyenne de la somme des carrés des résidus. En outre, si « Prob » du modèle est très petit (inférieur à 0.05) alors les limites dans le modèle a un effet significatif sur la réponse. Habituellement, l'analyse ANOVA est appliquée aux résultats de l'expérience afin de déterminer le pourcentage de contribution de chaque facteur [23]. Ce pourcentage est utilisé pour évaluer l'importance relative de chaque facteur. Il est à noter qu'une faible probabilité ($Prob < 0.05$) renseigne sur la signification statistique de la source sur la réponse correspondante. Dans cette analyse, la contribution en pourcentage ($P_c\%$) de chaque facteur source sur la variabilité totale des réponses est représentée dans la dernière colonne du tableau II.8 ; ces valeurs donnent le degré d'influence de chaque facteur sur la réponse étudiée.

Le modèle final pour la V_p obtenu est le suivant:

$$V_p = -33.59 + 3.576 A - 0.0151 B + 0.01363 C - 0.1115 A \times A + 0.000047 B \times B - 0.000006 C \times C + 0.002283 A \times B - 0.000084 A \times C - 0.000019 B \times C \quad (II.9)$$

Tableau II. 8. Résultat de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration (V_p).

Source	DF	SS	CM	F-Valeur	Prob	P _c %
Régression	9	2.07007	0.230007	79.68	0.000	/
A	1	0.29499	0.294993	102.19	0.000	28.05
B	1	0.00172	0.001723	0.60	0.450	0.16
C	1	0.19203	0.192034	66.52	0.000	18.26
A ²	1	0.28762	0.287622	99.64	0.000	27.35
B ²	1	0.00030	0.000299	0.10	0.751	0.03
C ²	1	0.17796	0.177963	61.65	0.000	16.92
A*B	1	0.02311	0.023111	8.01	0.012	2.20
A*C	1	0.00534	0.005340	1.85	0.192	0.51
B*C	1	0.01937	0.019371	6.71	0.019	1.84

Pour mesurer la qualité de l'ajustement du modèle obtenu, le coefficient R^2 a été déterminé. Ce coefficient caractérise la relation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites.

Selon l'équation de régression (Eq.II.9), on constate que le modèle de régression quadratique pour la vitesse de pénétration présente un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0.9768$). En effet, cette valeur n'explique que 97.68 % de la variabilité et que 2.32 % restent par conséquent inexpliqués.

La prévision fiable de modèle est obtenue lorsque la valeur de R^2 s'approche de l'unité ($R^2 \approx 1$ tableau II.9), c'est une indication claire sur un accord qualitatif entre l'expérimentation et la prédiction.

Les valeurs prédites du modèle obtenu sont comparées avec les données expérimentales. Ceci est illustré sur la figure II.9. Les résultats montrent que le modèle développé est plus cohérent et très approprié pour la prédiction de la vitesse de pénétration. A la fin, tel qu'il apparaît sur la figure II. 10, pour la probabilité normale des résidus du modèle de la vitesse de pénétration, on constate que les résidus s'ajustent raisonnablement en ligne droite, ce qui permet de conclure que les erreurs ont une distribution normale et par conséquent le modèle développé est significatif.

Le test du F de Fisher est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 79.68$. Cela signifie que la part de la variance de vitesse de pénétration expliquée par le modèle est 79.68 fois plus importante que la part de la variance de vitesse de pénétration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans le tableau II.8, la probabilité ($\text{Prob} > F\text{-Valeur}$) associée au test de Fisher (F) est de environ de 0. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

Les résultats de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration (tableau II.8) montrent que la pression d'alimentation d'air (A) est le facteur qui représente le grand effet sur la variation totale de la vitesse de pénétration, ce qui explique 28.05 % de contribution, le second facteur qui affecte la vitesse de pénétration est l'interaction (A.A) avec une contribution de 27.35 %. Par la suite, vient l'effet de la force axiale (C) et l'interaction (C.C) avec une contribution de l'ordre de 18.26 % ; 16.92 % respectivement d'autre part, les interactions ((A.B); (B.C)) présentent des contributions très faible sur la variation de la vitesse de pénétration (2.20 et 1.84 %), enfin la vitesse de rotation (B ; 0.16 %) et les interactions ((A. C) ; 0.51 %), ((B.B) ; 0.03 %) n'ont aucun effet significatif sur la variabilité totale de la vitesse de pénétration.

Tableau II. 9. Coefficient de détermination.

Modèle	Coefficient de détermination R^2
Vitesse de pénétration	0.9768

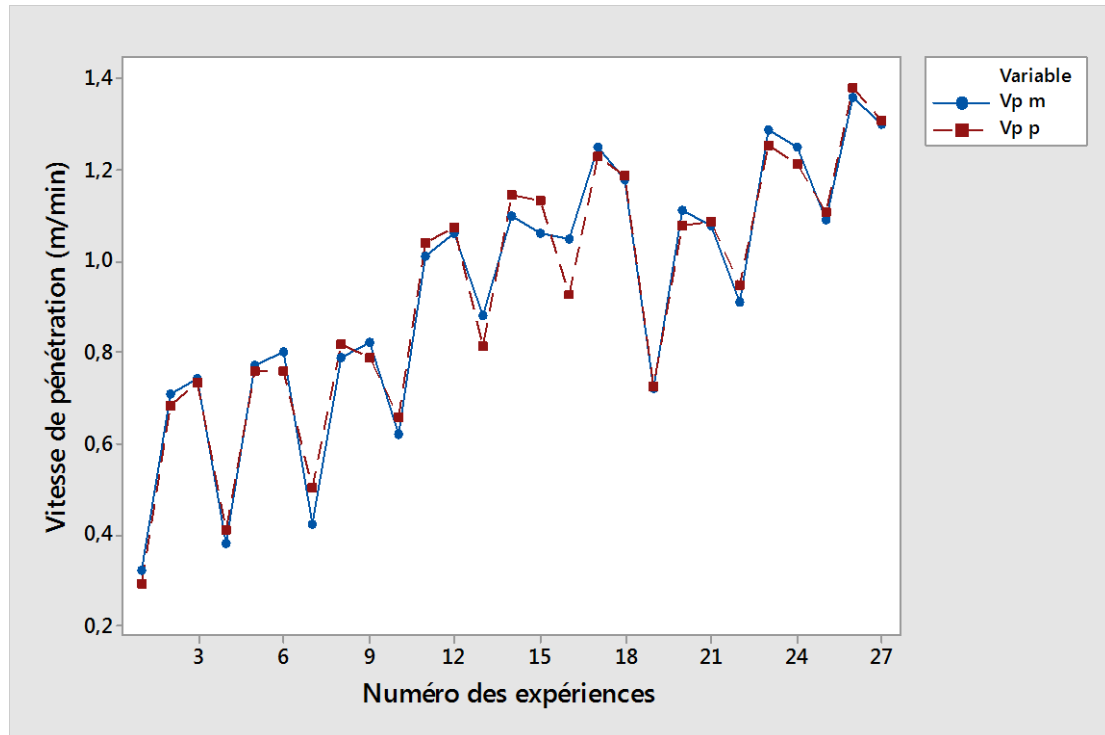


Figure II. 9. Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites et de la vitesse de pénétration.

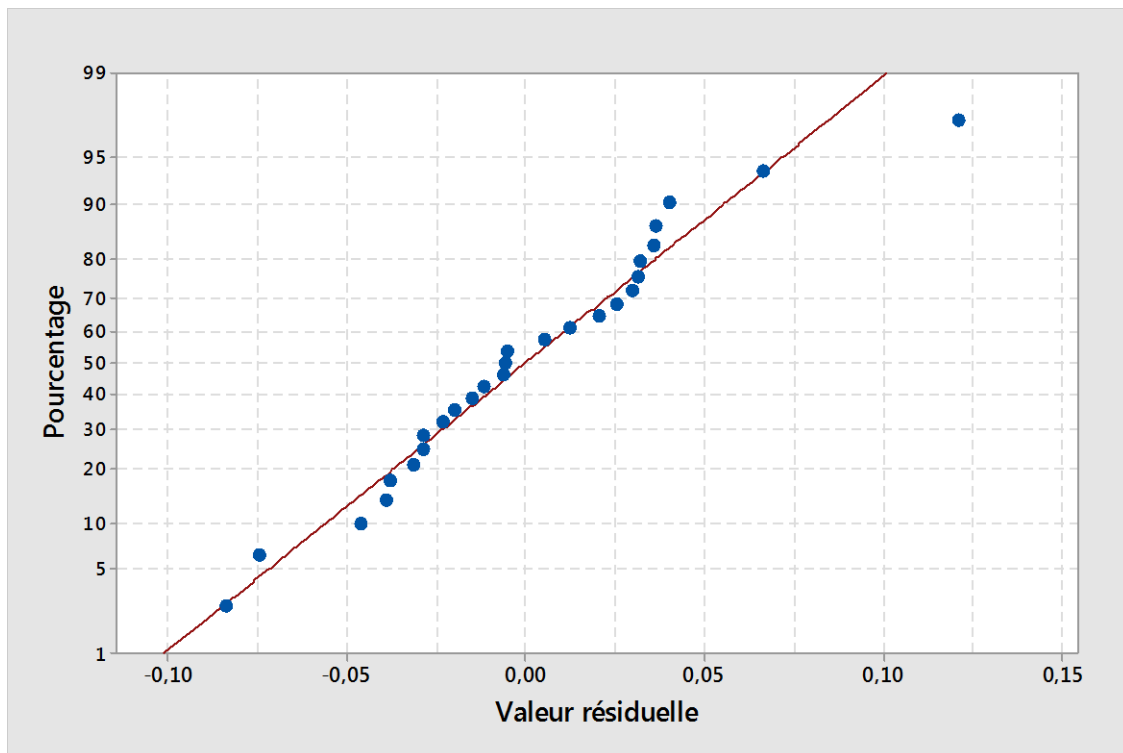


Figure II. 10. Courbe de la probabilité normale de la vitesse pénétration.

II.7. Test de confirmation

Chaque conception d'une expérience nécessite un test de vérification, c'est l'étape finale. Ce test a pour but de vérifier que les conditions optimales obtenues par l'expérience donnent l'amélioration prévue.

Tableau II. 10. Comparaison des valeurs prédites de vitesse de pénétration par la méthode de Taguchi.

Vitesse de pénétration	Taguchi	Expérimentale	Erreur %
Initiale	0.310741	0.32	3%
Optimale	1.33852	1.36	2%

Le tableau II.10 montre une comparaison entre la valeur prédite et la valeur expérimentale de la vitesse de pénétration à un état initiale et à un état optimale. Une petite différence peut être observée entre ces valeurs. Ceci indique que la valeur expérimentale est proche de la valeur prédite. Par conséquent, cela permet de vérifier que le résultat expérimental est fortement corrélé avec le résultat prédit.

II.8. Conclusion

L'objectif de ce travail expérimental était de montrer la corrélation entre la vitesse de pénétration et les paramètres de réglage. Le modèle déterminé par le plan de Taguchi par l'analyse de régression est satisfaisant, il permet de choisir les conditions de forage les mieux adaptées pour travailler dans un régime rationnel.

Les résultats ont permis d'établir d'une part, qu'au-delà d'un seuil de régime optimum, les défauts de l'usure de l'outil de coupe apparaissaient ainsi que les vibrations de train de tige, d'autre part, que la pression d'air est le facteur le plus significatif du modèle pour lequel il est possible de prévenir l'apparition des défauts cités précédemment. L'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

La méthode utilisée dans cette étude est pour plusieurs objectives recherchée : trouver le régime rationnel de forage roto-percutant, augmenter la durée de vie des outils de forage, maximiser la productivité et diminuer les coûts.

Références bibliographiques

- [1] F.M.Ali, S.C. Borse, Optimization of chip load in CNC milling machine of inconel 718 ,Int. J. Pure Appl. Res. Eng. Technol ,4 (5) (2015) 1–12.
- [2] O.S.Fatoba, O.L Akanji, A.S. Aasa, Optimization of carburized UNS G10170 steel process parameters using Taguchi approach and response surface model (RSM), J.Miner. Mater. Charact. Eng, 2 (2014) 566–578.
- [3] M.S.Phadke, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, New Jersey,1989.
- [4] S.H.Hsiang, Y.W. Lin, J.W. Lai, Application of fuzzy based Taguchi method to the optimization of extrusion of magnesium alloy bicycle carriers , J. Intell. Manuf , 23 (2012) 629–638.
- [5] P.R. Periyanan,U. Natarajan, S.H. Yang , A study on the machining parameters optimization of micro-end milling process ,International Journal of Engineering, Science and Technology , 3(6) (2011), 237-246.
- [6] S. Shafee, B.B. Naik, K. Sammaiah, M. Mohinoddin, RSW Process Parameters Optimization by Taguchi Method , Journal of Mechanical and Civil Engineering ,11(5) (2014),46-54.
- [7] H.Héraud ,J.J. Leblond , C. Souchet ,J.Y. Veronneau ,J.M. Bellerepayre, Minage. Intérêts technique et économique d'une foration de qualité en carrière, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées n°215(1994), 33-39.
- [8] Atlas Copco Rock Drilling Tools, SECOROC Down-the-hole equipment.
- [9] X. Li, G. Rupert, D.A. Summers, P. Santi, D. Liu, Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability, Rock Mechanics and Rock Engineering, 33(1) (2000),1–13.
- [10] Raymond R. 1998, a drilling for water, a pratical Manuel; Edition Avebury/Cranfield University Ray.
- [11] R. Teale, The concept of Specific Energy in Rock Drilling". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 2(1965), 57-73.
- [12] J.C.Jaeger ,N.G.W. Cook , Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen & Co Ltd,Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc,Littleton Colorado 1969.

-
- [13] C.H. Song, K.B. Kwon, J.Y. Park et al., Optimum design of the internal flushing channel of a drill bit using RSM and CFD simulation, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(6) (2014), 1041–1050.
- [14] R.A. Cunningham, *Laboratory Studies of the Effect of Rotary Speed on Rock-bit Performance and Drilling Cost*, American Petroleum Institute, 1960.
- [15] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley and Sons, New York, 1991.
- [16] Johnson Screen Joseph S. Dveinny, "migration of hazardous wastes" Johnson Screen "Groundwater and Wells" Second Edition" Johnson Screen 1986.
- [17] M. Yahiaoui, *Comportement tribologique de diamants polycristallins et de carbures cémentés WC-Co avec traitements de graduation application aux inserts et taillants d'outils pour le forage de forme fortement abrasives*, thèse de doctorat, université de Toulouse, France, 2013.
- [18] M. Chahal, V. Singh, R. Garg, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, (2016) 1-13.
- [19] R.A. Roy, *Primer on the Taguchi method*, Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [20] A. Hamdan, A.A.D. Sarhan, M. Hamdi, An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish", *Int J Adv Manuf Technol*, 58(2012), 81–91.
- [21] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd, New York, 2001.
- [22] J.P. Wang, Y.Z. Chen, X.W. Ge, H.Q. Yu, Optimization of Coagulation-Flocculation Process for a Paper Recycling Wastewater Treatment Using Response Surface Methodology", *Colloids and Surfaces A*, 302(2007), 204-210.
- [23] H. Aouici, M.A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki, J.F. Rigal, Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization", *Measurement*, 45(2012), 344–353.
-

Chapitre III

Modélisation par la méthodologie de surface de réponse

III.1. Introduction

L'utilisation correcte et efficace des machines de forage est associée avec l'évaluation économique dans l'industrie minière. Une prédiction de la vitesse de pénétration est nécessaire pour travailler dans un régime rationnel.

Ce chapitre est consacré à la détermination d'un modèle mathématique du processus de forage roto-percutant. Le modèle trouvé permet d'exprimer les relations entre les éléments de réglage de forage (Pression d'alimentation d'air, vitesse de rotation et la pression spécifique d'avance) et le paramètre géométrique (le diamètre de l'outil de coupe) sur la vitesse de pénétration de forage roto-percutant dans la carrière de Hadjar-Soud. La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été utilisée avec l'analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer l'influence (contribution %) des paramètres d'entrée sur les paramètres de sortie. Les expériences sont réalisées sur la base d'un plan expérimental mixte L_{18} de Taguchi et en dernier lieu, on a terminé ce chapitre par une autre investigation sur la topographie de surface 3D et la courbe de contour.

III.2. Méthode de surface de réponse (MSR) appliquée

La méthode appliquée pour la détermination de modèle mathématique est la méthodologie de surface de réponse (MSR), en utilisant un logiciel de statistique « Minitab 16 ». Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif.

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est un ensemble de techniques mathématiques et statistiques [1], elle est utile pour la modélisation et l'analyse de problèmes d'ingénierie, ainsi que pour le développement, l'amélioration et l'optimisation de processus [2].

L'analyse de régression est utilisée pour identifier les relations entre les réponses et les variables afin d'établir un modèle mathématique adéquat qui satisfasse la relation entre un groupe de facteurs de test et des fonctions objectives [3,4]. Une équation de modèle de surface de réponse de second ordre est la suivante [5] :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_{iu} + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_{iu} x_{ju} + \varepsilon \quad (III.1)$$

Où:

- Y : représente la réponse désirée ;
- x_{iu} et x_{ju} : les paramètres d'entrée (facteurs);
- b_0 : constante de l'équation de régression;
- b_i : coefficients linéaires;
- b_{ii} : coefficients quadratiques;
- b_{ij} : coefficients d'interaction;
- ε : est une erreur d'adaptation.

Les coefficients du modèle pour la réponse correspondante sont estimés à l'aide de la technique d'analyse de régression incluse dans la méthodologie de surface de réponse (MSR).

Le modèle choisi prend en compte les effets linéaires, d'interaction et quadratiques.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. L'ANOVA permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de forage roto-percutant sur la vitesse de pénétration (V_p).

III.3.Réalisation de l'expérience

III.3.1. Déroulement de l'expérience

Les expériences de forage sont programmées dans la carrière de Hadjar-Soud afin d'étudier l'effet des paramètres opérationnels à savoir la pression spécifique d'avance, la vitesse de rotation du train de tige et la pression d'alimentation du marteau ainsi que le paramètre d'entrée (diamètre de l'organe de travail) sur l'avancement de l'outil pendant le forage roto-percutant.

Le forage expérimental a été réalisée par deux sondeuses INGERSOLL RAND CM-780D et FLEXIROC D50 sur deux endroits de la surface de travail de la carrière dont les propriétés physico-mécaniques de la roche sont homogènes.

La sondeuses INGERSOLL RAND CM-780D a été équipée d'un marteau fond du trou COP 64.2 pneumatique avec un outil de forage de type à dents demi sphérique d'un diamètre de 165 mm. D'autre part la sondeuse FLEXIROC D50 a été équipée aussi d'un marteau fond du trou COP 44 pneumatiques avec un outil de la même forme que celui de la sondeuse cité préalablement d'un diamètre de 115 mm.

L'expérience du forage a été planifiée comme suit :
Le réglage des paramètres a été effectué pendant trois fois pour chacun des paramètres suivants :

- La pression spécifique d'avance (45, 50, 55 kgf/cm²) ;
- La pression d'alimentation en air (13, 15, 17 bar) ;
- La vitesse de rotation (35, 45, 55 tr/min).

Pour chaque sondeuse, la variation de la pression spécifique d'avance se fait par une unité de contrôle, ensuite une pression sera fixée sur le baromètre de la centrale pneumatique, et le forage est effectué.



Figure III. 1. Machines de forage pendant le régime de travail dans Hadjar-Soud.

La variation de la vitesse de rotation est également effectuée par une unité de contrôle, lors de la pénétration de l'outil, une valeur de la vitesse de rotation de la tige est prise avec un minimum de trois mesures à l'aide d'un tachymètre optique " Beta 1760 / TC2 ", en gardant la valeur moyenne. On aligne le faisceau de lumière visible du tachymètre à une distance de 1,5 m de train de tige sur l'adhésif catadioptrique qui est déjà collé en trois positions sur la circonférence de la tige, les résultats sont affichés sur l'écran du tachymètre, et les valeurs moyennes ont été prises en considération pour chaque mesure .

A la fin la pression d'air a été variée par une manette d'un diaphragme d'où la valeur s'illustrera sur le baromètre du générateur d'air.



Figure III. 2. Le tachymètre optique "Beta 1760 / TC2".

III.3.2. Caractéristique de marteau

Les caractéristiques du marteau fond du trou COP 44 sont données dans le tableau III.1 comme suit :

Tableau III. 1. Caractéristiques techniques du marteau COP 44[6].

Marteau fond du trou	Diamètre de l'outil de forage [mm]	Vitesse de rotation [tr/min]	Force axiale [KN]	Pression d'alimentation en air [bar]
COP 44	115	25 – 80	5 - 15	6 – 25

III.3.3. Conception des expériences

Les expériences ont été réalisées selon la méthode de Taguchi selon le plan orthogonal mixte L_{18} . Ce plan a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. Le diamètre de l'outil de forage (A), la pression spécifique d'avance (B), la vitesse de rotation (C) et la pression de l'air (D) ont été sélectionnés comme facteurs de contrôle et leurs niveaux ont été déterminés comme indiqué dans le tableau III. 2.

Tableau III. 2. Les facteurs et niveaux sélectionnés.

Facteurs	Code	Niveaux		
		1	2	3
Diamètre de l'outil de coupe [mm]	A	115	165	-
Pression spécifique d'avance [kgf /cm ²]	B	45	50	55
Vitesse de rotation [tr/min]	C	35	45	55
Pression d'air [bar]	D	13	15	17

III.3.4. Plans d'expériences

Le tableau orthogonal L_{18} est le plus approprié pour notre étude. Il a été sélectionné pour la réalisation de la série d'expériences (tableau III.3).

La matrice d'expériences est composée de quatre colonnes correspondantes aux facteurs sélectionnés et 18 lignes représentant la série d'expérience de forage à réaliser.

Tableau III. 3. Plan orthogonal expérimental L_{18} .

N Essais	Facteur codés				Valeurs actuelles			
	X_1	X_2	X_3	X_4	A	B	C	D
1	1	1	1	1	115	45	35	13
2	1	1	2	2	115	45	45	15
3	1	1	3	3	115	45	55	17
4	1	2	1	1	115	50	35	13
5	1	2	2	2	115	50	45	15
6	1	2	3	3	115	50	55	17
7	1	3	1	2	115	55	35	15
8	1	3	2	3	115	55	45	17
9	1	3	3	1	115	55	55	13
10	2	1	1	3	165	45	35	17
11	2	1	2	1	165	45	45	13
12	2	1	3	2	165	45	55	15
13	2	2	1	2	165	50	35	15
14	2	2	2	3	165	50	45	17
15	2	2	3	1	165	50	55	13
16	2	3	1	3	165	55	35	17
17	2	3	2	1	165	55	45	13
18	2	3	3	2	165	55	55	15

III.4. Résultat et discussion

Après la réalisation des essais selon le plan orthogonal L_{18} de Taguchi, la vitesse de pénétration (V_p) est mesurée comme indiquée au-dessus dans le tableau III.4.

Tableau III. 4. Résultats expérimentaux pour un plan (L_{18}).

Essais	A	B	C	D	V_p (m/min)
1	115	45	35	13	0.38
2	115	45	45	15	0.95
3	115	45	55	17	1.35
4	115	50	35	13	0.82
5	115	50	45	15	1.23
6	115	50	55	17	1.30
7	115	55	35	15	1.18
8	115	55	45	17	1.27
9	115	55	55	13	0.81
10	165	45	35	17	0.70
11	165	45	45	13	0.31
12	165	45	55	15	0.99
13	165	50	35	15	0.94
14	165	50	45	17	1.23
15	165	50	55	13	0.74
16	165	55	35	17	1.06
17	165	55	45	13	0.73
18	165	55	55	15	1.13

III.5. Analyse statistique et modélisation de vitesse de pénétration

III.5.1. Graphes des effets moyens et des interactions

L'augmentation de la pression de l'air comprimé qui offre la possibilité d'accroître la pénétration de l'outil dans la roche ce qui augmente la productivité de la sondeuse, d'une part, et de l'autre part, cette augmentation permet la diminution de la durée de vie de l'organe de travail à cause des surcharges agissant sur ses éléments, si on travaille hors des limites techniques.

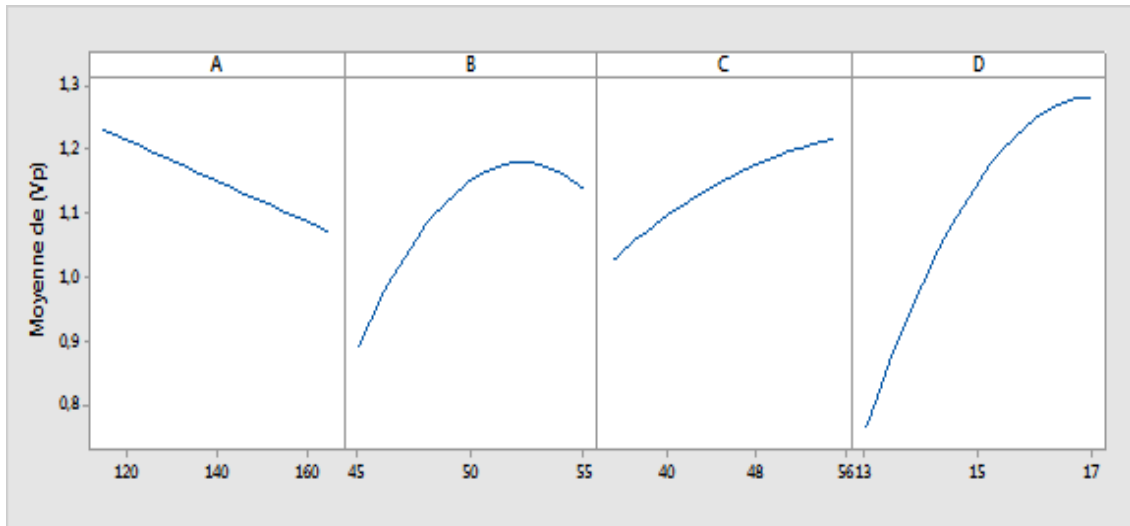


Figure III. 3. Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p).

La vérification de l'expérience selon la figure III.3 a montré qu'avec l'augmentation de la vitesse de rotation, la pression d'alimentation et la pression spécifique d'avance jusqu'à 50 kgf/cm^2 , il y a provocation de l'augmentation de la vitesse de pénétration. Au-delà de ces limites, la productivité de la sondeuse diminue, ce qui s'explique par le coincement de l'outil et l'apparition des vibrations à cause des débris au fond du trou. D'autre part l'augmentation du diamètre d'un outil provoque une diminution de la vitesse de pénétration, donc l'utilisation d'une sondeuse avec un outil d'un diamètre de 165 mm ayant une productivité moins que l'utilisation d'une sondeuse avec un outil de diamètre de 115 mm dans ces conditions.

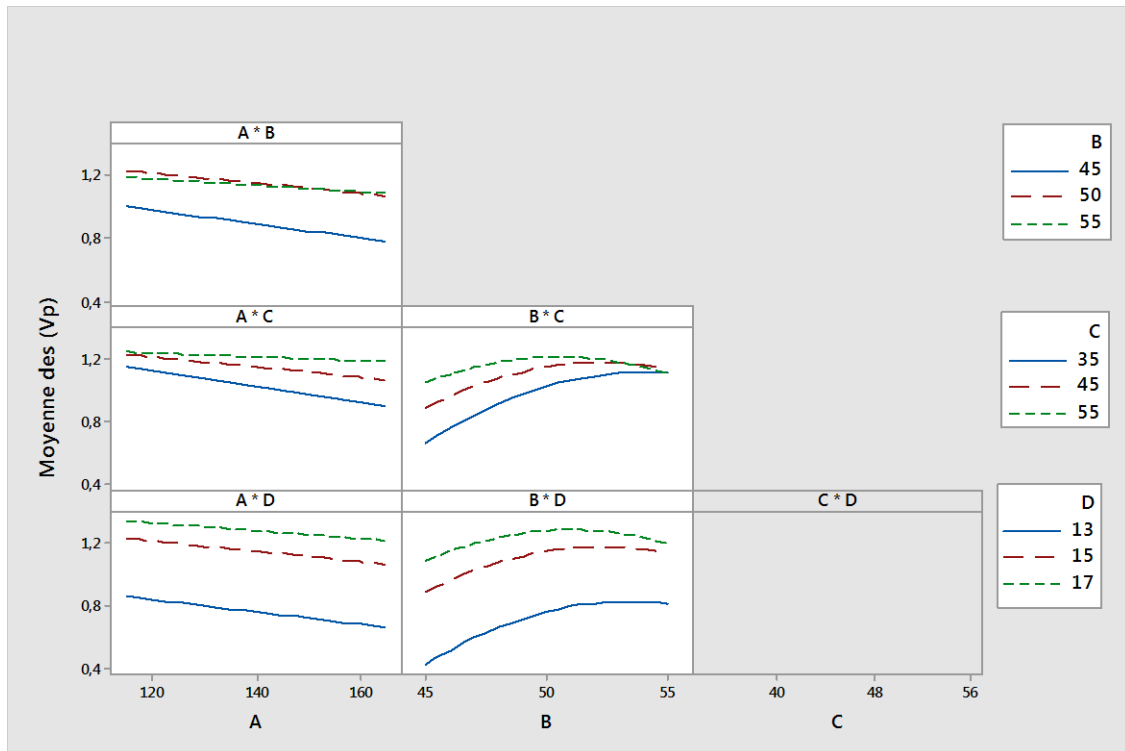


Figure III. 4. Diagramme des effets d'interactions des facteurs sur la vitesse de pénétration.

La figure III. 4 montre le diagramme des interactions des paramètres de réglage de deux sondeuses ayant un diamètre différent de l'outil de coupe pour la vitesse de pénétration pendant un forage roto-percutant. D'après l'allure des courbes, on constate qu'il y'a des interactions entre toutes les variables choisies pour le modèle. Alors, ce diagramme exprime bien l'effet de ces interactions entre ces facteurs.

III.5.2. Modélisation mathématique

Le modèle mathématique de la vitesse de pénétration est donné comme suit:

$$\begin{aligned}
 V_p = & -29.75 - 0.0290 A + 0.739 B + 0.1055 C + 1.399 D - 0.00553 B \times B - 0.000300 C \times C \\
 & - 0.03234 D \times D + 0.000227 A \times B + 0.000198 A \times C + 0.000367 A \times D - 0.001935 B \times C \\
 & - 0.00701 B \times D \qquad \qquad \qquad (III.2)
 \end{aligned}$$

A partir du modèle mathématique développé sur la base de la méthodologie de surface de réponse (MSR), on examine l'effet des paramètres d'entrée sur la vitesse de pénétration (tableau III.5) par l'analyse d'ANOVA.

III.5.3. Analyse de la variance (ANOVA)

Le tableau III.5 récapitule les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la vitesse de pénétration de cette série des expériences.

Tableau III. 5. Résultats de l'analyse de Variance de la vitesse de pénétration.

Source	DL	SS	CM	F- Valeur	Prob	P _c %
Modèle	12	1.54806	0.129005	34.45	0.001	
Linéaire	4	0.93216	0.233040	62.24	0.000	
A	1	0.11842	0.118422	31.63	0.002	10.45
B	1	0.18750	0.187500	50.08	0.001	16.54
C	1	0.06594	0.065941	17.61	0.009	5.82
D	1	0.49636	0.496360	132.57	0.000	43.79
Quadratique	3	0.13778	0.045925	12.27	0.010	
B*B	1	0.07654	0.076544	20.44	0.006	6.75
C*C	1	0.00307	0.003067	0.82	0.407	0.27
D*D	1	0.05690	0.056900	15.20	0.011	5.02
2- Interaction	5	0.09900	0.019800	5.29	0.046	
A*B	1	0.00963	0.009633	2.57	0.170	0.85
A*C	1	0.01624	0.016239	4.34	0.092	1.43
A*D	1	0.00222	0.002223	0.59	0.476	0.20
B*C	1	0.05371	0.053713	14.35	0.013	4.74
B*D	1	0.02818	0.028183	7.53	0.041	2.49
Erreur	5	0.01872	0.003744			1.65
Total	17	1.56678				

Le modèle de régression quadratique pour la vitesse de pénétration a un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0.9881$). En fait, cette valeur ne peut expliquer que 98.81 % de la

variabilité de la réponse par le modèle et que 1.19 % restent par conséquent inexpliqués. Cette valeur du coefficient de détermination indique que les mesures de vitesse de pénétration obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de la vitesse de pénétration est $R^2_{\text{adj}} = 0.9594$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une corrélation et indiquent clairement un accord qualitatif entre ce modèle et les données expérimentales.

Afin de tester la validation du modèle, l'analyse de variance a été réalisée à l'aide d'un logiciel statistique « Minitab 16 » pour la vitesse de pénétration et est résumée dans le tableau III.5, ANOVA est un outil puissant statistique, le plus utilisé pour extraire des informations utiles contenues dans les données [7] qui montrent l'effet de divers paramètres d'entrée sur les réponses de sortie étudiées. L'étude d'ANOVA a été réalisée pour déterminer l'influence des variables principales sur la vitesse de pénétration et aussi pour déterminer le pourcentage de contributions de chaque variable. Cette analyse a été réalisée à un niveau de signification $\alpha = 5\%$ (niveau de confiance de 95 %).

Le test du F de Fisher est calculé pour le modèle et sa valeur est : « $F = 34.45$ ». Comme indiqué dans le tableau III.5, la probabilité (Prob > F-Valeur) associée au test de Fisher (F-Valeur) est de 0.001. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 0.1 %, ce qui est négligeable. La partie linéaire du modèle est la plus significative (« Prob » > F-Valeur = 0.001) suivie par les parties quadratiques et interaction dans cet ordre. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

La signification des facteurs de contrôle dans l'analyse de la variance est réalisée en comparant les valeurs de « Prob » de chaque facteur des sources de contrôle, avec des valeurs de « Prob » inférieures à 0.05 considérées comme ayant une contribution statistiquement significative aux mesures de performance. Il s'ensuit en fonction de la valeur de « Prob » qu'il n'y a pas d'effet significatif pour le carré de la vitesse de rotation (C), l'interaction (AB), l'interaction (AC) et l'interaction (AD).

La dernière colonne du tableau III.5 indique la contribution en pourcentage ($P_c\%$) de chaque facteur source sur la variabilité de la réponse totale. Ces valeurs donnent le degré d'influence de chaque facteur sur la vitesse de pénétration.

Selon les résultats de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration (tableau III.5), les contributions en pourcentage, montrent que le facteur le plus important et dominant ayant influé sur la vitesse de pénétration était la pression atmosphérique (facteur D ; 43.79 %).

III.6. Validation du modèle

La vérification de l'adéquation du modèle est une partie importante du procédé d'analyse de données pour les plans expérimentaux. Elle consiste à comparer le résultat théorique d'une expérience calculée par le modèle (les valeurs prédites), avec le résultat réel d'un essai (les valeurs expérimentales).

- Si la réponse expérimentale est très proche de la réponse prédite, le modèle est satisfaisant et fiable ;
- Si la réponse expérimentale est éloignée de la réponse prédite, le modèle est insatisfaisant et n'est pas fiable.

III.6.1. Représentation graphique des réponses mesurées théoriquement en fonction des réponses prédites.

A partir de la figure III.5, les résultats justifient la bonne concordance entre l'expérimentation et la prédiction de ce fait, le modèle développé peut être considéré comme plus cohérent et plus approprié pour la prédiction de la vitesse de pénétration.

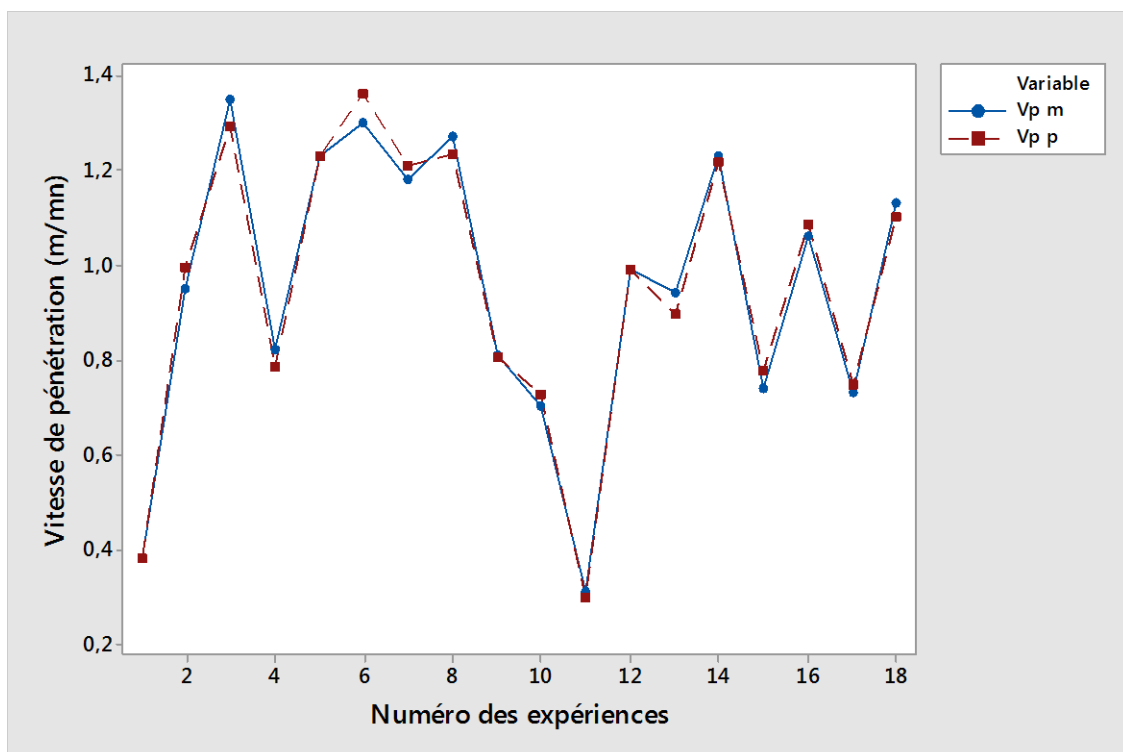


Figure III. 5. Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales de la vitesse de pénétration du modèle obtenu.

III.6.2. Test de la normalité du plan de Taguchi

La représentation graphique des résidus fournit par le « Minitab 16 » permet de vérifier les hypothèses statistiques et à valider les résultats obtenus. Les tests de normalité permettent de vérifier si les données réelles suivent une loi normale ou non. Pour compléter l'analyse statistique du modèle, on peut étudier l'analyse des valeurs résiduelles.

Un autre intérêt des techniques d'analyse de la variance est la représentation graphique des résidus. Elle permet de constater visuellement s'il reste encore de l'information à extraire de l'ensemble des résidus. On observe si les résidus sont distribués aléatoirement ou non [8].

III.6.2.1. Droite de Henry des valeurs résiduelles

La figure III.6 montre que pour la probabilité normale des résidus du modèle de la vitesse de pénétration, les résidus s'ajustent presque parfaitement à la ligne droite (droite de Henry), ce qui permet de conclure que les erreurs ont une distribution normale et par conséquent le modèle développé est adéquat.

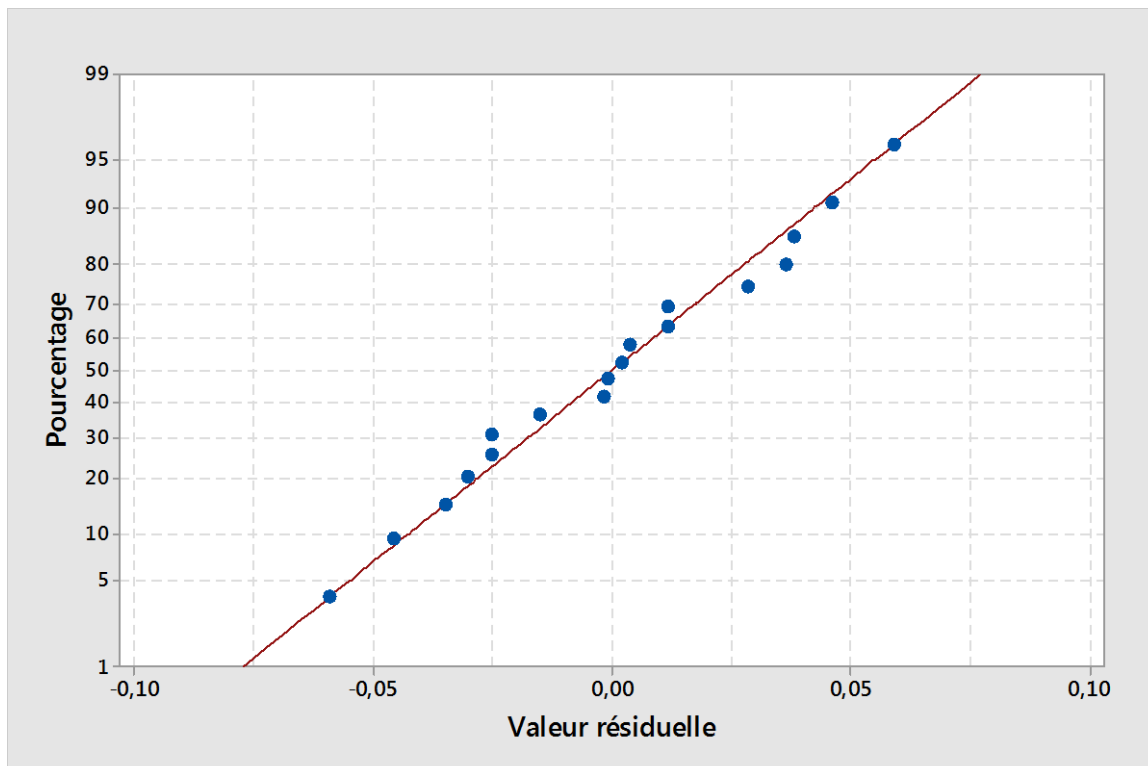


Figure III. 6. Courbe de la probabilité normale pour la vitesse de pénétration.

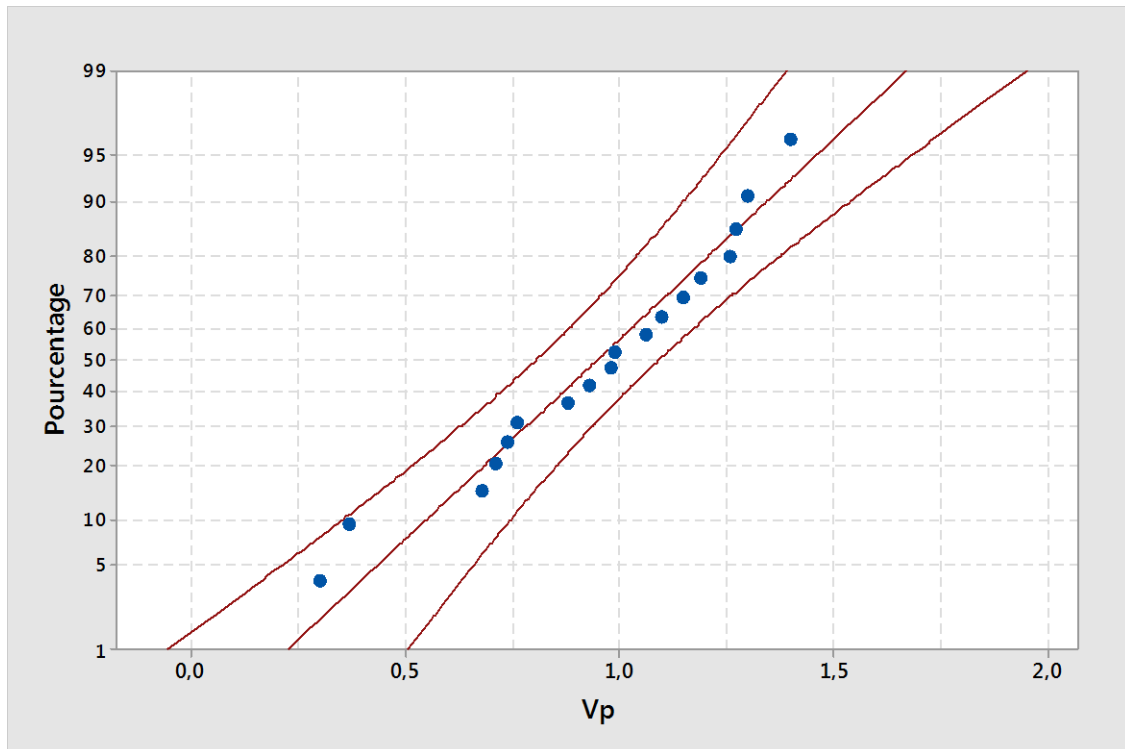


Figure III. 7. Analyse des résidus.

L'analyse des résidus sur la figure III.7 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

III.6.2.2. Valeurs Résiduelles en fonction des valeurs ajustées pour la vitesse de pénétration

Ce graphique permet de détecter les variances non-constantes, les termes d'ordre supérieur manquants et les valeurs aberrantes. Les valeurs résiduelles normalisées (> -0.075) et (< 0.075) sont généralement considérées comme importantes.

Les valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées (figure III.8) ont montré des répartitions de manière aléatoire autour de zéro. On remarque que ces valeurs sont distribuées de manière aléatoire autour de zéro. Les valeurs résiduelles ne présentent pas des schémas particuliers ou des points situés à l'écart des autres points.

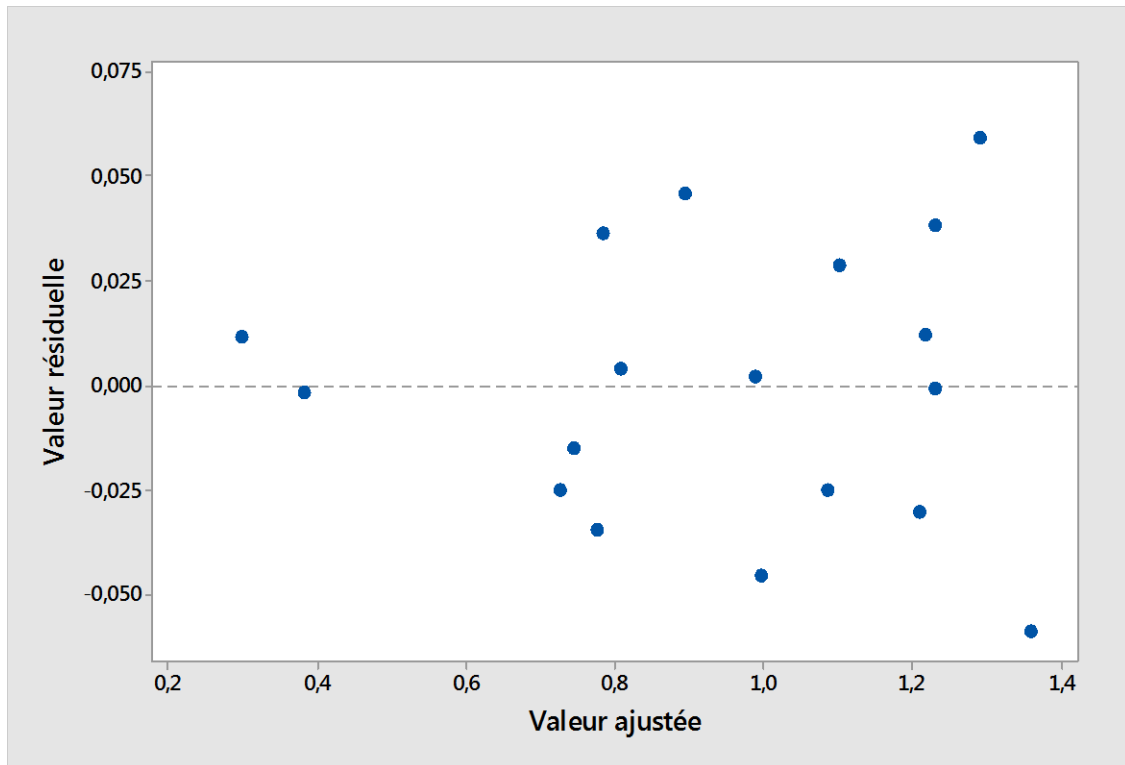


Figure III. 8 . Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées pour la vitesse de pénétration.

III.6.2.3. L'histogramme des valeurs résiduelles de la vitesse de pénétration

Ce graphique permet de détecter les pics multiples, les valeurs aberrantes et la normalité. Ce graphique permet de repérer une normalité. Un histogramme normal doit être à peu près symétrique et avoir la forme d'une cloche.

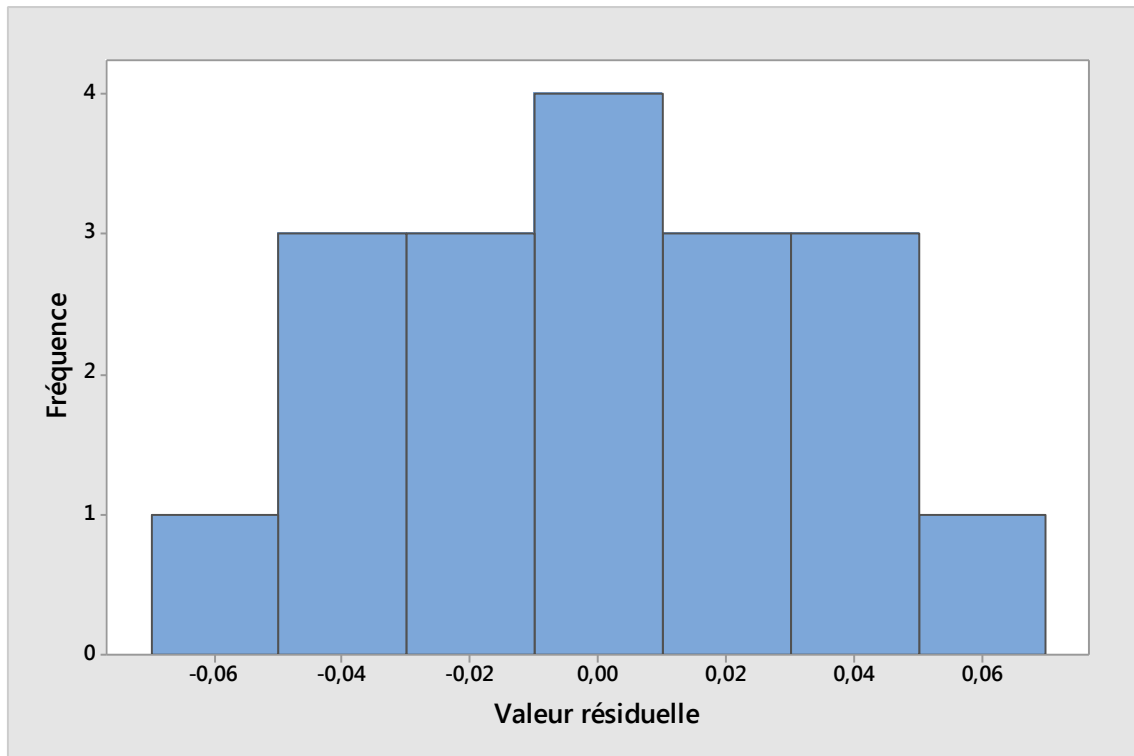


Figure III. 9. Histogramme des valeurs résiduelles de la vitesse de pénétration.

III.6.2.4. Valeurs résiduelles en fonction de l'ordre des observations pour la vitesse de pénétration

Les valeurs résiduelles en fonction de l'ordre d'observation permettant de repérer la dépendance chronologique des valeurs résiduelles, ont présenté une structure aléatoire (figure III.10) où les points sont éloignés des autres points. La présence de schémas dans les points peut indiquer que les valeurs résiduelles qui sont proches les unes des autres peuvent être corrélées, et ne sont donc pas indépendantes. Idéalement, les valeurs résiduelles du graphique doivent être réparties de façon aléatoire autour de la ligne centrale.

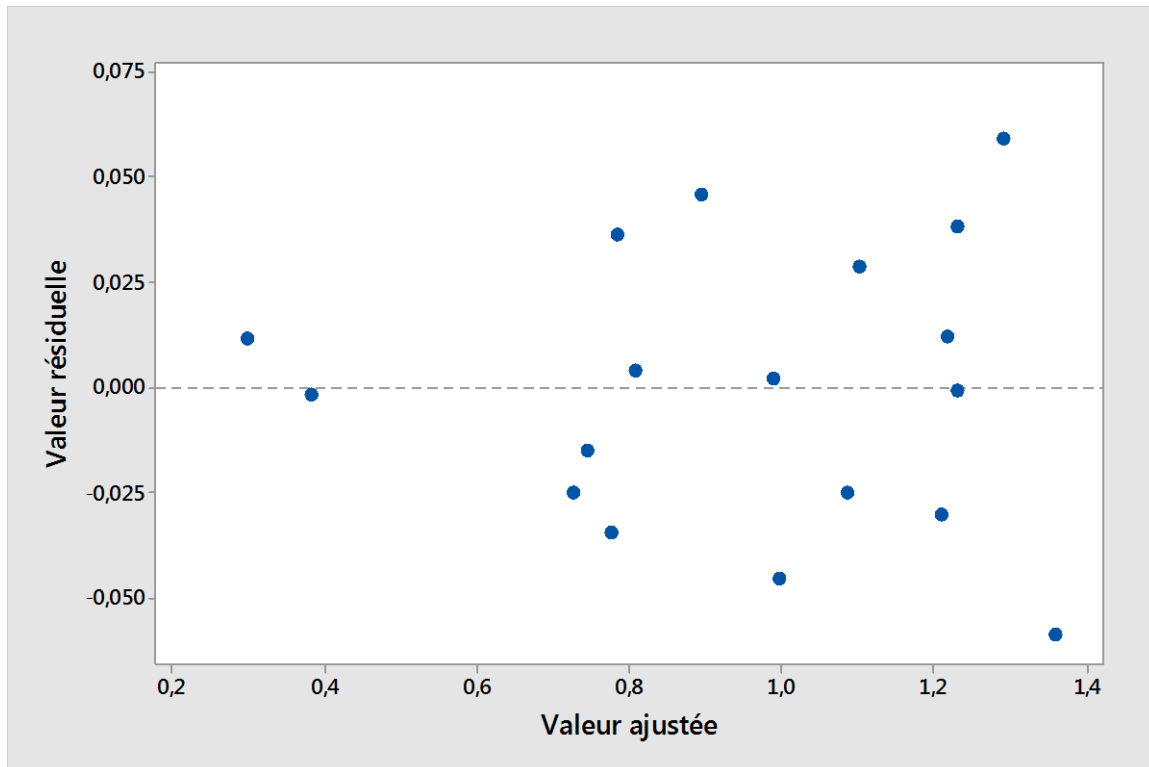


Figure III. 10 . Les valeurs résiduelles en fonction de l'ordre d'observation de la vitesse de pénétration.

III.7. Analyse des surfaces de réponse

Afin de mieux visualiser l'effet des paramètres d'entrées sur l'évolution de la vitesse de pénétration, une représentation graphique de la surface de réponse a été établie par le logiciel « Minitab 16 » en se basant sur l'équation du modèle (Eq.III.2).

Les graphiques de contour permettent d'étudier les réponses en fonction des conditions d'exploitation. Ils représentent la surface de réponse avec une vue à deux dimensions où les points ayant la même réponse sont reliés pour produire des lignes de contour de réponses constantes, ce qui nous donne des intervalles de réponse qui varient selon les conditions d'exploitation.

Les diagrammes de surface en 3D sont des graphiques permettant d'explorer la relation éventuelle entre trois variables. Les variables de prédiction apparaissent sur les échelles des X et des Y, et la variable de réponse (Z) est représentée par une surface lisse (diagramme de surface en 3D).

Des graphiques 3D et des courbes de contour sont données par les figures (III.11, III.12, III.13, III.14, III.15 et III.16) chaque courbe représente une infinité de combinaisons entre les variables choisies.

Les surfaces de réponse peuvent présenter les variations des réponses en fonction de seulement deux facteurs à la fois, les autres facteurs étant réglés sur une valeur fixe.

Nous avons choisi à chaque fois deux facteurs fixés à un niveau moyen et, les deux autres facteurs étudiés sont représentés sur les axes X et Y.

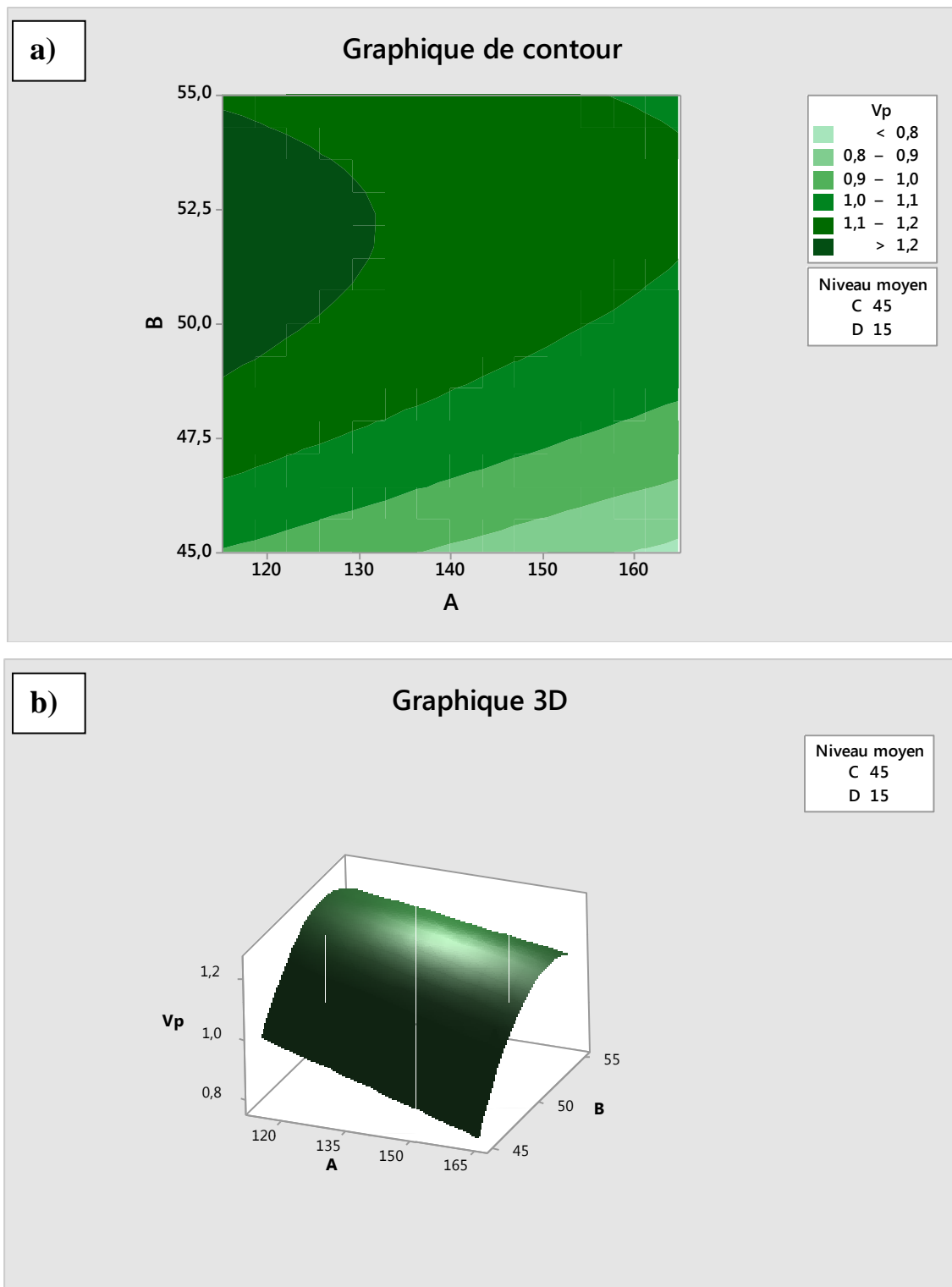


Figure III. 11. Effet de diamètre de l'outil et la pression spécifique d'avance sur la vitesse de pénétration (V_p): (C=45 tr/min et D= 15 bar):**a)** Graphique de contour, **b)** Graphique 3D.

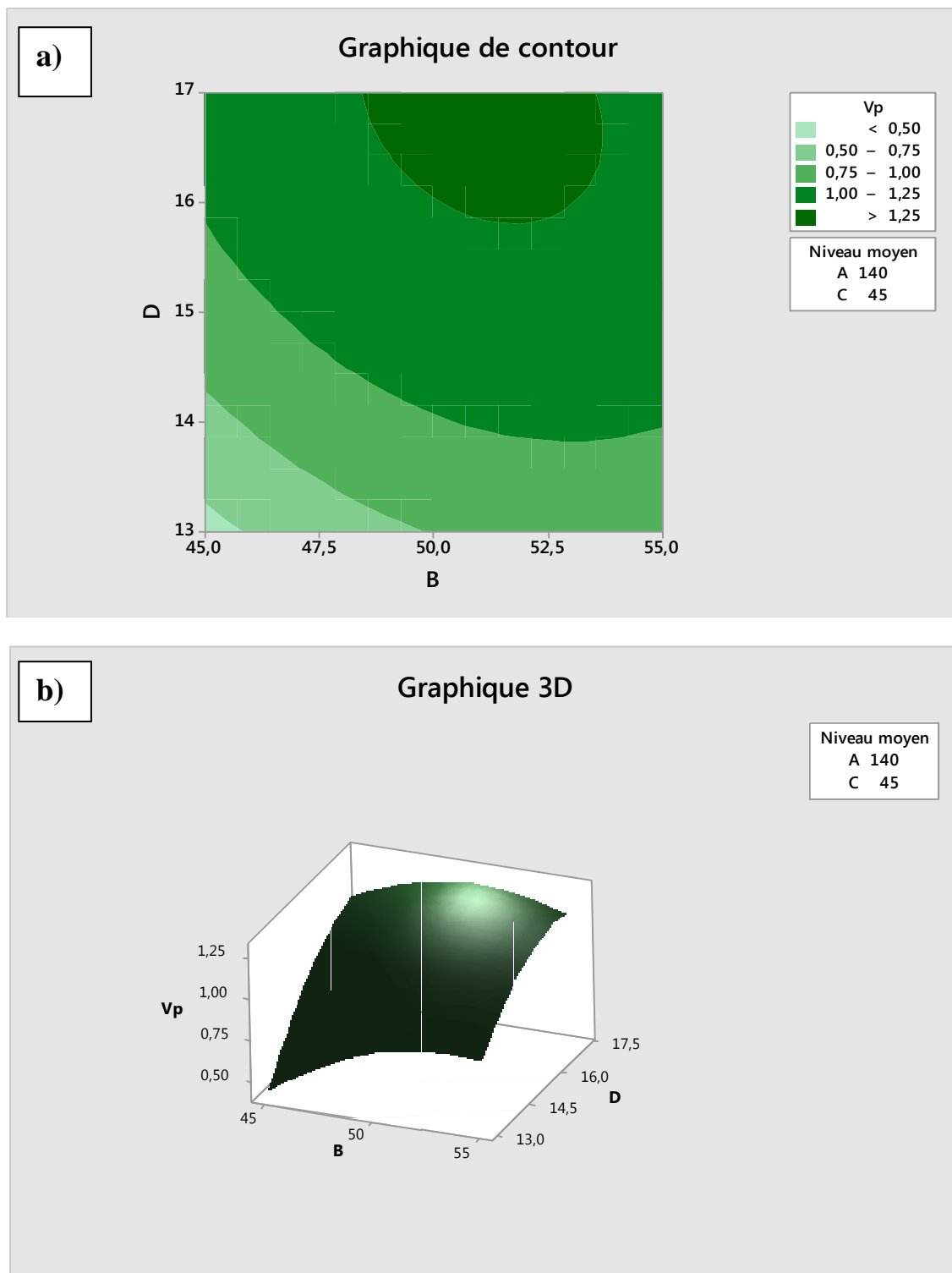


Figure III. 12. Effet de diamètre de l'outil et la pression spécifique d'avance sur la vitesse de pénétration (V_p)
:(C=45 tr/min et D= 15 bar): **a)** Graphique de contour, **b)** Graphique 3D.

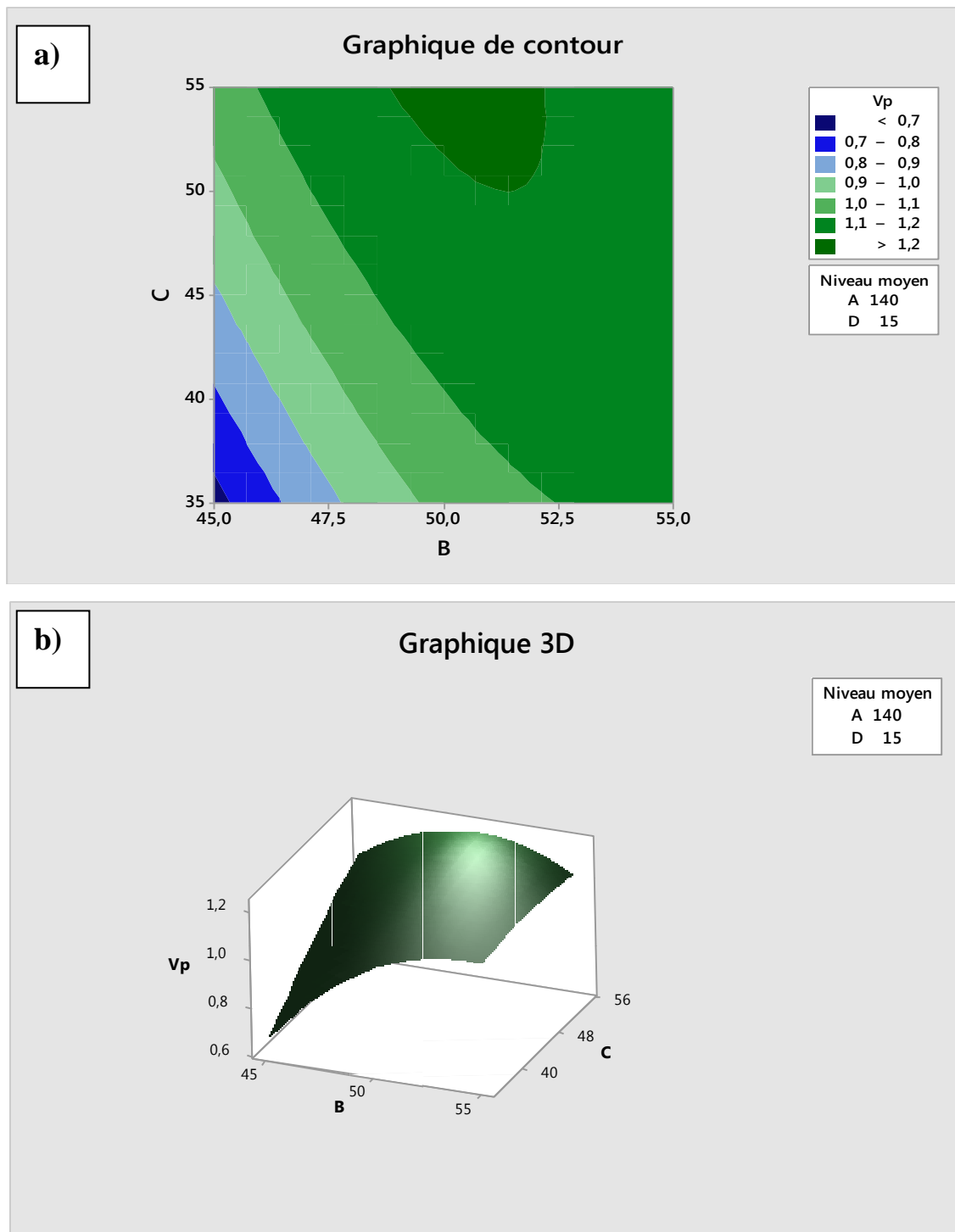


Figure III. 13. Effet de la pression spécifique d'avance et de la vitesse de rotation sur la vitesse de pénétration (V_p) : (A= 140 mm et D= 15 bar): **a)** Graphique de contour, **b)** Graphique 3D.

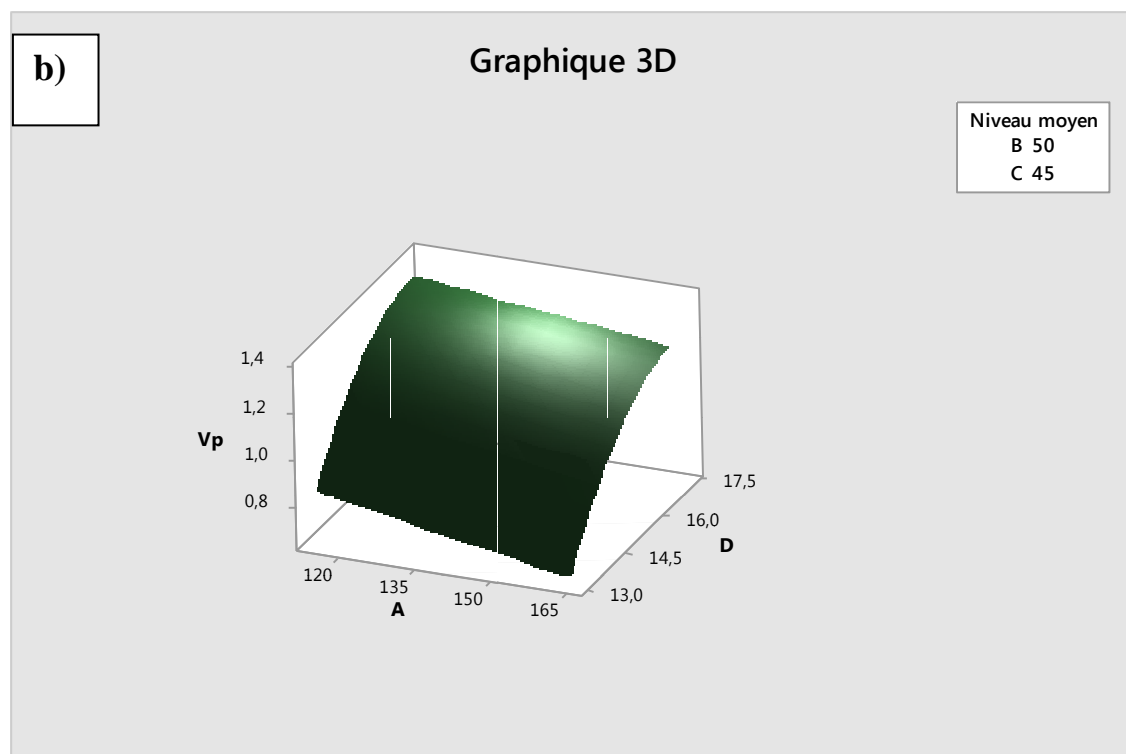
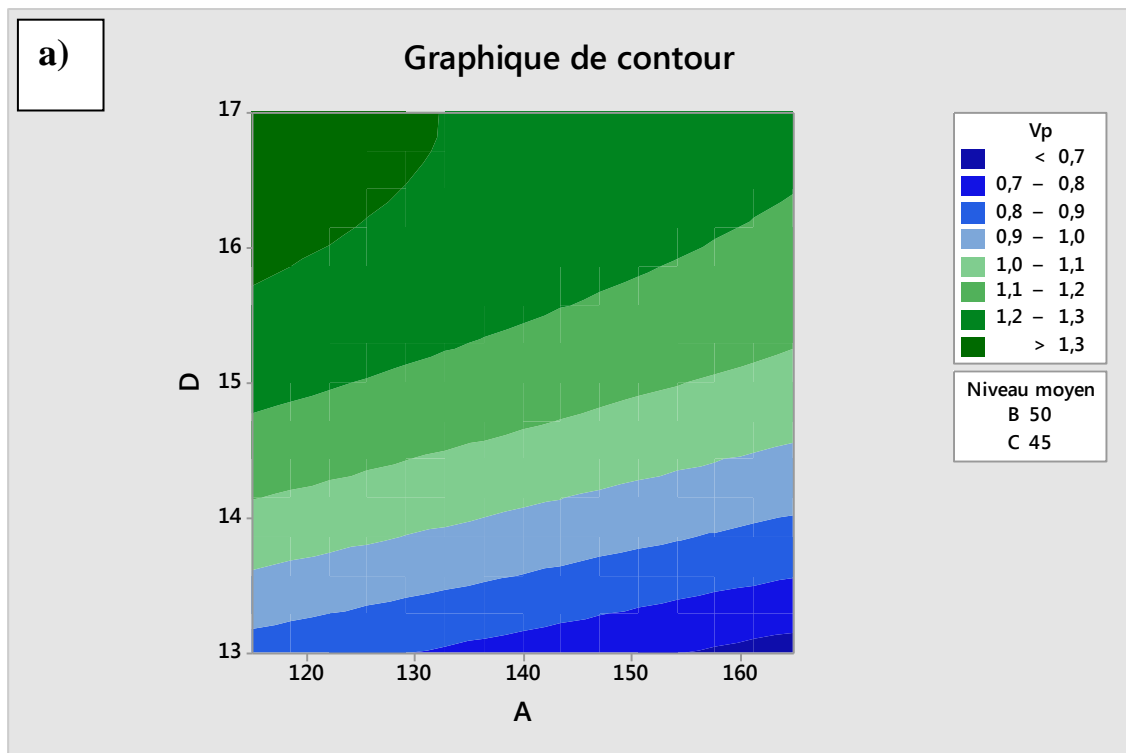


Figure III. 14. Effet de diamètre de l'outil et de la pression d'air sur la vitesse de pénétration (V_p) : (B= 50 kgf/cm² et C= 45 tr/min): a) Graphique de contour, b) Graphique 3D.

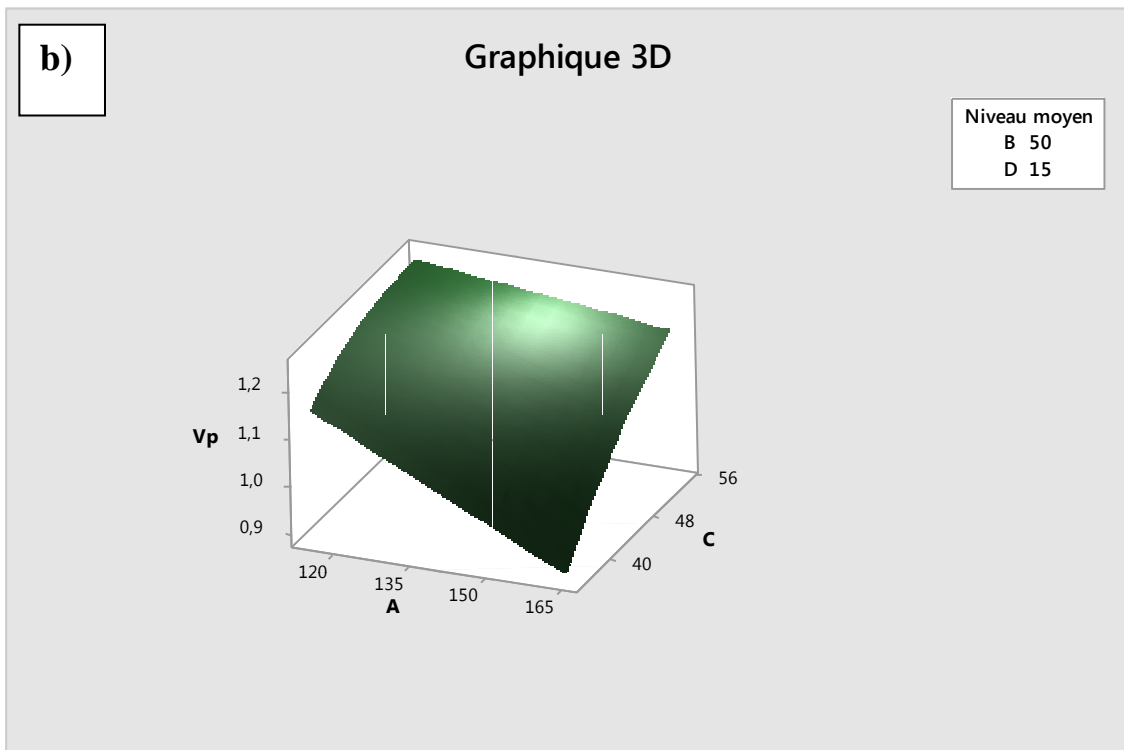
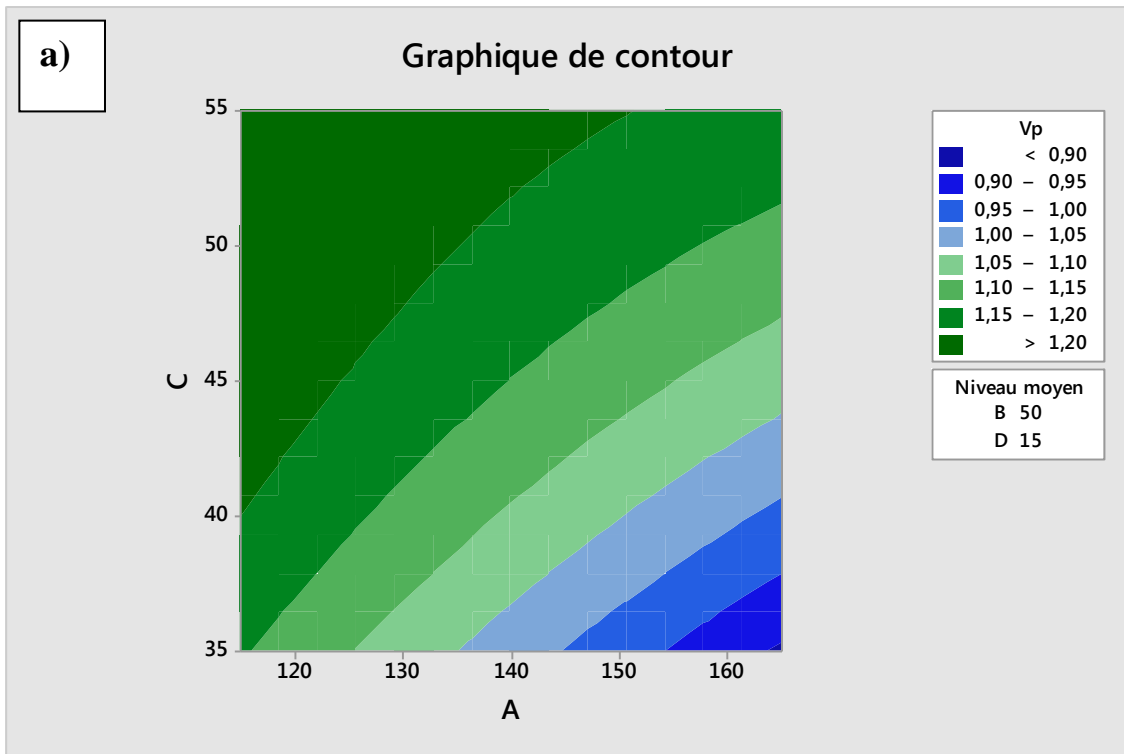


Figure III. 15. Effet de diamètre de l'outil et de la vitesse de rotation sur la vitesse de pénétration (V_p): (B= 50 kgf/cm² et D= 15 bar): **a)** Graphique de contour, **b)** Graphique 3D.

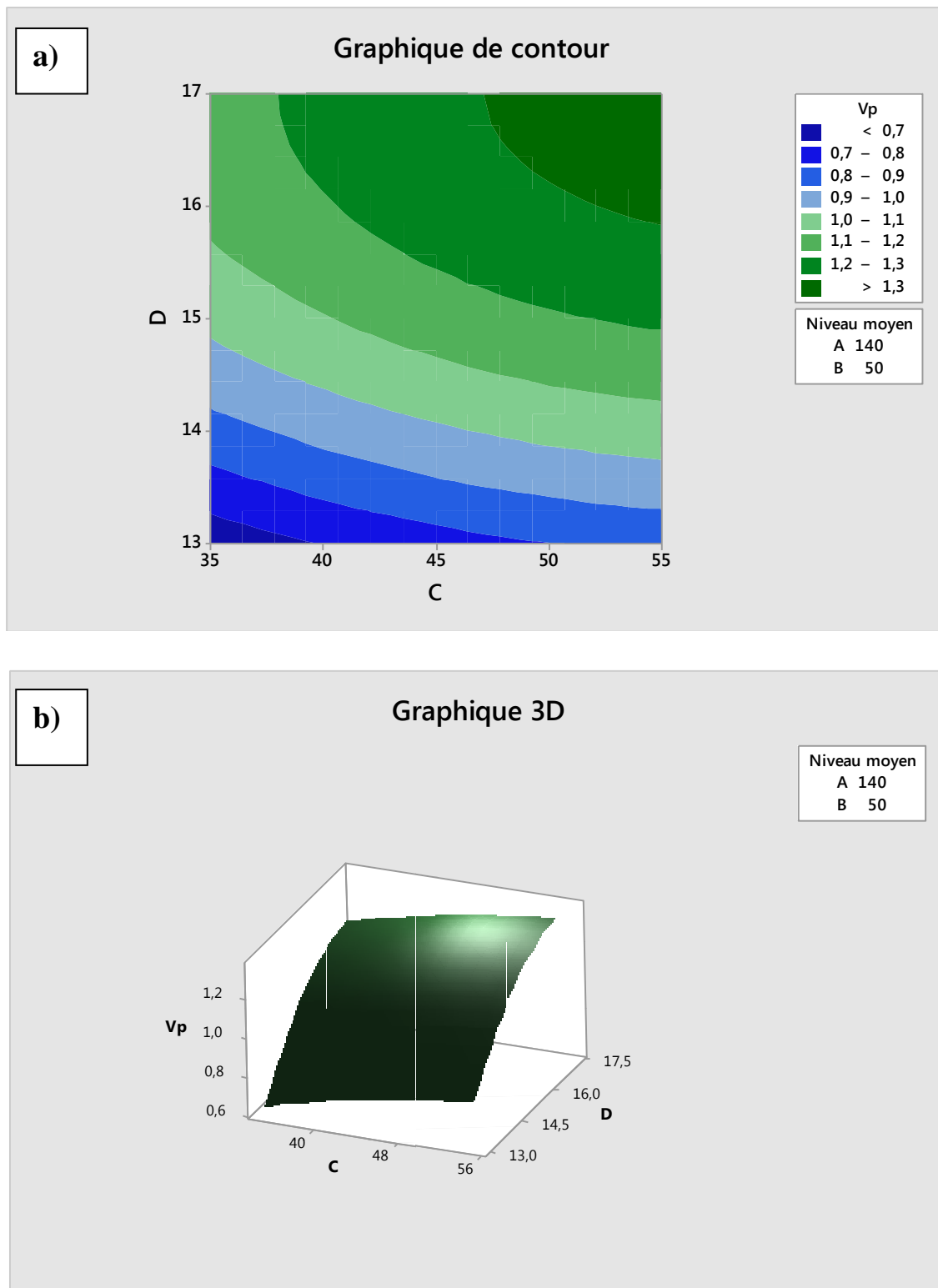


Figure III. 16 . Effet de la vitesse de rotation et la pression d'air sur la vitesse de pénétration (V_p) : (A=140 mm et B= 50 kgf/cm²):**a)** Graphique de contour, **b)** Graphique 3D.

Les principales informations à retirer de ces courbes sont :

La figure III. 11(a, b), l'augmentation du diamètre provoque une diminution de la vitesse de pénétration (V_p). Cette augmentation est apparie pour les grandes valeurs de pression spécifique d'avance. L'effet de la pression spécifique d'avance sur la vitesse de pénétration (V_p) dépend du diamètre (A), pour des diamètres inférieurs à 130 mm l'augmentation de la pression spécifique d'avance (B) implique une augmentation de (V_p), une vitesse de pénétration maximale ($V_p = 1.23$ m/min) apparaît à $A = 115$ mm et $B = 50$ kgf/cm².

L'augmentation de la vitesse de rotation (C) et la pression spécifique d'avance (B) (figure III. 12 (a, b)) provoque une augmentation de la vitesse de pénétration avec des grandes valeurs de pression d'air (D).

La (figure III.13 (a, b)) montre l'effet de la vitesse de rotation (C) sur la vitesse de pénétration (V_p), la (V_p) dépend de la pression spécifique d'avance (B); pour des pressions (B) supérieurs à 45.5 bar, l'augmentation de la vitesse de rotation (C) implique une augmentation de (V_p), la vitesse de pénétration a tendance à diminuer lorsque la pression d'avance (B) et la vitesse de rotation (C) diminuent.

L'augmentation de diamètre (A) entraîne la diminution de la vitesse de pénétration, cet effet est clair pour les faibles pressions d'alimentation (D) (figure III.14 (a)). La vitesse de pénétration est maximale pour des faibles diamètres (A) et des pressions élevées (D). La (figure III.14 (b)) montre que la plus grande pente est accentuée pour un niveau maximal de la pression d'alimentation d'une part et un niveau minimale de diamètre de l'outil d'autre part.

L'augmentation de vitesse de rotation (C) entraîne l'augmentation de la vitesse de pénétration, cet effet est illustre pour les faible diamètres (A) voir la (figure III.15 (a)). La figure III.15 (b) montre qu'un petit diamètre de l'outil (A) a une grande influence sur (V_p) quand la vitesse de rotation est fixée dans son niveau haut, car elle a la plus grande pente dans ces conditions.

L'augmentation de la pression d'alimentation (D) entraîne une augmentation de la vitesse de pénétration (V_p). Cette augmentation est accentuée avec l'augmentation de la vitesse de rotation (C) (figure III.16 (a)). La (figure III.16 (b)) montre que la plus grande pente apparaît à un grand niveau de la pression d'alimentation et à un grand niveau de la vitesse de rotation.

A la fin ces courbes permettent d'obtenir les régimes de fonctionnement optimaux et peuvent aider à la prédiction de la vitesse de pénétration dans n'importe quelle zone du domaine expérimental.

III.8.Conclusion

La modélisation par la méthodologie de surface de réponse a permis de déterminer l'influence des paramètres de forage roto-percutant (la vitesse de rotation, la pression spécifique d'avance et la pression d'alimentation d'air) ainsi que le diamètre de l'outil de coupe de sondeuse sur la vitesse de pénétration. Une analyse d'ANOVA a été appliquée pour trouver les paramètres les plus significatifs, la validité de ce modèle est testée par une analyse de la variance.

La représentation des graphiques 3D et de courbes de contour sont utilisées afin de visualiser l'effet de ces paramètres.

Références bibliographiques

- [1] D.C. Montgomery ,Design and Analysis of Experiments, 5th ed. John Wiley, New York, 2001 xii, 684.
- [2] R.H. Myers, D.C. Montgomery, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1995.
- [3] D.C. Montgomery, H.M. Raymond, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley, New York, 2002.
- [4] L. Deng, C.S. Cai, Bridge model updating using response surface method and Genetic Algorithm , J.Bridg. Eng,15(5) (2010) 553–564.
- [5] M. Subrata ,B. Asish ,K. Pradip, Ni-Cr-Mo cladding on mild steel surface using CO₂ laser and process modeling with response surface methodology, Int. J. Eng. Sci.Technol, 3 (2011) 6805–6816.
- [6] Manuel Atlas Copco Rock Drilling Tools, SECOROC Down-the-hole equipment.
- [7] A, Khosla, S. Kumar, K.K Aggarwal, Identification of strategy parameters for particle swarm optimizer through Taguchi Method , J. Zhejiang Univ. Sci. A, 7 (2006)1989–1994.
- [8] C .Hicham, Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire application aux matériaux métal, thèse de doctorat, France,2013.

Chapitre IV

Optimisation par la méthode Taguchi et la fonction désirabilité

IV.1.Introduction

Le régime rationnel de forage dépend aussi du choix d'une machine de forage ainsi que les paramètres de fonctionnement.

L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation de la condition de forage roto-percutant au niveau de la carrière de Hadjar-Soud par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Deux types d'optimisation ont été utilisés dans ce chapitre :

- Optimisation mono-objectif en utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction désirabilité dans la conception (MSR).

IV.2.Optimisation mono-objectif par Taguchi

Pour la recherche des conditions optimales, c'est-à-dire les valeurs des facteurs permettant d'aboutir à un meilleur régime de fonctionnement dans la carrière de Hadjar-Soud de deux sondeuses ayant un diamètre différent, on utilise la méthode de Taguchi.

Dans ce travail de recherche, des paramètres de forage roto-percutant tels que la pression d'air, la vitesse de rotation, la pression spécifique d'avance et le diamètre de l'outil ont été pris en considération pour optimiser la vitesse de pénétration de forage roto-percutant.

IV.2.1.La réalisation de l'expérience

Comme déjà cité au chapitre précédent (voir §.III.3.1), la matrice de Taguchi L_{18} a été utilisée pour planifier les expériences de forage roto-percutant à l'aide de deux sondeuses au niveau de la carrière de Hadjar-Soud.

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit [S/B] comme cité au deuxième chapitre.

IV.2.2.Résultats d'expérience

La caractéristique [S/B] la plus grande est la meilleur (Larger-the-better) a été utilisée pour maximiser la vitesse de pénétration, le rapport signal/bruit est calculé selon l'équation (II.2).

Tableau IV.1. Résultats expérimentaux du plan orthogonal L₁₈ pour la vitesse de pénétration et le rapport [S/B].

Test	A	B	C	D	V_p (m/min)	[S/B] Ratios (db)
1	115	45	35	13	0.38	-8.4043
2	115	45	45	15	0.95	-0.4455
3	115	45	55	17	1.35	2.6067
4	115	50	35	13	0.82	-1.7237
5	115	50	45	15	1.23	1.7981
6	115	50	55	17	1.30	2.2789
7	115	55	35	15	1.18	1.4376
8	115	55	45	17	1.27	2.0761
9	115	55	55	13	0.81	-1.8303
10	165	45	35	17	0.70	-3.0980
11	165	45	45	13	0.31	-10.1728
12	165	45	55	15	0.99	-0.0873
13	165	50	35	15	0.94	-0.5374
14	165	50	45	17	1.23	1.7981
15	165	50	55	13	0.74	-2.6154
16	165	55	35	17	1.06	0.5061
17	165	55	45	13	0.73	-2.7335
18	165	55	55	15	1.13	1.0616

L'analyse des résultats du tableau IV.1 montre que la vitesse de pénétration est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprises entre (0.31 et 1.35 m/min) et les valeurs du [S/B] sont comprises entre (-10.1728 et 2.6067 db).

IV.2.3. Discussion des résultats

IV.2.3.1. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

La figure IV.1 montre l'effet des facteurs choisis sur les valeurs moyennes de la vitesse de pénétration, selon le premier graphique de cette figure, on constate que lors du forage d'un trou avec un outil de forage de diamètre de 115mm, la vitesse de pénétration devient plus grande par rapport à la seconde sondeuse de l'outil de forage de 165mm. Donc il apparait que la vitesse de pénétration a augmenté avec la diminution des diamètres des forets.

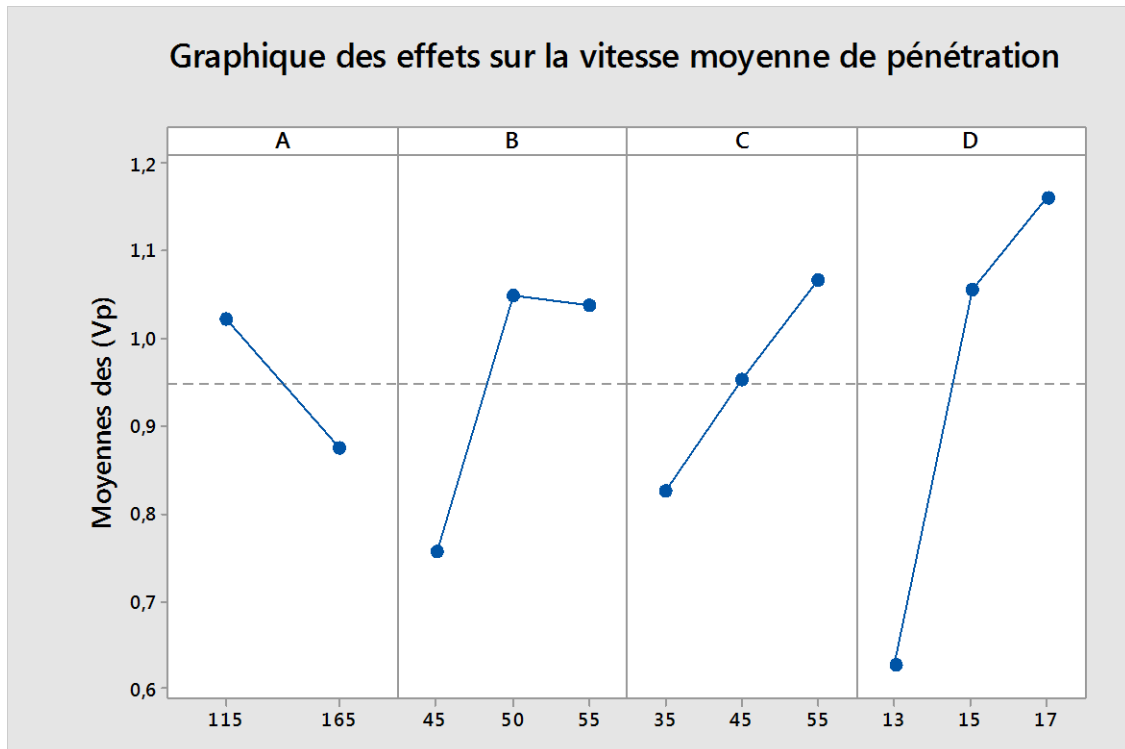


Figure IV. 1 .Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p).

Il est bien clair que la vitesse de pénétration apparaît comme une fonction croissante de la vitesse de rotation de la tige (C) et la pression d'alimentation (D). D'autre part, il apparaît également que la vitesse de pénétration (V_p) est une fonction croissante de la pression spécifique d'avance (B), tandis qu'à pression spécifique d'avance élevée, la vitesse de pénétration décroît.

La figure IV.2 montre les valeurs moyennes des rapports [S/B] en fonction des niveaux des facteurs affectant la vitesse de pénétration.

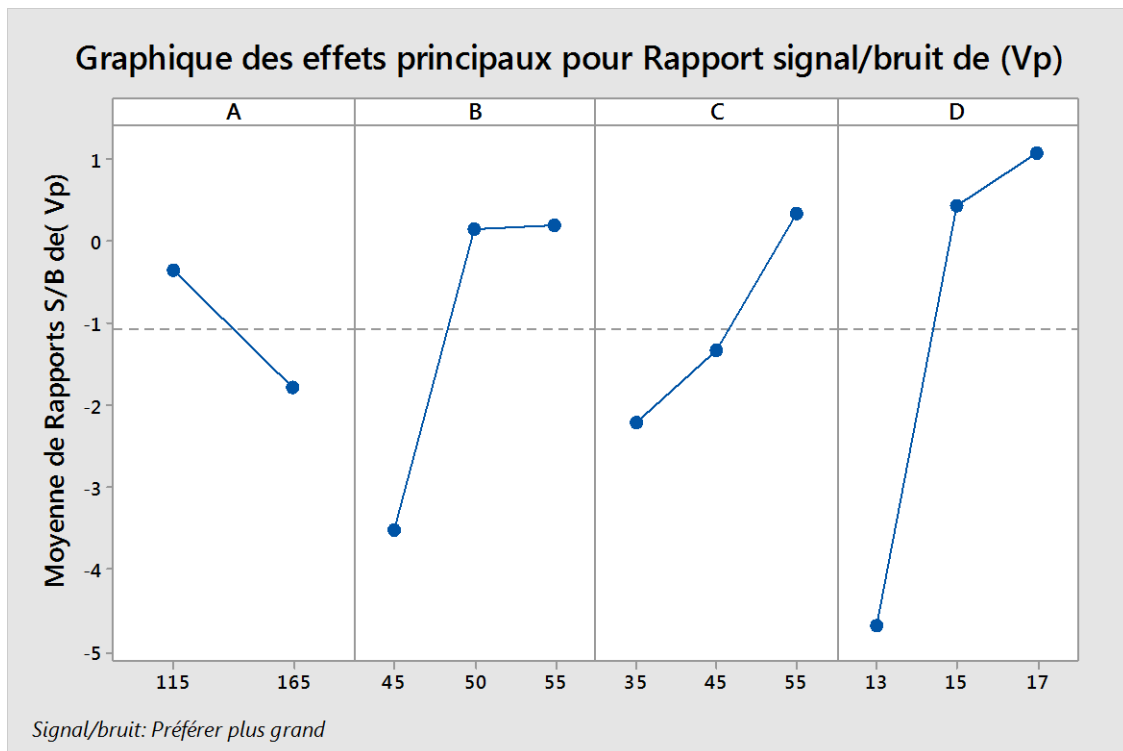


Figure IV. 2. Graphique des effets principaux de A, B, C et D sur la vitesse de pénétration (V_p).

IV.2.3.2. Diagramme d'interaction

La figure IV.3 présente les interactions des paramètres choisis de forage roto-percutant pour le signal de bruit de la vitesse de pénétration. Les diagrammes des interactions sont généralement utilisés pour visualiser l'interaction entre les facteurs, dans laquelle l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur.

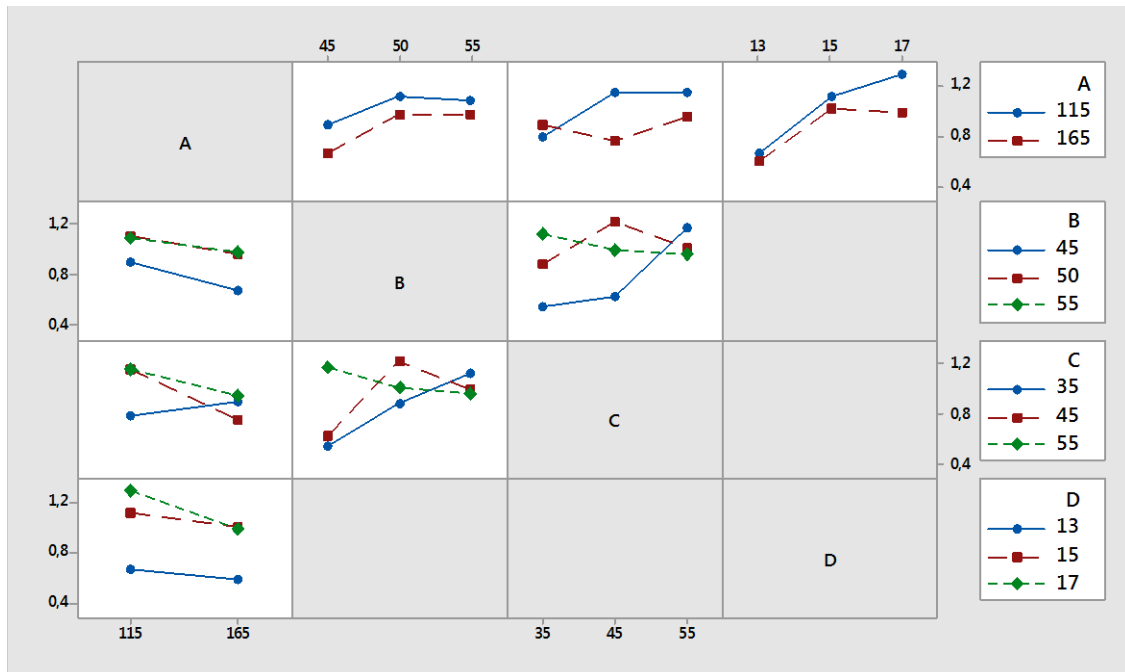


Figure IV. 3. Interaction entre les facteurs d'entrée.

Par exemple pour l'interaction entre le facteur (B) dans le niveau de facteur (A), le diagramme montre que la vitesse de pénétration augmente lorsque le facteur (B) est maintenu dans le niveau haut de facteur (A), et pour l'interaction entre le facteur (A) dans le niveau de facteur (D), le diagramme montre que la vitesse de pénétration augmente lorsque le facteur (A) est maintenu dans le niveau haut du facteur (D).

IV.2.3.3. Analyse statistique

IV.2.3.3.1. Analyse du signal de bruit

Le tableau IV .2 montre que le facteur expérimental ayant la plus forte influence a été déterminé en fonction de la valeur du delta, plus la valeur de delta est élevée, plus le facteur expérimental est significatif.

Le delta a été calculé en soustrayant les valeurs maximales des rapports $[S/B]$ et les valeurs minimales des rapports $[S/B]$ pour chaque facteur. D'après les facteurs expérimentaux du tableau IV.2 on remarque que, respectivement, d'une part l'influence la plus forte est exercée par la pression d'alimentation d'air (facteur D) et la pression d'avance spécifique (facteur B) avec un effet de 5.60797 et 3.43330 respectivement, d'autre part, l'influence la plus faible est exprimée par la vitesse de rotation de la tige (facteur C) et le diamètre de l'outils de forage (facteur A) avec un effet de 2.20565 et 1.51913 respectivement.

Tableau IV. 2 .Les rapports [S/B] moyens de la vitesse de pénétration.

Niveau	A	B	C	D
1	-0.24517	-3.26688	-1.96996	-4.58000
2	-1.76430	0.16642	-1.27993	0.53784
3	-	0.08626	0.23569	1.02797
Delta	1.51913	3.43330	2.20565	5.60797
Rang	4	2	3	1

A partir des graphiques de la figure IV.2, il est facile de déterminer les niveaux optimaux pour chaque facteur en fonction de la caractéristique de performance " la plus grande est la meilleur " de Taguchi ; le rapport [S/B] le plus élevé pour chaque facteur donne le meilleur résultat expérimental, ce qui correspond à une vitesse de pénétration maximale.

Le tableau IV.2 et la figure IV.2 suggèrent que les paramètres optimaux pour obtenir une vitesse de pénétration maximale impliquent la combinaison suivante des facteurs expérimentaux : **A₁B₂C₃ D₃** (A₁ = 115 mm, B₂ = 50 kgf/cm², C₃ = 55 tr/min, D₃=17 bar).

Tableau IV.3 . Condition optimale.

Facteur (niveau)	Valeur
A ₁	115 (mm)
B ₂	50 (kgf/cm ²)
C ₃	55 (tr/min)
D ₃	17 (bar)

IV.2.3.3.2. Analyse d'ANOVA du signal de bruit de la vitesse de pénétration

L'étude d'ANOVA a été réalisée pour le signal de bruit de la vitesse de pénétration afin de déterminer l'influence des variables principales sur la vitesse de pénétration et aussi pour déterminer le pourcentage de contributions de chaque variable.

Tableau IV.4. Test ANOVA pour les rapports [S/B].

Source	DL	SS	MS	F-Valeur	Prob	P _c %
A	1	0.1184	0.11842	10.06	0.010	7.56
B	2	0.2640	0.13202	11.21	0.003	16.85
C	2	0.1282	0.06409	5.44	0.025	8.18
D	2	0.9384	0.46921	39.86	0.000	59.90
Erreur	10	0.1177	0.01177			7.51
Total	17	1.5668				

ANOVA a été effectuée pour les rapports [S/B] en utilisant le logiciel statistique « Minitab 16 ». Dans cette étude, l'analyse de la variance pour le rapport [S/B] de la vitesse de pénétration a été menée à un niveau de signification $\alpha = 5\%$ (niveau de confiance de 95%).

La signification des facteurs de contrôle dans l'analyse de la variance est réalisée en comparant les valeurs de « Prob » de chaque facteur de contrôle, toutes valeurs de « Prob » inférieures à 0.05 sont considérées comme ayant une contribution statistiquement significative aux mesures de performance.

La dernière colonne du tableau IV.3 indique la contribution en pourcentage (P_c%) de chaque facteur source sur la variabilité de la réponse. Ces valeurs donnent le degré d'influence de chaque facteur sur la vitesse de pénétration.

Selon les résultats de cette analyse (tableau IV.3), les contributions en pourcentage des facteurs A, B, C et D sur la vitesse de pénétration s'établissaient respectivement à 7.56% ; 16.85% ; 8.18% et 59.90%. Le facteur le plus important et dominant sur la vitesse de pénétration était la pression d'alimentation d'air (facteur D ; 59.90%).

IV.3. Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité

IV.3.1. La fonction désirabilité

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objectif des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [1,2].

Cette notion a été introduite par E.C. Harrington [3] en 1965 puis a été développée par la suite, notamment par G. Derringer, [4] et [5]. Elle permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonctions de désirabilité élémentaires, adimensionnelles.

Les fonctions de désirabilité permettent d'associer une valeur de désirabilité adimensionnée entre 0 et 1.

Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal. Le produit étudié représente donc la performance désirée pour le critère (Eq .IV.1) [6].

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit:

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum w_i}} \quad (IV.1)$$

$$F(x) = -DF$$

Où : d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et (w_i) est la fonction de pondération de d_i .

IV.3.1.1. Désirabilité d'une réponse à maximiser

Dans le cas d'une réponse à maximiser, une fonction de désirabilité individuelle (d_i), est représentée sur la figure (IV.4). La valeur de 1 est attribuée lorsque la réponse représente la performance maximale désirée pour les facteurs considérés. La valeur de 0 (une désirabilité individuelle prenant la valeur nulle) est attribuée lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable (non désirée).

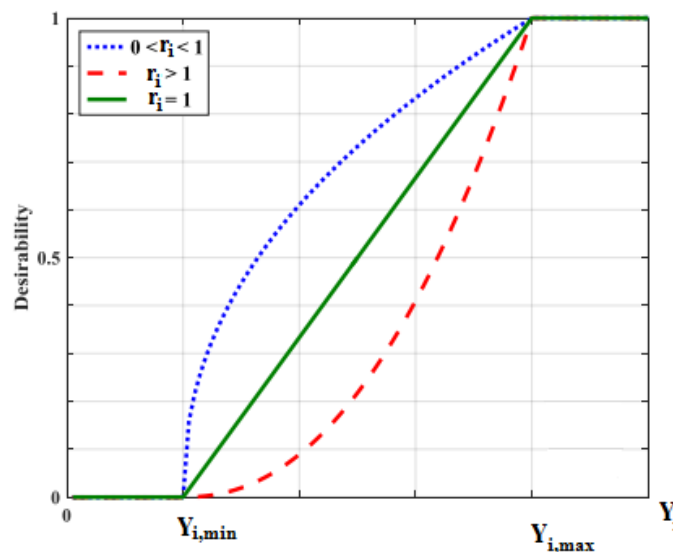


Figure IV. 4. Diagramme de désirabilité d'une réponse à maximiser.

Le calcul des valeurs de désirabilités individuelles est ainsi présenté dans (Eq.IV.2):

$$\begin{cases} d_i = 0 & \text{Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,\max} - Y_{i,\min}} \right]^{r_i} & \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\ d_i = 1 & \text{Si } Y_i \geq Y_{i,\max} \end{cases} \quad (IV.2)$$

$Y_{i,\min}$: La valeur en dessous de laquelle la réponse ne convient pas ($d_i=0$) ;

$Y_{i,\max}$: La valeur cible au-dessus de laquelle la réponse est très satisfaisante ($d_i=1$) ;

r_i : Le facteur modifiant l'importance d'une augmentation de la réponse pour la désirabilité individuelle considérée .Cela correspond à la pondération de la réponse dépendant de l'utilisateur en fonction du degré de désirabilité que l'on voudrait avoir pour une réponse donnée entre $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$.

IV.3.1.2.Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité est illustrée par la figure IV. 5.

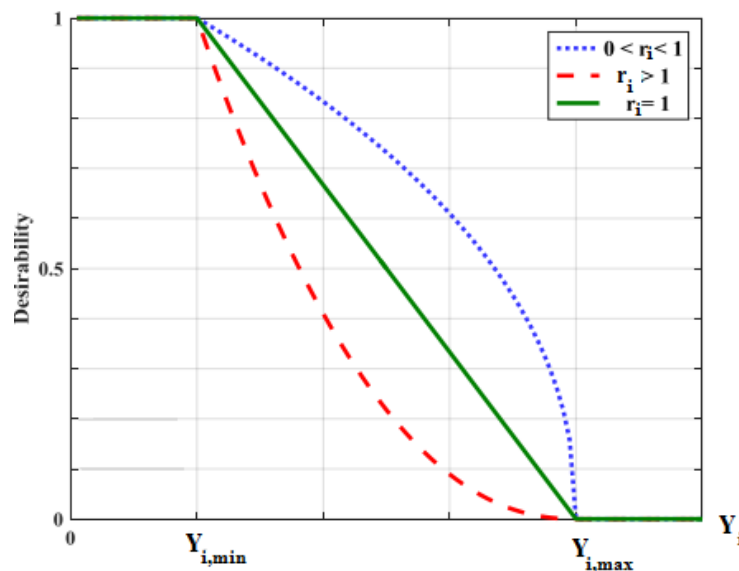


Figure IV. 5. Diagramme de désirabilité d'une réponse à minimiser.

Lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ($Y_{i,\min}$) vaudra 1. La fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ($Y_{i,\max}$).

L'équation (Eq.IV.3) montre comment les valeurs de désirabilités individuelles sont calculées :

$$\begin{cases} d_i = 1 & \text{Si } Y_i \leq Y_{i,\min} \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right]^n & \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\ d_i = 1 & \text{Si } Y_i \geq Y_{i,\max} \end{cases} \quad (IV.3)$$

IV.3.1.3. Désirabilité cible

La figure IV. 6 montre le traçage de la fonction de désirabilité individuelle lorsque l'on veut atteindre une valeur cible d'une réponse:

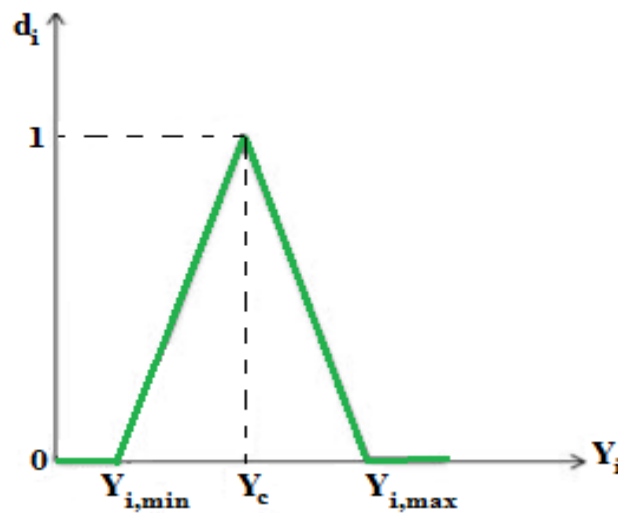


Figure IV.6. Diagramme de désirabilité d'une réponse à cibler.

Si on cherche par exemple une valeur cible Y_c de la réponse Y_i , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante :

$$\begin{cases} d_i = 0 & \text{Si } Y_i \leq Y_{i,\min}, Y_i \geq Y_{i,\max} \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_c - Y_{i,\min}} \right]^n & \text{Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_c \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_c - Y_{i,\max}} \right]^n & \text{Si } Y_c \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\ d_i = 1 & \text{Si } Y_i = Y_c \end{cases} \quad (IV.4)$$

La fonction de désirabilité vaut (1) lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut (0) si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs $Y_{i,\min}$ et $Y_{i,\max}$ précisées.

IV.3.2. Optimisation

Le logiciel « Minitab » [7] utilise les méthodes précédemment citées pour la recherche de l'optimum. Il commence la recherche en affichant les coordonnées du point de départ. Sauf modification, lors de la première recherche, ce point se situe au centre du domaine. En recommençant la recherche, on obtient (s'il existe) les coordonnées du point optimal trouvé par le logiciel.

Pour chaque optimum, on obtient :

- la valeur prise par la fonction de désirabilité globale ;
- le poids associé à chaque réponse est rappelé ;
- les valeurs prédites de toutes les réponses ;
- les valeurs optimales des facteurs d'entrée ;
- les valeurs prises par les fonctions de désirabilité individuelle.

Les points initiaux vont fortement influencer les résultats d'optimisation. L'optimiseur du logiciel « Minitab » a la particularité de démarrer la recherche d'un optimum à partir du centre du domaine. Cela va faciliter la recherche de l'optimum "global" de manière très rapide (un seul calcul).

Minitab calcule une désirabilité individuelle pour chaque réponse et pondère chacune d'elles en fonction de l'importance que l'on attribuera à la réponse. Ces valeurs sont combinées afin que la désirabilité composite ou globale du système multi-réponse soit déterminée. Une solution optimale apparaît lorsque la désirabilité composite atteint son niveau maximum. A l'aide d'un diagramme d'optimisation, on pourra ajuster les paramètres des variables et évaluer l'impact des changements sur la réponse.

IV.3.3. Optimisation de la vitesse de pénétration par la fonction désirabilité

La figure IV.4 montre le diagramme d'optimisation de la vitesse de pénétration en fonction des facteurs de contrôle en utilisant la fonction « Optimiseur » de réponse du logiciel « Minitab 16 ». Nous avons utilisé la méthode de désirabilité pour optimiser les paramètres du forage roto-percutant. Le logiciel « Minitab 16 » nous permet d'estimer les valeurs prédites par la valeur de désirabilité (d) variant de 0 à 1, avec des valeurs parfaites lorsque $d = 1$.

Notre objectif souhaité consiste à déterminer la meilleure combinaison des paramètres de forage roto-percutant pour les deux sondeuses choisies pour cette investigation afin d'établir un régime rationnel qui maximise la vitesse de pénétration.

La fonction désirabilité a été sélectionnée pour trouver une valeur appropriée des facteurs. On constate à partir de la figure IV. 5 que l'optimisation objectif de la réponse (vitesse de pénétration) a été atteinte au diamètre de l'outil 115 mm, une pression spécifique d'avance de 48.7374 kgf /cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression d'air de 17 bar.

En plus, les données montrent clairement que la vitesse de pénétration maximale obtenue pour la condition optimale est de 1.3679 avec une désirabilité de 1 et que l'avantage de cette courbe de réponse optimisée est qu'il est possible d'obtenir une vitesse de pénétration optimale en définissant les valeurs des paramètres du processus dans la plage expérimentale.

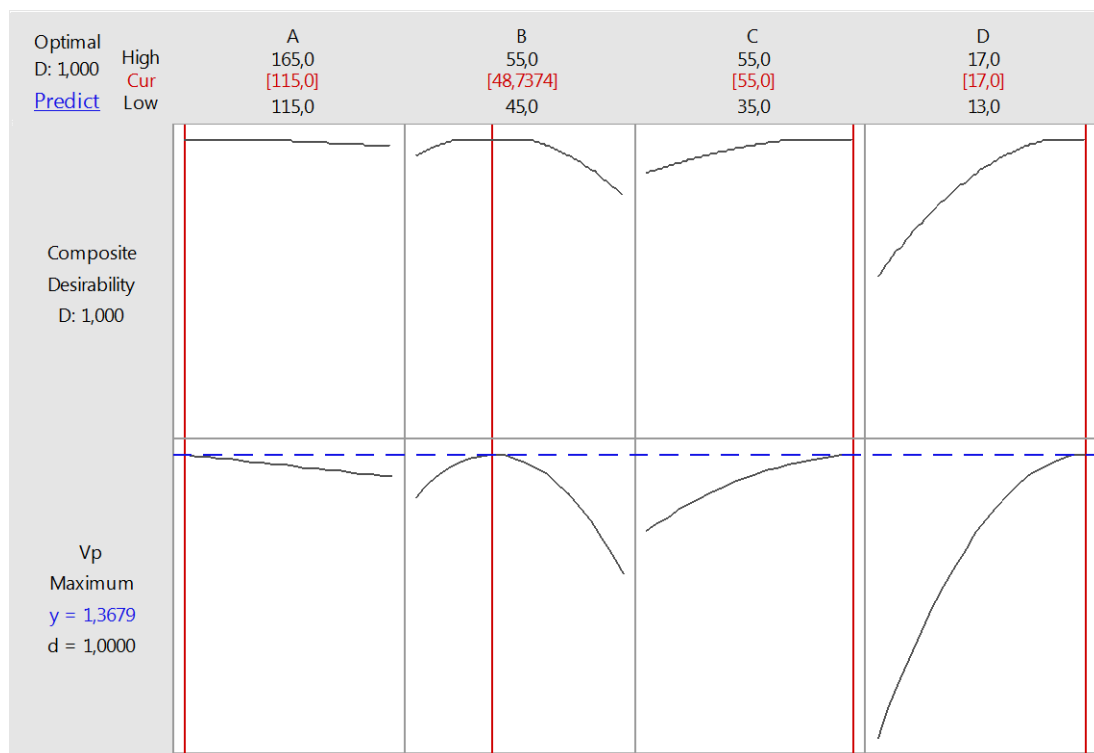


Figure IV. 7. Graphique d'optimisation de la vitesse de pénétration dans le forage roto-percutant.

IV.4. Validation expérimentale

Des tests de confirmation des facteurs de contrôle ont été effectués par la méthode de Taguchi et la méthode MSR sur deux niveaux ($A_1B_1C_1D_1$) et ($A_1B_2C_3D_3$), le niveau initial et le niveau optimal, comme le montre le tableau IV. 5. Il a été noté que pour une analyse statistique fiable, les valeurs d'erreurs doivent être inférieures à 20% [8]. Les pourcentages d'erreurs calculés sont dans les limites acceptables donc les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches les unes des autres. Cela permet de vérifier que le résultat expérimental est fortement corrélé avec le résultat prédit. Par conséquent, les résultats obtenus à partir des tests de confirmation reflètent une optimisation réussie, donc on peut prédire avec succès la valeur de vitesse de pénétration pendant le forage roto-percutant comme le montre le tableau IV.5.

Tableau IV. 5. Des tests de confirmation par la méthode de Taguchi et MSR.

Pénétration rate	Taguchi			MSR		
	Valeur prédite	Valeur expérimentale	Erreur%	Valeur prédite	Valeur expérimentale	Erreur %
$A_1B_1C_1D_1$	0.393	0.38	3.05	0.381850	0.38	0.48
$A_1B_2C_3D_3$	1.32733	1.30	2.05	1.35897	1.30	4.33

IV.5. Considérations sur le coût d'un mètre foré

IV.5.1. Le coût d'un mètre foré par la combinaison entre la méthode de Taguchi et MSR

Le but de l'optimisation de la vitesse de pénétration est de réduire au minimum le coût de processus de forage. Le coût d'un mètre foré a été calculé pour chaque expérience avec les résultats de la vitesse de pénétration optimisés par le modèle développée et les résultats sont montrés dans le tableau (IV.6) au-dessous.

Tableau IV. 6. Résultat de prix réel de forage.

Essais	La vitesse de pénétration optimisée (m/min)	Le coût d'un mètre forée optimisé (DA)
1	0.382	1588.95
2	0.996	1482.78
3	1.291	1467.68
4	0.784	1500.65
5	1.231	1470.16
6	1.359	1465.12
7	1,210	1471.06
8	1.232	1470.11
9	0.806	1498.31
10	0.725	1532.37
11	0.298	1663.43
12	0.988	1507.97
13	0.894	1515.07
14	1.218	1495.27
15	0.775	1526.50
16	1.085	1501.96
17	0.745	1529.89
18	1.101	1501.06

A propos des résultats mentionnés au tableau IV.6, nous pouvons dire que pour l'étude faite avec la combinaison entre la méthode de Taguchi et la méthode de surface de réponse on obtient une vitesse de pénétration maximale correspondant au un coût minimal, avec les conditions suivantes : un diamètre de 115 mm, une pression d'avance spécifique de 50 kgf/cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression de 17 bar (expérience numéro six).

IV.5.2. Optimisation multi objectif de la vitesse de pénétration et le coût de forage par la fonction désirabilité

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la vitesse de pénétration et minimise le coût de forage roto-percutant, c'est une optimisation combinée à l'aide de la fonction désirabilité.

La fonction désirabilité a été sélectionnée pour trouver une valeur appropriée des facteurs. On constate à partir de la figure IV.6 que l'optimisation objectif de la vitesse de pénétration a été atteinte au diamètre de l'outil 115 mm, une pression d'avance de 47.5253 kgf/cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression d'air de 17 bar.

En plus, les données montrent clairement que la vitesse de pénétration maximale obtenue pour la condition optimale est de 1.3598 m/min, avec une désirabilité de 1 et que le coût de forage minimal obtenu pour la condition optimale est de 1451.8588 DA avec une désirabilité de 1. L'avantage de cette courbe de réponse optimisée est obtenu en combinant la vitesse optimale de pénétration et le coût optimum et en définissant les paramètres du processus dans la plage expérimentale.

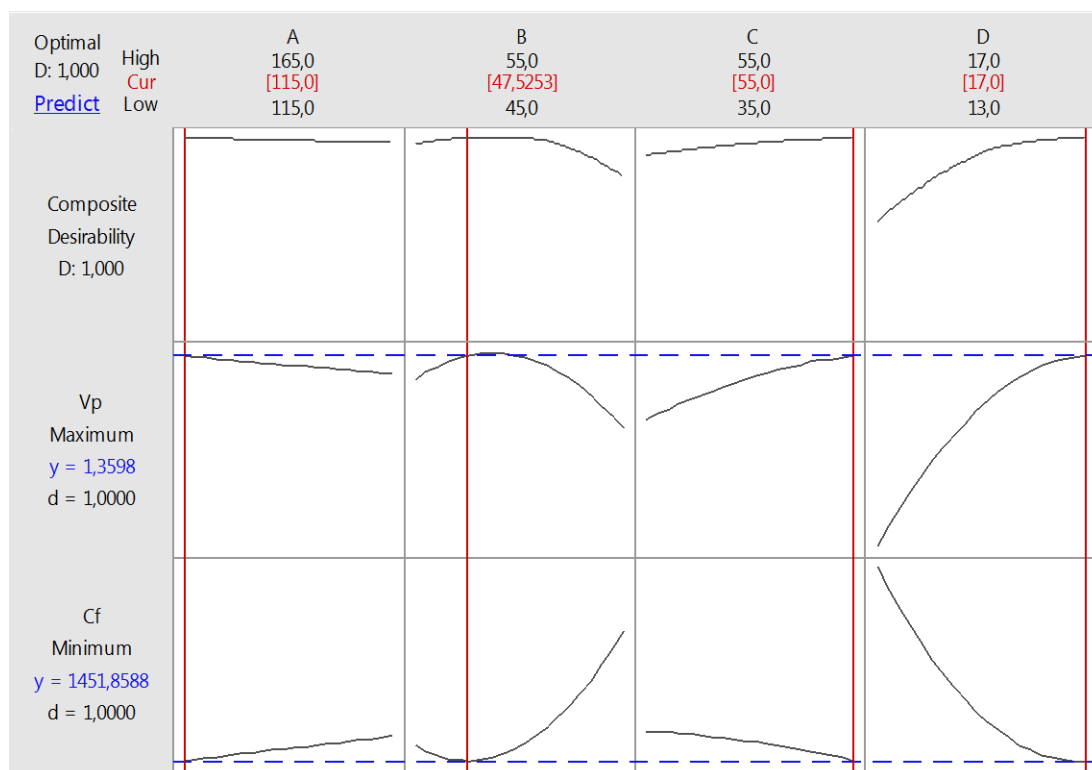


Figure IV. 8. Graphe d'optimisation pour (V_p , C_f).

IV.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation, à savoir, l'optimisation mono-objectif, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser la vitesse de pénétration (V_p) et l'optimisation multi-objectifs, où nous avons utilisé l'approche de la fonction désirabilité. Cette approche est appliquée selon deux tapes, en premier temps pour faire une comparaison entre l'optimisation mono-objectif de Taguchi et en deuxième temps pour faire une optimisation multi-objectifs avec le coût de forage réel calculé.

L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'optimisation mono-objectif réalisée dans ce travail est basée sur la méthode de Taguchi. Selon cette approche, l'optimum de la valeur la plus élevée de signal-bruit [S/B] représente la meilleure performance de la réponse (V_p).
- L'optimisation multi-objectif mise en œuvre est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Cette optimisation est basée sur une combinaison de deux critères en même temps, la vitesse de pénétration et le prix de revient.

Références bibliographiques

- [1] N.R. Costa, J. Lourenço, Z.L. Pereira, Desirability function approach: a review and performance evaluation in adverse conditions, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107 (2011) 234-244.
- [2] I.J. Jeong, K.J. Kim, An interactive desirability function method to multiresponse optimization, *European Journal of Operational Research*, 195 (2009) 412-426.
- [3] E. Harrington, The desirability function, *Industrial Quality Control*, 21(1965) 494–498.
- [4] G.Derringer , R.Suich, Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 12(1980) 214–219.
- [5] G.Derringer, A balancing act: Optimizing a product's properties, *Quality Progress*, 27(6) (1994) 51–58.
- [6] S.H.R. Pasandideh, S.T.A. Niaki ,Multi-response simulation optimization using genetic algorithm within desirability function framework, *Applied Mathematics and Computation*, 175(1) (2006) 366-382.
- [7] Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. (www.minitab.com) Scott E. Maxwell, Harold D. Delaney; *Designing Experiments and Analyzing Data: A Model Comparison Perspective*, Second, 2010.
- [8] M.H. Cetin, B. Ozcelik , E. Kuram, E. Demirbas, Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method, *J. Clean. Prod.* 19 (2011) 2049–2056.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ces travaux de recherches a été mené pour optimiser la vitesse de pénétration lors de forage roto-percutant afin d'évaluer économiquement l'influence des paramètres principaux tels que les paramètres de réglage et le diamètre de l'outil de forage sur l'efficacité de fonctionnement des machines de forage.

Le contrôle de ces paramètres est nécessaire pour travailler dans de bonnes conditions: progrès de l'outil de coupe, évacuation régulière des débris et stabilisation des parois des trous etc. La réglementation de toutes ces conditions pour une performance de forage efficace mérite d'être améliorée. Pour ce faire, il est nécessaire de choisir la méthode d'optimisation d'atteindre cet objectif.

Notre étude a porté en particulier sur le forage roto-percutant au niveau de la carrière de Hadjar-Soud par deux sondeuses roto-percutantes. Une première étude est réalisée en considérant les résultats de recherche théorique qui portent sur l'influence de quelques paramètres contrôlables et non contrôlables de forage sur la vitesse de pénétration. A cet effet, une étude a été faite pour prendre en considération les facteurs qui influent sur la vitesse de pénétration. A l'issue de cette étude, nous avons pu, clairement voir visuellement, mettre en évidence les effets des propriétés de la roche, de la poussée axiale, de la pression d'alimentation en air, de la vitesse de rotation et du diamètre de l'outil sur la vitesse de pénétration. En résumé, cette expérience prend beaucoup de temps, coûte chère et ne permet pas de savoir l'effet des interactions entre les facteurs et leur signification sur la vitesse de pénétration, ce qui rend difficile de trouver le régime rationnel de forage.

Par conséquent, afin de mieux comprendre, de quantifier les effets de différents facteurs et les interactions possibles sur la vitesse de pénétration, nous avons utilisé la méthode des plans d'expériences et des outils d'analyses statistiques.

La deuxième partie de travail s'inscrit dans le cadre de l'application des statistiques et probabilités dans le domaine de forage roto-percutant. Plus particulièrement, l'objet du travail est d'appliquer les plans d'expériences de Taguchi.

- La méthode de Taguchi utilise un design robuste qui permettra d'obtenir les facteurs les plus significatifs à des coûts optimaux, un temps d'expérimentation très court et un nombre réduit d'expériences.
- La table orthogonale L_{27} a été utilisée pour conduire les essais de forage roto percutant. Les résultats obtenus sont analysés par le ratio signal/bruit et l'analyse de variance (Anova-Pareto). Ces deux méthodes d'analyse indiquent que la pression

d'alimentation d'air est le facteur le plus influant du processus de forage roto percutant avec une contribution de 56.76%.

- La méthode de Taguchi a été utilisée pour déterminer les valeurs optimales du régime rationnel du fonctionnement de la sondeuse INGERSOLL RAND CM-780D.
- Ce dernier a été déterminé par le ratio [S/B] avec les valeurs optimales de la pression d'alimentation en air de 17 bar (niveau 3), de vitesse de rotation de 60 tr/min (niveau 3) et de force axiale de 825 kgf (niveau 2) qui optimisent la vitesse de pénétration.
- Un modèle mathématique a été développé pour la vitesse de pénétration afin de comprendre l'effet des facteurs de contrôle sur la réponse.
- Les valeurs prédites sont comparées avec les données expérimentales et sont jugées en bon accord.
- L'analyse de variance montre clairement que la pression d'alimentation d'air (A), l'interaction (A. A), la force axiale (C) et l'interaction (C. C) sont statistiquement les facteurs qui ont la plus grande signification sur l'évolution de la vitesse de pénétration. Leurs contributions sur la variation totale de la vitesse de pénétration sont respectivement 28.05 %; 27.35 % ; 18.26 % et 16.92 %.

La troisième partie de ce travail est sur la modélisation d'un modèle mathématique de la vitesse de pénétration, cette fois pour deux sondeuses ayant un diamètre d'outil différent afin de trouver un régime rationnel de forage.

Cette étude est basée aussi sur l'étude de l'influence des paramètres opérationnels et du paramètre géométrique (diamètre de l'outil) sur la vitesse de pénétration lors du forage des trous dans la carrière de Hadjar-Soud.

- Selon les résultats de l'analyse de variance de la vitesse de pénétration, les contributions en pourcentage, montrent que le facteur le plus important et dominant ayant influé sur la vitesse de pénétration était la pression atmosphérique (facteur D) avec une contribution de 43.79 %.
- Un modèle mathématique de second ordre a été déterminé sur la base de la méthodologie de surface de réponse (MSR) en corrélation avec les résultats expérimentaux de la vitesse de pénétration qui sont planifiés suivant un plan orthogonale mixte de Taguchi L_{18} , ce qui a prouvé que le modèle mathématique est puissant et efficace, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0.9881$).

- Ce modèle développé montre que les résultats prévus concordent parfaitement avec les résultats expérimentaux.
- Les graphes de contour déterminés dans ce travail, permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.
- Les visualisations 3D servent principalement à l'obtention des valeurs optimales de la vitesse de pénétration, donc trouver facilement les paramètres optimums de régime de fonctionnement des sondeuses.

La dernière partie est prévue pour l'optimisation des conditions de travail afin de trouver le régime rationnel et choisir la sondeuse la plus adaptée pour ces conditions de forage.

- Le rapport ANOVA pour le signal bruit de la vitesse de pénétration (V_p) indique clairement que la pression d'alimentation en air est le paramètre le plus dominant, avec une contribution d'environ 59.90 % suivi de la pression spécifique d'avance avec une contribution de 16.85 %.
- Conditions optimales obtenues par la méthode de Taguchi pour optimiser la vitesse de pénétration avec le forage roto- percutant à Hadjar- Soud est un diamètre de l'outil de 115 mm, une pression d'avance spécifique de 50 kgf/cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression atmosphérique de 17 bar.
- Conditions optimales obtenues par la fonction de désirabilité de la métrologie de surface de réponse pour une vitesse de pénétration optimale est un diamètre de l'outil de 115 mm, une pression d'avance spécifique de 48.7374 kgf/cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression atmosphérique de 17 bar.
- Tracé d'optimisation de la réponse est fiable pour optimiser la vitesse de pénétration dans le forage roto- percutant.
- Les tests de confirmation effectués indiquent que l'intégration de la méthode de Taguchi et la méthodologie surface de réponse est pratiquement efficace.
- L'optimisation multi-objectif réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Cette optimisation a été atteinte au diamètre de l'outil 115 mm, une pression d'avance de 47.5253 kgf /cm², une vitesse de rotation de 55 tr/min et une pression d'air de 17 bar.

- L'analyse des deux méthodes d'optimisation montre que la méthode mono-objectif de Taguchi est plus efficace à cause de sa simplicité et sa rapidité. Par contre l'utilisation de la fonction de désirabilité est meilleure pour l'optimisation multi-objectif.

Pour conclure, les méthodes des plans d'expériences, de surface de réponse et la fonction désirabilité, nous ont permis de qualifier et d'optimiser les paramètres de forage roto-percutant pour déterminer un régime rationnel de fonctionnement avec un nombre minimum d'expériences. Ces méthodes peuvent être utilisées comme des puissants outils de qualification d'un choix de processus de forage, des sondeuses et des outils de coupes, juste pour sélectionner les meilleures conditions de fonctionnement d'une opération de forage.

Perspectives

Perspectives

- En perspectives, d'autres études pourraient prendre en compte d'autres facteurs tels que la résistance à la compression, la solidité, abrasivité de la roche, les propriétés chimiques et la structure de la roche tel que la fissuration de la roche qui affectent la vitesse de pénétration.
- Développer des modèles de prédiction incluant l'usure de l'outil de forage.
- Etudier de façon profonde la géométrie de l'outil, tout en considérant les angles d'affûtage des dents.
- Etudier les contraintes résiduelles laissées par le processus de forage qui peuvent affecter la performance de forge tel que la vibration engendrée sur le train de tige (phénomène de flambage).
- Développer des modèles basés sur les algorithmes génétiques.

Annexe 1

Caractéristiques du calcaire

Caractéristiques physique :

- Calcaire à 10 de quartzite du ;
- Granulométrie : 0 à 400 mm ;
- densité : 2.7 T /m³ ;
- Humidité : 3% ;
- Dureté au niveau du gisement : 7-8 sur l'échelle de PROTODIAKONOV ;
- Résistance à la compression : 70MP.

Caractéristiques chimique : composition chimique du calcaire

- CaO de 54.39% à 56% ;
- Al₂O₃ de 0.08% à 0.5% ;
- Fe₂O de 30.11% à 0.68% ;
- SiO₂ de 0.20% à 0.81% ;
- MgO de 0.20% à 0.56% ;
- So₃ de 0.00% à 0.03% ;
- K₂O de 0.007 % à 0.05% ;
- Cl de 0.00 % à 0.05% ;
- PAF de 43.21% à 43.47% ;
- Titre Caco₃ de 97.11 % à 99.90 %.

Cahier des charges : Etude, fourniture supervision de montage et de mise en service d'une station de concassage calcaire à la carrière de la cimenterie de Hadjar-Soud.

Annexe 2

Communications et publications

A. Communications

1. Participation : à la 2^{ème} conférence internationale sur l'énergétique appliquée et la pollution CIEAP'14 ; 14 -15 Décembre 2014 -Constantine : **Analyse des défauts des machines tournante par analyse vibratoire : cas de la motopompe 100 MP -14-B**
Auteurs: F.Z. DERDOUR , L. KHOICHEMANE.
 2. Participation : à la 2^{ème} conférence internationale sur l'énergie verte et l'ingénierie de l'environnement GEEE 2015 ; 18 -19 Avril 2015 Monastir Tunisie: **Analyse vibratoire appliquée à l'étude d'une machine tournante (moto-pompe)**
Auteurs: F.Z. DERDOUR, L. KHOICHEMANE
 3. Participation : à 3^{ème} conférence internationale sur la maintenance et la sécurité industrielle CIMSI'2015, 09-10 Novembre 2015 Skikda : **Etude du phénomène de cavitation de la motopompe 100-MP-14 B.**
Auteurs: F.Z. DERDOUR ,N.BATTAZ ,L. KHOICHEMANE.
 4. Participation : à 3^{ème} conférence internationale sur la maintenance et la sécurité industrielle CIMSI'2015, 09-10 Novembre 2015 Skikda : **Etude du problème de roulement.**
Auteurs: N.BATTAZ, F.Z. DERDOUR, L. KHOICHEMANE.
 5. Participation : à la 2^{ème} conférence internationale sur Energie, matériaux, l'énergétique appliquée et la pollution CIEAP'14 ; 30 -31 Octobre 2016 Constantine : **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.**
Auteurs: F.Z.DERDOUR, M. KEZZAR, L. KHOICHEMANE.
 6. Participation : à 3^{ème} conférence internationale de mécanique (I.C.M' 2017); 26-27 Avril, 2017 .Annaba : **Modélisation mathématique et analyse statistique de la vitesse de pénétration dans le forage roto-percutant.**
Auteurs: F.Z. DERDOUR, M. KEZZAR, L. KHOICHEMANE.
 7. Participation : à 4^{ème} conférence internationale sur la maintenance et la sécurité industrielle CIMSI'2017, 20-21 Novembre 2017, Skikda : **Etude de l'influence des paramètres de réglage sur l'efficacité de fonctionnement d'une machine de forage.**
Auteurs: F.Z. DERDOUR, M. KEZZAR, L. KHOICHEMANE.
-

B. Publications

1- **“The optimization of the operational parameters of a rotary percussive drilling machine using the Taguchi method”**. Emerald ,World Journal of Engineering, Vol. 15 Issue: 1,pp.62-69(2018), <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2017-0067>.

Auteurs: Fatima Zohra Derdour, Mohamed Kezzar, Ouafae Bennis, Lakhdar Khochmane,

2-**“Optimization of penetration rate in rotary percussive drilling using two techniques: Taguchi analysis and response surface methodology (RMS)”**. Elsevier, Powder Technology 339 (2018) 846–853, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.030>

Auteurs: Fatima Zohra Derdour, Mohamed Kezzar, Lakhdar Khochmane.

3-**“Analyse Vibratoire Appliquée à l’étude d’une Machine Tournante (Moto-Pompe) ”**. International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) ISSN: 2356-5608, Vol.3, issue 2 Copyright IPCO-2015-pp.78-83.

Auteurs: Fatima Zohra Derdour, Lakhdar Khochmane.

4-Un ouvrage intitulé **“Analyse Vibratoire Appliquée à l’étude d’une Machine Tournante (Moto-Pompe) ”** a été publié dans l’édition universitaire européenne, le 07/01/2017-ISBN 978-3-639-54578-4.

Auteurs: Fatima Zohra Derdour, Lakhdar Khochmane.

تكنولوجيا الحفر ضرورية في صناعة التنجيم في الجزائر تحقيقاً لهذه الغاية ، سيكون من الضروري القول إن تحسين معايير الحفر جزء لا يتجزأ من النجاح الاقتصادي أو فشل أي عملية تنجيم. إن التنبؤ بمعدل الاختراق يعتبر ضرورياً لنظام تشغيل عقلاني وهو أحد أهم العوامل في تخطيط الحفر وتقدير التكلفة. في هذا المنظور، ستركز الأعمال البحثية التي تتناول موضوع أطروحة الدكتوراه على تحسين الحفر طرفي- دوار ودراسة تأثير المعلمات الرئيسية على كفاءة التشغيل لآلات الحفر. تنظيم تنفيذ هذا العمل البحثي تم وفقاً للخطوات التالية: الخطوة الأولى تتضمن فحص المعلمات التي يمكن التحكم فيها والتي لا يمكن التحكم فيها والتي لها تأثير على معدل الاختراق في عملية الحفر. الخطوة الثانية تحديد نظام التشغيل العقلاني لآلة حفر طرفي- دوار. معلمات الضبط لآلة الحفر هي: القوة المحورية، ضغط الهواء المضغوط للمطرقة، سرعة دوران سلسلة الحفر. كما تم استخدام مستوى تاجوشي المتعامد ، نسبة الإشارة للضوضاء [S/B] ، تحليل التباين لباريتو (ANOVA Pareto) بالإضافة إلى تحليل الانحدار و ذلك لدراسة تأثير هذه العوامل على سرعة اختراق أداة الحفر في الصخر. تم إجراء سلسلة من التجارب على أساس شبكة متعامدة (L₂₇) و النتائج تم تحليلها باستخدام البرنامج الإحصائي (Minitab 16). والخطوة الثالثة هي نمذجة سرعة الاختراق باستخدام منهجية سطح الاستجابة (MSR) ، مع الأخذ في الاعتبار معلمات الحفر الطرفي الدوار مثل ضغط الهواء وسرعة الدوران ، ضغط الدفع وكذلك قطر الأداة. في هذا السياق ، يستخدم تحليل التباين (ANOVA) لتقييم تأثير عوامل التحكم على الاستجابة. وأجريت التجارب على أساس تصميم تجريبي مختلط (Taguchi L₁₈). المرحلة الرابعة من هذا العمل خصصت لتحسين ظروف الحفر باستخدام نهج Taguchi (تحليل الإشارة إلى الضوضاء) ووظيفة الرغبة (DF). لقد تم التحقق من صحة القيم المثلى التي تم الحصول عليها باستخدام نهج Taguchi وكذلك منهجية سطح الاستجابة (MSR) عن طريق التجارب التأكيدية.

الكلمات المفتاحية للبحث : الحفر الطرفي الدوار ، سرعة الاختراق ، منهجية تاجوشي، منهجية سطح الاستجابة ، تحليل التباين [نسبة الإشارة / ضوضاء]، ووظيفة الرغبة.

Résumé

La technologie de forage occupe une importance cruciale dans l'industrie minière en Algérie. A cet effet, il serait nécessaire de dire que l'optimisation des paramètres de forage est une partie intégrante de la réussite économique ou l'échec de toute exploitation minière. La prédiction de la vitesse de pénétration jugée nécessaire pour un régime de fonctionnement rationnel constitue l'un des paramètres les plus importants dans la planification des travaux de forage dans les gisements miniers et l'estimation des coûts. Dans cette optique, le travail de recherche objet de la présente thèse de doctorat portera sur l'optimisation du mode roto-percutant et l'étude de l'influence des principaux paramètres sur l'efficacité de fonctionnement des machines de forage. La mise en œuvre de ce travail de recherche est organisée selon les étapes suivantes : La première étape concerne une investigation sur les paramètres contrôlables et incontrôlables affectant la vitesse de pénétration dans un processus de forage. La deuxième étape, a pour but de déterminer le régime rationnel de fonctionnement d'une machine de forage roto-percutant. Les paramètres de réglage de la machine de forage sont : la force axiale, la pression d'alimentation en air comprimé du marteau, la vitesse de rotation du train de tige sont étudiées. Un plan orthogonal de Taguchi, le ratio signal-bruit [S/B], l'analyse de variance (ANOVA Pareto) ainsi que l'analyse de régression sont aussi utilisées en vue d'analyser l'effet de ces paramètres sur la vitesse de pénétration de l'outil dans la roche. Une série d'expériences basées sur un réseau orthogonal (L₂₇) a été effectuée. Les résultats des expériences sont recueillis ainsi analysés à l'aide du logiciel statistique « Minitab 16 ». La troisième étape porte sur la modélisation de la vitesse de pénétration en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (MSR), et en tenant compte des paramètres de forage roto-percutant tels que, la pression d'air, la vitesse de rotation, la pression spécifique d'avance ainsi que le diamètre de l'outil. Dans ce contexte, l'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'effet des facteurs de contrôle sur la réponse. Les expériences ont été réalisées sur la base d'un plan expérimental mixte (L₁₈) de Taguchi. La quatrième étape de ce travail est consacrée à l'optimisation des conditions de forage en utilisant l'approche de Taguchi (analyse signal / bruit) et la fonction de désirabilité (DF). En effet, les valeurs optimales obtenues par l'utilisation de l'approche de Taguchi ainsi que la méthodologie de surface de réponse (MSR) ont été validées par des expériences de confirmation.

Mots-clés : Forage roto-percutant, Vitesse de pénétration, Méthode de Taguchi, Méthodologie de Surface de Réponse (RSM), ANOVA, le ratio signal/bruit, Désirabilité.

Abstract

Drilling technology is of crucial importance in the mining industry in Algeria. To this end, it would be necessary to say that optimizing drilling parameters is an integral part of the economic success or failure of any mining operation. The prediction of the penetration rate deemed necessary for a rational operating regime is one of the most important parameters in the planning of drilling in the mineral deposits and the estimation of costs. With this in mind, the research work that is the subject of this doctoral thesis will focus on the optimization of the rotary percussive mode and the study of the influence of the main parameters on the operating efficiency of drilling machines. The implementation of this research work is organized according to the following steps: The first step concerns an investigation of the controllable and uncontrollable parameters affecting the penetration rate in a drilling process. The second step is to determine the rational operating regime of a rotary percussive drilling machine. The operational parameters of the drilling machine are: the thrust, the air pressure, the rotation speed are studied. An orthogonal array of Taguchi, signal-to-noise [S/N] ratio, ANOVA Pareto analysis, and regression analysis are used to investigate the effect of drilling operational factors on the penetration rate. A series of experiments based on orthogonal arrays L₂₇ was carried out and the results were collected and analyzed using the statistical software Minitab 16. The third step is the modeling of the penetration rate using the Response Surface Methodology (RSM) taking into account the rotary percussive drilling parameters such as air pressure, specific advance pressure, rotation speed, and bit diameter, in this context, ANOVA is used to characterize the effect of control factors on the response. The experiments were carried out on the basis of a mixed experimental array Taguchi L₁₈. The fourth stage of this work is devoted to optimizing drilling conditions using the Taguchi approach (signal-to-noise analysis) and the desirability function (DF). Indeed, the optimal values obtained by using the Taguchi approach as well as the response surface methodology (RSM) were validated by confirmatory experiments.

Keywords: Rotary percussive drilling, Penetration rate, Taguchi method, Response surface model (RSM), ANOVA, Signal-to-noise ratio, Desirability function.