

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université du 20 Août 1955 Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Réf : D012120019D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

المرجع : D012120019D

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCE

Spécialité : Electromécanique

THEME

*Etude de la Détermination du Régime de
Fonctionnement des Machines de Forage Roto
percutant*

Présenté Par :

BENMOUSSA Moufida

Devant le Jury composé de :

Président: BOUZAOUIT Azzedine	Prof	Université de Skikda
Rapporteur: INEL Fouad	MCA	Université de Skikda
Examineur: HADJADJ Aouel Elias	Prof	Université d'Annaba
Examineur: ZAHZOUH Zoubir	MCA	Université de Souk Ahras
Examineur: KHERIEF Nacereddine Med	MCA	Ecole supérieur d'enseignement Azzaba
Examineur: BELADI Ahmed	MCA	Université de Skikda

Soutenue le : 12/10/2020

Dédicace

*A mon **cher père**, le symbole de sacrifice et de dévouement, pour tout ce qu'il a fait pour moi*

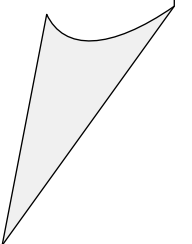
*A ma **chère mère**, le symbole d'amour, de tendresse et de douceur*

*A mon **époux***

*A mes **petites fillettes** : **Miral et Djouri***

*A toute **ma famille***

*A tous **mes amis**.*



Remerciements

*Je remercier en premier lieu Dieu le tout puissant pour m'avoir
donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **INEL Fouad**,
Maitre de conférences A l'université de Skikda, pour son encadrement,
pour sa contribution, pour sa patience et son aide tout au long de ce
travail.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur, **BOUZAOUIT
Azzedine**, Professeur à l'université de Skikda, pour l'honneur qu'il me fait
de présider le jury.*

*Mes remerciements vont également à tous les membres du jury pour
l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury en
l'occurrence:*

*Monsieur, **HADJADJ Aouel Elias**, professeur à l'université d'Annaba.*

*Monsieur, **ZAHZOUH Zoubir**, MCA à l'université de Souk Ahras.*

*Monsieur, **KHERIEF Nacereddine M^{ed}**, à l'école supérieure d'enseignement
Azzaba.*

*Monsieur, **BELADI Ahmed**, MCA à l'université de Skikda.*

*Je le remercier de tout mon cœur, l'absent présent entre nous Mr. **KHOCHMANE
Lakhdar** qui a été toujours avec moi pour me conseiller, me soutenir,
m'encourager, j'espère que mon dieu protège sa petite famille. Repose en paix
chère père.*

*Je remercier tous les enseignants du département de mécanique de
l'université de Skikda.*

*En fin, je tiens également à remercier toute personne ayant participé de
prés ou de loin à la réalisation de ce travail.*

ملخص

السؤال المطروح دائما من أجل إختيار آلة الحفر في محجر هو كم تقدر الانتاجية التي يمكن أن تضمنها هذه الآلة في الظروف الملائمة للمحجر لكن تحديد هذا المقياس يبقى متعلقا بنظام الحفر.

يمثل هذا العمل نظام الحفر الطرقي الدوار الذي يحدده الجمع بين السرعة الدورانية لأداة الحفر والقوة المحورية المطبقة على الصخر، القيم المثلى لهذه المقاييس تعتمد بشكل خاص على نوع الأداة المخصصة للحفر والخصائص الفيزيائية الميكانيكية للصخور المراد تدميرها .

هدف هذا البحث العلمي يمثل في مدى تطبيق نظام الحفر الطرقي الدوار لدرجة الوصول الى اتقانه في ظروف محاجر الحجر الجيري الجزائرية (محجر احجرا سود) ، حيث تتكون منهجية البحث من الافتراض أنه في الظروف الملموسة يمكننا العثور على مجموعة من معايير التعديل التي توفر أفضل المؤشرات التقنية الاقتصادية ، بمعنى التقليل من سعر تكلفة المتر الواحد لحفر حفرة وهو ممكن عن طريق تحسين خطة الحفر واتقان نظام الحفر الطرقي الدوار.

لهذا قمنا بدراسة العوامل المؤثرة على آلة الحفر الطرقي الدوار ، خصائص تفاعل أداة الحفر بالكريات مع الصخور ، البحث عن تحسين إنتاجية الحجر الجيري والعمل على مناقشة زيادتها ، الاعتماد على سرعة الحفر كدالة لتحسين نظام الحفر الطرقي الدوار من خلال التجربة ، تقديم الحجة على اختيار المعيار الملائم لتطوير منهجية تحديد نظام التشغيل العقلاني لآلة الحفر الطرقي الدوار.

الكلمات المفتاحية : القوة المحورية؛ سرعة الدوران والاختراق؛ خاصية الصخور؛ طاقة الصدمة؛ سرعة تقدم الأداة؛ آلة الحفر الطرقي الدوار؛ أداة الحفر بالكريات.

Résumé

Pendant le choix des machines de forage, la question toujours posée est de savoir quelle, productivité peut assurer la machine dans les conditions bien définies de la carrière, mais ce facteur reste lié au régime de fonctionnement de la machine.

Ce travail représente le régime de forage roto-percutant qu'est déterminé par la combinaison de la vitesse de rotation de l'outil, de la force axiale appliquée sur la roche; les valeurs optimales de ces paramètres dépendent en particulier du type de l'outil et des propriétés physico-mécaniques des roches à abattre.

Le but de recherche consiste à perfectionner les régimes de fonctionnement des sondeuses roto-percutantes dans les conditions des carrières de calcaire algérienne (Carrière de Hadjar-soud). La méthodologie de recherche consiste à supposer que dans les conditions concrètes nous pouvons trouver la combinaison des paramètres de réglage qui assurent les meilleurs indices technico-économiques; dans le sens de minimiser le prix de revient d'un mètre de trous forés.

Pour cela nous avons étudié les facteurs caractérisant le milieu ambiant des sondeuses roto-percutantes, les particularités de l'interaction de l'outil de forage à pastilles avec la roche, la recherche de la productivité des sondeuses et l'argumentation des voies d'augmentation de leur rendement, l'expérience d'établissement de la dépendance de la vitesse de forage en fonction des paramètres des régimes de forage, l'argumentation du choix du critère et l'élaboration de la méthodologie de détermination des régimes de fonctionnement rationnel des sondeuses roto-percutantes.

Mots Clés : Force axiale; Vitesse de rotation et de pénétration; propriété de la roche; Energie d'un choc; Vitesse d'avancement de l'outil; Sondeuse roto-percutante; L'outil de forage à pastilles.

Abstract

When choosing drilling machines, the question always has been asked that the productivity can insure the machine under the well defined conditions of the quarry, but this factor remains linked to the machine's operating regime.

In this work, we have the percussive rotational drilling regime that is determined by the combination of the rotational speed of the tool, the axial force applied on the rock; the optimal values of these parameters depend in particular on the type of tool and on the physico-mechanical properties of the rocks to be felled.

The aim of the research is to improve the operating regimes of percussive drilling machines under the conditions of the Algerian limestone quarries (Hadjar-soud quarry) and to obtain a better compromise between the technical and economic indices, in order to ensure a minimum cost price for a meter of drilled hole.

The experimental results carried that this methodology, which consists of assuming that under the concrete conditions can find the combination of the setting parameters that ensure the best techno-economic indices, as well as to carpenter the cost price for a meter of drilled holes.

Keywords: Axial force; Rotation and Penetration speed; Properties of the rock, Energy of shock; The tool of progress speed; Roto-punching of sunter; The Pillar Drilling of Tool.

Les Listes des Figures

Figure. I.1 Destruction de la roche lors du forage [1]	2
Figure. I.2 Valeurs relatives de l'effort axial, à la puissance de rotation et à la puissance de choc lors de divers mode de forage [1]	2
Figure. I.3 Schéma de destruction de la roche par forage roto-percutant à l'aide de l'outil à lames [3]	8
Figure. I.4 Influence de différents facteurs sur l'efficacité de forage roto-percutant [3].....	13
Figure. II.1 Répartition du massif en zones pour l'étude des propriétés physico-mécaniques, (résistance à l'empreinte, abrasivité) [19].....	20
Figure. II.2 Stand pour la détermination de l'abrasivité des roches	22
Figure. II.3 Stand pour la détermination de l'indice de la résistance à l'empreinte (a) et l'étampe de mesure (b)	23
Figure. II.4 Dépendance des productivités $Q_{thé}$, Q_{tech} , Q_{exp} en fonction de la vitesse de forage, (a) Ingersoll-Rand, (b) Atlas Copco	35
Figure. III.1 Les outils à molettes (tricône) [37]	38
Figure. III.2 L'objectif des outils à molettes [39].....	39
Figure. III.3 Les outils à diamant [37].....	40
Figure. III.4 Outil PDC [37]	41
Figure. III.5 Outil PDC Steel Body [37.38].....	42
Figure. III.6 Outil PDC Matrix body [5]	42
Figure. III.7 Schéma principal du processus de destruction de la roche par les machines de forage roto- percutantes [1]	45

Figure. III.8 Schéma de destruction de la roche par l'outil à pastilles [35]	48
Figure. III.9 Stand (a) et résultats de déterminations (b) de la profondeur d'enfoncement de l'outil dans la roche	51
Figure. IV.1 Schéma de l'étude expérimentale des régimes de fonctionnement des sondeuses roto-percutantes [1].....	56
Figure. IV.2 Dépendance de la vitesse de forage en fonction de la force axiale appliquée et de la vitesse de rotation	63
Figure. IV.3 Détermination des valeurs optimales du régime de fonctionnement de la machine de forage roto-percutante	69
Figure. IV.4 Courbe des valeurs extrémales de la fonction $C = f(p, n)$	73

Liste des tableaux

Tableau. I.1 Domaine d'utilisation des divers modes de forage [6]	4
Tableau. I.2 Caractéristiques des carrières de calcaire Algériennes [4]	6
Tableau. I.3 Analyse bibliographique du processus de destruction de la roche par forage roto-percutant [1]	10
Tableau. II.1 Propriété de l'abrasivité	21
Tableau. II.2 Propriété de la résistance à l'empreinte	23
Tableau. II.3 Exemple d'une carte de chronométrage	29
Tableau. II.4 Exemple d'une carte de chronométrage de la Sondeuse (ATLAS-COPCO)	31
Tableau. II.5 Généralisation des résultats de chronométrage	33
Tableau. II.6 Résultats des calculs des productivités	34
Tableau. III.1 Caractéristiques principales du diamant naturel [37]	41
Tableau. III.2 Résultats de recherche expérimentale de la dépendance $h = f(A)$	49
Tableau. IV.1 Plan d'expérience	56
Tableau. IV.2 Matrice d'expérience	58
Tableau. IV.3 Résultats de détermination de la vitesse de forage	59
Tableau. IV.4 Résultats expérimentaux réalisés dans les conditions de la carrière ...	67
Tableau. IV.5 Résultats expérimentaux réalisés dans les conditions de la carrière	68
Tableau. IV.6 Paramètres rationnels de régime de fonctionnement	70

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I Notions et Généralités sur les Travaux de Forage

Introduction	1
I.1 Etat Actuel de la Construction et L'utilisation des Sondeuses	1
I.1.1 Classification, Performance et Expérience de L'utilisation des Sondeuses	1
I.1.2 Particularités des Conditions de Travail des Machines de Forage dans les Carrières de calcaire Algériennes	5
I.2 Régularité du Forage Roto-percutant	7
I.2.1 Analyse des Recherches du Processus de Forage Roto-percutant	7
I.2.2 Influence des Différents Facteurs sur L'efficacité du forage Roto-percutant	12
I.3 Détermination des Régimes de Fonctionnement des Sondeuses Roto-percutantes	14
I.4 But de Recherche.....	17
Conclusion.....	17

Chapitre II Particularités de L'application des Machines de Forage

Introduction	18
II.1 Propriétés Physico-mécaniques des Roches à Abattre	18
II.1.1 Analyse des Propriétés Physico-mécaniques des Roches Influant sur le Processus de Forage.....	18
II.1.2 Méthodologie et Résultats de Détermination des Propriétés Physico-mécaniques des Calcaires Algériens (Abrasiveité, Résistance a L'empreinte).....	19
II.1.3 L'abrasivité	21
II.1.4 La Résistance à L'empreinte	22
II.2 Productivité des Sondeuses Roto-percutantes Appliquées Dans les Carrières de Calcaire Algérienne.....	24
II.2.1 Méthodes de Détermination de la Productivité des Sondeuses	24
II.2.2 Etude Expérimentale des Facteurs Influant sur la Productivité des Sondeuses Roto-percutantes	28
Conclusion.....	36

Chapitre III Paramètres Essentiels de L'organe de Travail

Introduction	37
III.1 Principe du Choix des Outils.....	37
III.2 Les Différents Types des Outils de Forage	37
III.2.1 Les Outils à Molettes	37
A. Classification des Outils à Molettes	39
III.2.2 Les Outils Diamants.....	40
A. Le Diamant Naturel.....	40
B. Diamant Synthétique	41
B.1 Les Outils PDC.....	41
B.2 Corps en Acier (Steel Body).....	42
B.3 Corps en Carbure de Tungstène (Matrix Body).....	42
III.3 Processus de Destruction de la Roche par les Machines de Forage Roto-percutantes.....	43
III.4 Particularité de L'interaction de L'outil de Forage a Pastilles Avec la Roche.....	46
Conclusion.....	53

Chapitre IV Etude Expérimentale de Régime de Fonctionnement d'une Machine de Forage

Introduction	54
IV.1 But de L'étude et Particularités de la Méthodologie de Recherche Expérimentale.....	54
IV.2 Analyse des Résultats de Régime de Fonctionnement de la Sondeuse Ingersoll-Rand.....	58
IV.3 Détermination de Régime de Fonctionnement des Machines de Forage Roto-percutantes	63
IV.3.1 Critère et Modèle de Choix de Régime Rationnel de Fonctionnement.....	65
IV.4 Modèle Mathématique du Prix de Revient d'un Mètre de Trou Fore.....	70
Conclusion.....	74

CONCLUSION GENERALE

NOMENCLATURE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans le monde, la consommation des matières premières ne cesse de croître, les pays riches en minerais tels que le fer, le cuivre ... etc. pour lesquels les exploitations doivent être importantes très mécanisées et produire en très grandes quantités pour être rentables. Ce type d'exploitation constituerait des pôles technologiques autour desquels pourrait s'ordonner un tissu industriel qui manque si cruellement en cette période [1].

La vocation minière d'un pays doit offrir des perspectives de développement nouveau, compte tenu du contexte dans lequel il se situe et de l'évolution de l'économie mondiale [2].

Ce choix de la mécanisation a une incidence directe sur les coûts et les rendements. On ne peut parler de forage sans pour autant considérer les propriétés physicomécaniques des roches à abattre et les méthodes de leur détermination. Quelque soient les conditions d'exploitation à ciel ouvert ou dans les mines souterraines, le forage peut être réalisé par différentes machines, que nous pouvons réunir en deux grands groupes les marteaux perforateurs et les sondeuses [2].

Le forage c'est l'action de creuser un trou de diamètre allant jusqu'à 75 mm ou un sondage dont le diamètre est supérieur à 75mm, de forme cylindrique dans le massif par la destruction de la roche [3].

A présent, on a vu l'apparition de nouveaux marteaux perforateurs roto-percutants différents suivant leur nombre ou coups, leur construction, l'énergie d'un coup ... etc. Ce qui a permis d'élargir leur domaine d'application. Les machines de forage sont divisées en deux types : hors du trou, dont le mécanisme de rotation et de frappe se trouve à l'extérieur du trou et le marteau fond de trou dont le mécanisme de frappe (percuteur) est disposé à l'intérieur du trou et le mécanisme de rotation est situé en dehors [3].

L'avancement de la technique de construction a été accompagné du perfectionnement correspondant des taillants ainsi que de leur technologie de fabrication. Parmi les outils utilisés, nous pouvons citer les taillants à boutons ou à pastilles dernière création de nos jours qui n'exigent pas d'affûtage [2].

La vocation de l'industrie minière à développer les exploitations et à augmenter leur productivité a poussé les chercheurs à créer des machines plus puissantes appelées sondeuses rotatives, roto-percutantes et thermiques dont le diamètre de forage peut atteindre 762mm [2].

L'importance du secteur minier pour l'économie nationale est capitale, afin de révéler les ressources valorisables réelles du pays. Les objectifs à atteindre sont nombreux tel que réduire notre dépendance à l'égard de l'étranger, produire au moindre coût.

En effet dans notre pays la découverte de nouveaux gisements nécessite des investissements et des moyens à mettre en œuvre pour pouvoir assurer le développement économique de l'industrie minière, comme elle peut être un support social et une stabilité pour les populations des régions peu favorisées.

L'objectif que doivent se fixer nos mines et carrières est celui d'une exploitation optimale des ressources Algériennes en tenant compte des leurs diverses caractéristiques techniques, économique et humaines. Ceci donne à réfléchir sur les travaux à réaliser et parmi eux le processus de forage qui est le facteur prédominant dans le développement d'une exploitation.

L'expérience montre que quelque soit la nature du massif et l'optimisation des paramètres des travaux de forage et de tir, le choix des machines et du mode de forage à utiliser reste une préoccupation majeure pour les entreprises nationales.

Après analyse des caractéristiques des carrières de calcaire nous avons constaté que l'emploi des machines de forage roto-percutant était prédominant [4]. L'utilisation de ces machines exige d'une part une grande productivité et de l'autre part une longue durée de vie. La satisfaction de ces exigences est possible si le mode de forage choisi est convenable aux conditions géologiques et minières et aux paramètres de forage rationnel [4].

La base méthodologique du travail de recherche consiste à trouver la combinaison des paramètres de réglage satisfaisant les exigences énumérées dans les conditions concrètes, après cela préconisé les recommandations qui visent le perfectionnement et une meilleur exploitation des sondeuses roto-percutantes.

Le but de recherche présenté consiste à élaborer les méthodes de la détermination des paramètres du régime rationnel de fonctionnement de la machine de forages roto-percutant lors de son exploitation dans les conditions géologiques et minières définies; et pour arriver à un prix de revient d'un mètre de trou foré minimum, il est nécessaire:

- ✓ D'analyser les méthodes existantes des calculs des paramètres de fonctionnement du régime de forage roto-percutant.

- ✓ Déterminer les valeurs numériques des propriétés physico mécaniques des roches nécessaires pour faire le calcul correspondant.

- ✓ D'établir les paramètres géométriques de l'organe de travail employé dans les machines de forage roto-percutant.

- ✓ D'appliquer les méthodes de calcul énumérées afin de déterminer les valeurs de la vitesse de forage.

✓ Faire les recherches expérimentales dans le but de vérifier les méthodes de calcul afin de les comparer et les analyser.

✓ Proposer une méthode de la détermination des paramètres rationnels de forage roto-percutant.

Pour atteindre notre objectif, nous nous sommes fixé la démarche suivante :

Dans un premier temps, au chapitre I nous avons axé notre travail sur la recherche bibliographique afin de mieux nous imprégner sur le développement du mode de forage roto-percutant.

Dans un deuxième temps, au chapitre II nous avons déterminé la productivité de la sondeuse roto-percutante. Les valeurs rationnelles des paramètres caractérisant le régime de forage dépendent en premier lieu des propriétés physico-mécaniques des roches à forer, c'est pourquoi il est nécessaire d'étudier les propriétés physico-mécaniques des calcaires algériens en déterminant leur abrasivité ainsi que l'indice de la résistance à l'empreinte.

Cette étude a été réalisée dans la carrière de Hadjar-Soud et a commencé par l'observation visuelle du gisement qui a pour but la subdivision de celui-ci en nombre déterminé des parties d'après la couleur, l'intensité de fracturation et la présence d'impuretés etc... Après cela nous avons prélevé un certain nombre d'échantillons permettant de déterminer l'abrasivité et l'indice de la résistance à l'empreinte dans le laboratoire.

Au chapitre III nous avons étudié la particularité d'interaction de l'outil de forage à pastilles avec la roche.

Pour établir la régularité d'interaction des forces des pastilles ayant divers paramètres géométriques avec la roche, nous avons effectué au laboratoire des essais expérimentaux correspondants. Pour cela nous avons réalisé un stand de détermination de la profondeur d'enfoncement de l'outil à pastilles dans la roche.

Une fois l'expérience terminée on a abouti à l'expression de détermination de la profondeur d'enfoncement h .

Le chapitre IV est consacré à l'étude expérimentale, celle-ci vise à déterminer l'influence des paramètres de réglage à savoir la vitesse de rotation et la force axiale appliquée sur l'efficacité du processus de forage, qui se caractérise par la vitesse de forage.

Cette étude a été faite dans les conditions réelles et avait comme objet de recherche la sondeuse roto-percutante Ingersoll-Rand. En résultat de recherche nous avons déterminé les limites techniques caractérisant la construction de la sondeuse (force axiale maximale, vitesse d'avancement et de rotation maximale).

Le traitement statistique des résultats obtenus a permis d'aboutir à l'expression de l'équation de régression de la vitesse de forage qui est juste pour le domaine d'application de la vitesse de rotation de 55 à 75 tr/min et la poussée axiale de 400 à 500 kgf.

Et comme critère de choix de régime de fonctionnement de la machine de forage roto-percutant, nous avons pris l'indice du prix de revient d'un mètre du trou foré; et dans ce sens on va proposer un model mathématique de ce dernier.

Finalement on a achevé notre travail par une conclusion générale contienne les principaux résultats obtenus et les remèdes des obstacles d'atteindre le plutôt possible un prix de revient d'un mètre de trou foré minimum et en même temps d'améliorer les conditions de travail de forage.

Chapitre I

Notions et Généralités sur les Travaux de Forage

INTRODUCTION

La technologie de forage et de perçage 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 [3]. Les opérateurs et les fabricants ne cessent d'explorer les moyens de réduire les coûts et accroître la productivité en améliorant les taux de pénétration de forage et de diminuer l'usure de l'outil perforation [3].

I.1. ETAT ACTUEL DE LA CONSTRUCTION ET L'UTILISATION DES SONDEUSES

La méthode d'exploitation choisie doit assurer une extraction complète et économique de toutes les réserves exploitables; comme elle doit assurer la protection de travail (sécurité) et l'entourage qui liée avec les performances et l'expérience de l'utilisation des sondeuses pour la destruction des roches.

I.1.1. Classification, Performance et Expérience de L'utilisation des Sondeuses

Les sondeuses utilisées pour le forage des trous dans les carrières sont divisées en général en deux (2) groupes d'après le mode de forage :

- Les sondeuses à destruction mécanique,
- Les sondeuses à destruction physique.

La méthode physique s'applique surtout pour le forage des trous dans les assises, ayant de grande teneur en quartz. C'est pourquoi l'application de cette méthode dans les carrières de calcaire est très limitée [4]. Quant aux sondeuses à destruction mécanique elles sont les plus répandues. D'après le caractère du travail de l'outil et l'application des charges, on distingue les machines de forage rotatif, percutant et roto-percutant [4].

Le schéma de la destruction des roches au fond du trou au cours de divers modes de forage est représenté sur la (**fig. I.1**). La (**fig. I.2**) reflète la distribution des valeurs relatives de l'effort axial $-P$, de la puissance de choc $-N_{ch}$ et de puissance de rotation $-N_r$.

La pratique du forage montre que l'efficacité de l'application des machines à forer est déterminée par l'ensemble des facteurs parmi lesquels nous distinguons les conditions minières et géologiques ainsi que les paramètres technologiques de la réalisation des travaux miniers caractérisant le travail des machines à forer et le prix d'un mètre de trou. Les valeurs relativement hautes de cet indice concernant les sondeuses à molettes sont liées à leurs prix élevés [1].

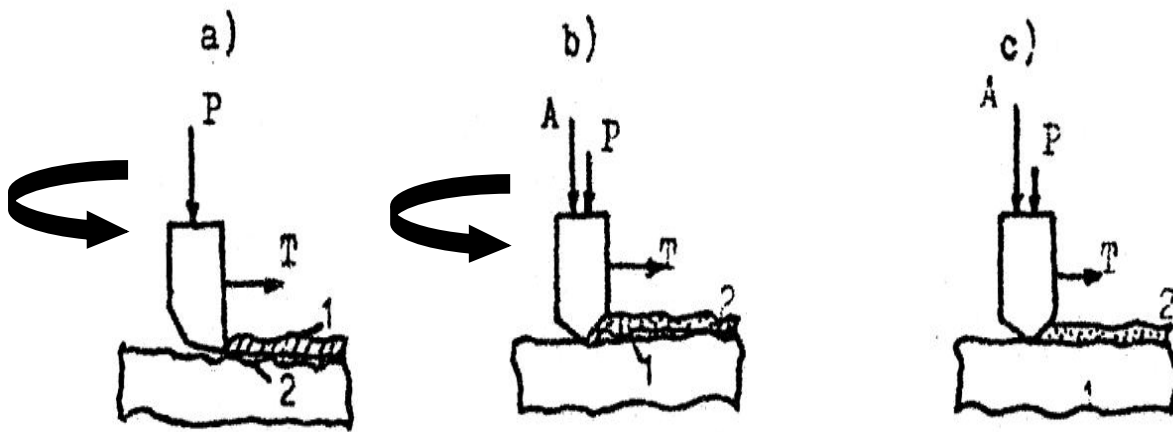


Fig. I.1 Destruction de la roche lors du forage [1].

a → Rotatif

b → Roto percutant.

c → Percutant

- A → Impulsion d'une force de choc.
- P → Effort axiale.
- T → Effort tangentiel.
- 1 → Destruction de la roche par coupe.
- 2 → Destruction de la roche par choc.

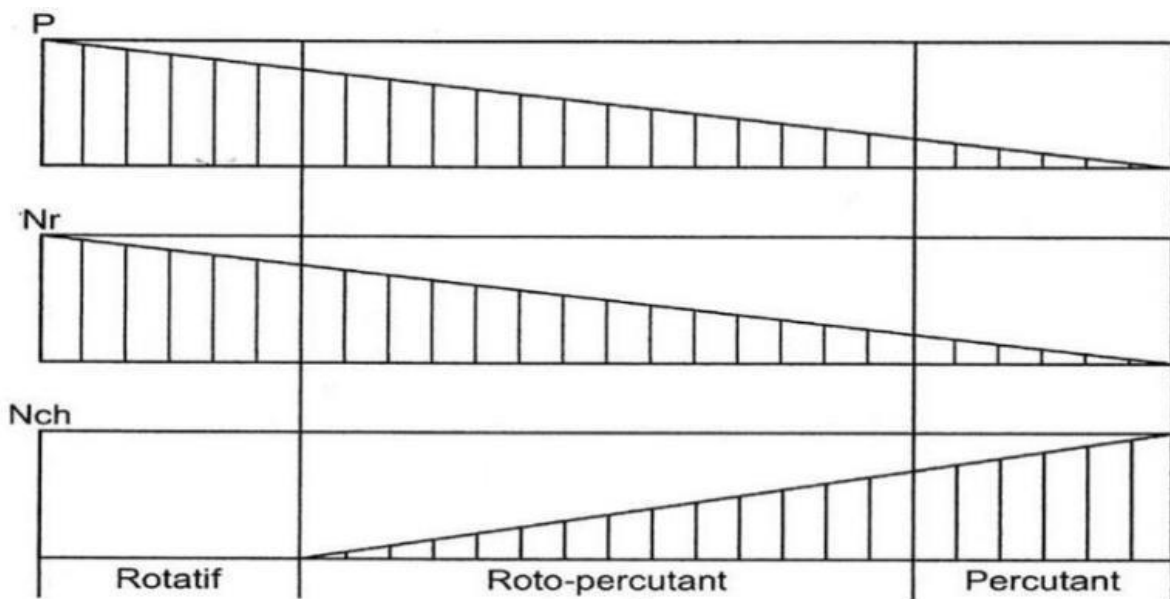


















Fig. I.2 valeurs relatives à l'effort axial, à la puissance de rotation, et à la puissance de choc lors de divers forages [1].

L'analyse des caractéristiques techniques des machines à forer existantes nous a permis de déterminer le domaine d'utilisation de divers modes de forage réalisés par ces machines (**tabl I.1**).

D'après ce tableau, il convient de dire que le domaine d'utilisation des modes de forage en question se détermine par les indices technico-économiques et par les particularités de la construction des sondeuses, par exemple la limite inférieure du diamètre du trou foré à l'aide des trépan à molettes est limitée par les facteurs constructifs [5]. La profondeur de forage pour les autres modes se limite par l'efficacité des moyens de nettoyage etc... [4].

Ainsi ce tableau permet en sachant les propriétés physico mécaniques des roches et paramètres des travaux de forage de choisir le mode de forage convenable [1].

Tableau. I.1 Domaine d'utilisation des divers modes de forage [6].

Percutant	Roto-percutant	Rotatif		Mode de forage	
A couronne	A couronne	A molettes	Coupant	Outils de forage	
				1 - 6	Coefficient de dureté, <i>f</i>
				6 - 8	
				8 - 10	
				10 - 12	
				12 - 14	
				14 - 16	
				16 - 20	
				0 - 5	Indices d'abrasivité, <i>a</i> , mg
				5 - 10	
				10 - 18	
				18 - 30	
				30 - 45	
				45 - 65	
				65 - 90	
				> 90	
				0 - 50	Diamètre du trou, <i>d</i> , mm
				50 - 100	
				100 - 150	
				150 - 200	
				200 - 250	
				250 - 300	
				300 - 350	
350 - 400					
				0 - 5	Profondeur de forage, <i>H</i> , m
				5 - 10	
				10 - 15	
				15 - 20	
				20 - 25	
				25 - 30	
				30 - 35	
				35 - 40	

I.1.2. Particularités des Conditions de Travail des Machines de Forage dans les Carrières de Calcaire Algériennes

En analysant la géologie des gisements de calcaire d'Algérie nous pouvons déduire que ces derniers sont de type montagneux constitués essentiellement de calcaire pur et homogène les réserves de ces calcaires sont considérables (**tabl I.2**). Habituellement les structures d'ensembles sont simples, cependant elles se compliquent légèrement pour certains gisements par suite de l'existence de failles et de grottes dans les calcaires du bas.

Le pendage de ces gisements varie dans les limites de **40 à 85°**. Les travaux d'extraction se font comme règle à partir des travaux de forage et de tir. Les paramètres caractérisant certaines propriétés physico-mécaniques des roches et les paramètres des travaux de tir sont présentés dans le (**tabl I.2**). Le forage dans ces carrières s'effectue au moyen des sondeuses roto-percutantes.

L'utilisation efficace des machines de forage dans les carrières Algériennes dépend des conditions de travail.

Une généralisation des recherches effectuées dans ce domaine [6, 7,8] a permis d'établir le caractère et le degré d'influence de divers facteurs sur les indices technico-économiques du processus de forage des trous.

L'application des machines à forer dans les conditions des carrières se caractérise en particulier par leur productivité postière en fonction du coefficient de dureté.

Tous ces paramètres portent le caractère aléatoire, c'est pourquoi pour les évaluer on utilise les méthodes de la théorie statistiques [9].

Tableau. I.2 Caractéristiques des carrières de calcaire Algériennes [4].

Carrière	Réserve, ml, t	Productivité Annuelle, ml.t/an	Hauteur du gradin, m	Diamètre de trou, mm	Poids Volumique, t/m ³	Dureté de la roche, f	Moyens de forage
Meftah	60	1 000	10 - 18	60 - 180	2.5	8	Ingersellrand
Unité d'agrégat (Arsew)	27	500	8 - 12	76	2.6	5	Crawlair
Ain-elkérira	25	1 000	8- 15 - 18	104-120 -152	2.6 – 2.7	6	Crawlair D.M- 4
Oued Sly (El-asnam)	30	1 000	13	80	2.6	6	C.O.P- 4
Hamma Bouziane	63	720	18 - 22	102 - 127	2.5	7	Ingersellrand R.O.C-301
Zahana	43	243	20	-	1.89	7	-
Hadjar-Soud	144	1 000	10 - 21	104	2.4 – 2.7	8	Ingersellrand Atlas-copco
Oued-el-Ane (Annaba)	30	150	13 - 17	93	2.5	8	C.O.P- 4
Ain-Touta	120	1 200	15	85 - 120	2.6	7	Ingersellrand

I.2. REGULARITE DU 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.

I.2.1. Analyse des Recherches du Processus de Forage Roto-percutant

La puissance appliquée à l'outil est de trois sortes :

- ✓ Puissance de choc $-N_c$,
- ✓ Puissance de rotation $-N_r$,
- ✓ Puissance d'avancement $-H_a$.

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 est fonction d'un choix rationnel des principaux paramètres cités ci-dessus, la méthode de forage roto-percutant présente des avantages pour l'établissement des combinaisons rationnelles de ces paramètres afin d'obtenir une meilleure destruction de la roche. Plusieurs travaux de recherche ont été mené dans ce sens [8, 10, 11].

Les résultats de l'analyse de ces travaux sont représentés dans le (**tabl I.3**):

-EPCHTEIN: 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 1) 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 [8].

-PATSOLOD: 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 [8].

-ALIMOV .O : a décrit le processus de destruction de la taille comme la pénétration de l'outil au moment du choc à la profondeur $-h$, 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 [10].

-MELEKESTSEV: 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 [10].

-IKHARA: 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 enfoncement à la profondeur $-h_s$ sous l'action de la force axiale [10, 11].

La grandeur sommaire de la pénétration pendant un cycle de la destruction est égale a

$$h_c + h_s \quad (\text{I.1})$$

-ISRAELIT : 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 [11].

En généralisant les diverses présentations concernant le processus de la destruction de la taille par l'outil pendant le forage roto-percutant l'auteur [3] a présenté le processus comme suit (**fig. I.3**).

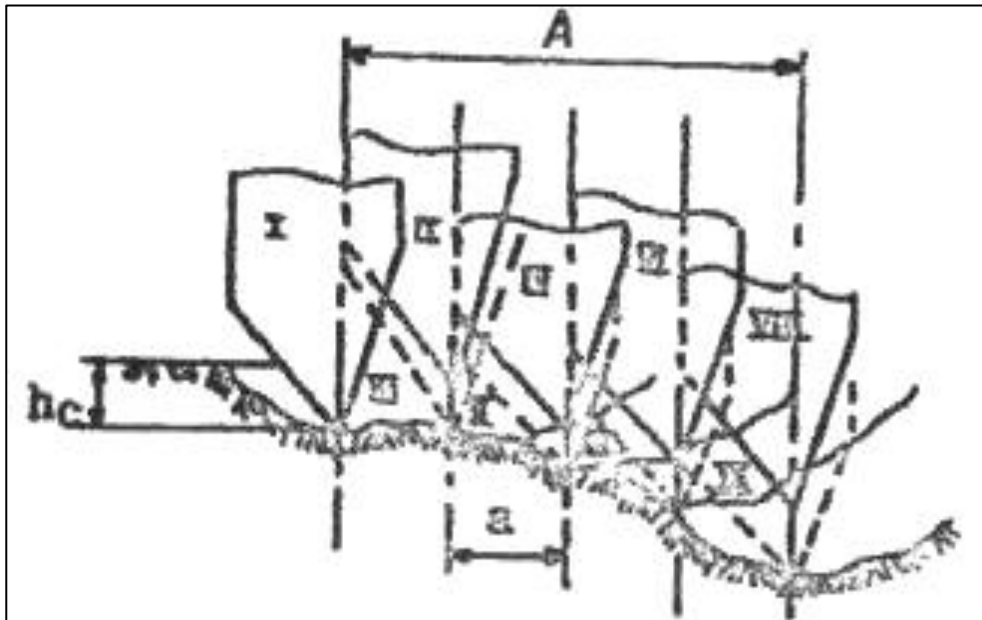


Fig. I.3 Schéma de destruction de la roche par forage roto-percutant à l'aide de l'outil

à lames [3].

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 quelle 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 Pénètre dans la taille (position III) à la profondeur $-h$, qui est inférieure à $-h_c$, ($h_1 < h_c$).

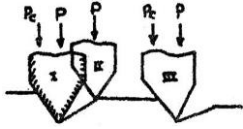
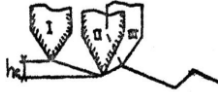
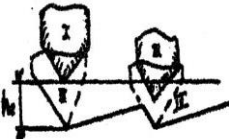
Après cela, sous l'action du couple de rotation, à lieu le coupage de la roche le long de la ligne $-A$, les lames du taillant se déplacent à la position IV, après cela les lames sous l'action de la force axiale du taillant se déplacent à la position V et le cycle recommence jusqu'au choc suivant.

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. 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.


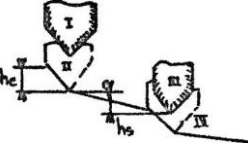
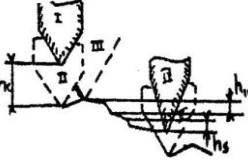
Il est à noter que dans ce cas, la destruction est réalisée à l'aide de l'outil à lames, ce qui ne nous permet pas de l'utiliser directement, car dans les conditions des carrières de calcaire Algériennes, on utilise le plus souvent l'outil à pastilles pour la destruction de la roche. Il est évident que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

Après l'analyse des sources bibliographiques, nous avons constaté qu'à l'heure actuelle, il n'existe aucune étude concernant ce problème.

Tableau I.3 Analyse bibliographique du processus de destruction de la roche par forage roto-percutant [1].

Auteur, Année	Schéma de destruction	Relation de base	Observations
EPCHEIN 1939		<p>Condition de la pénétration $P_c + P \geq R_z \times S$ R_z : résistance critique de la roche, S: Surface de contact.</p>	<p>P < P_c</p>
PATSOLD 1953		<p>h_c : profondeur de la pénétration sous l'action du choc.</p>	<p>Position : I : avant le choc, II : à la fin du choc, III : avant le choc suivant.</p>
ALIMOV .O 1959		<p>h_b : hauteur de bondissement entre les chocs.</p>	<p>Position : I : avant le choc, II : après le choc, III : après la rotation, IV : avant le choc suivant.</p>

(La suite du Tableau I.3) Analyse bibliographique du processus de destruction de la roche par forage roto-percutant.

Auteur, Année	Schéma de destruction	Relation de base	Observations
MELEKESTSEV 1960		h_0 : hauteur de l'élévation, $h = h_c + \rho \times P$ ρ : coefficient de proportionnalité,	Position : I : avant le choc, II : après le choc, III : après l'élévation, IV : après la rotation, V : avant le choc suivant.
IKHARA 1963		$h = h_c + h_s$	Position : I : avant le choc, II : après le choc, III : après le coupage pendant la rotation, IV : avant le choc suivant.
IZRAELIT 1964		$h = h_c + h_m - h_s$	Position : I : avant le choc, II : après le choc, III : après le bondissement, IV : après la rotation, V : avant le choc suivant.

I.2.2. Influence des Différents Facteurs sur L'efficacité du Forage Roto- Percutant

En généralisant les résultats des recherches [12, 13] 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 (**fig. I.4 a**). L'accroissement de l'énergie et de la fréquence de coups augmente l'avancement de l'outil. Par exemple si on a $P = 1000 \text{ kgf}$, le changement de l'énergie d'un choc A est de $1.2 \div 3.0 \text{ kgf.m}$ (**fig. I.4 a**) donne l'accroissement de h est de $9 \div 11 \text{ mm/tr}$, c'est à dire **22%**. L'augmentation de l'énergie d'un choc de $3.5 \div 5.0 \text{ kgf.m}$ (**fig. I.4 b**) avec l'augmentation parallèle de la fréquence de coups de $1800 \div 3100 \text{ coup/min}$ 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 (**fig. I.4 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 $f = 5 \div 6$, l'abaissement de la vitesse de rotation de $300 \div 100 \text{tr/min}$ provoque l'augmentation de la pénétration de l'outil en **2 foies**. Ce phénomène s'explique par le changement de l'angle de rotation entre deux coups (γ).

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 de coordonnées " $h - P$ " (**fig. I.4 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 quand on élimine les coups sur la tige de forage on a le régime de forage rotatif. La représentation de la (**fig. I.4 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 , ne et le forage rotatif pour la même valeur de P .

La relation de l'avancement de l'outil en fonction de la poussée axiale est écrite sous la forme :

$$h = q_1 (h_1 + q_2 \times P) \quad (\text{I.2})$$

Où :

- q_1 et q_2 : coefficients de proportionnalité.

Le coefficient $-q_1$ peut être présenté comme le produit des coefficients qui tiennent compte des paramètres géométriques de l'outil de forage appliqué ($q_{\text{géo}}$, q_{nb}), du degré de l'usure (q_{u}) des lames et de l'influence de l'angle de rotation entre deux coups (q_{w}).

$$q_1 = q_{\text{géo}} \times q_{\text{nb}} \times q_{\text{u}} \times q_{\text{w}} \quad (\text{I.3})$$

Le coefficient $-q_2$ dépend des propriétés physico-mécaniques des roches (q_p) et de la vitesse de rotation de l'outil (q_n).

$$q_2 = q_n \times q_p \tag{I.4}$$

La valeur de $-h_1$ est déterminée par la dureté des roches, l'énergie et la fréquence de coups.

-ALIMOV .O [8] a trouvé les valeurs des coefficients en question, mais l'utilisation de ces résultats est liée aux difficultés suivantes :

- Le coefficient q_p dépend considérablement du type de roche et selon l'auteur [8], doit être déterminé chaque fois dans les conditions réelles.
- On recommande les valeurs des coefficients $q_{géo}$ pour l'outil de forage à lames, ce qui n'est pas possible de les employer dans notre cas, vu l'utilisation de l'outil à pastilles.

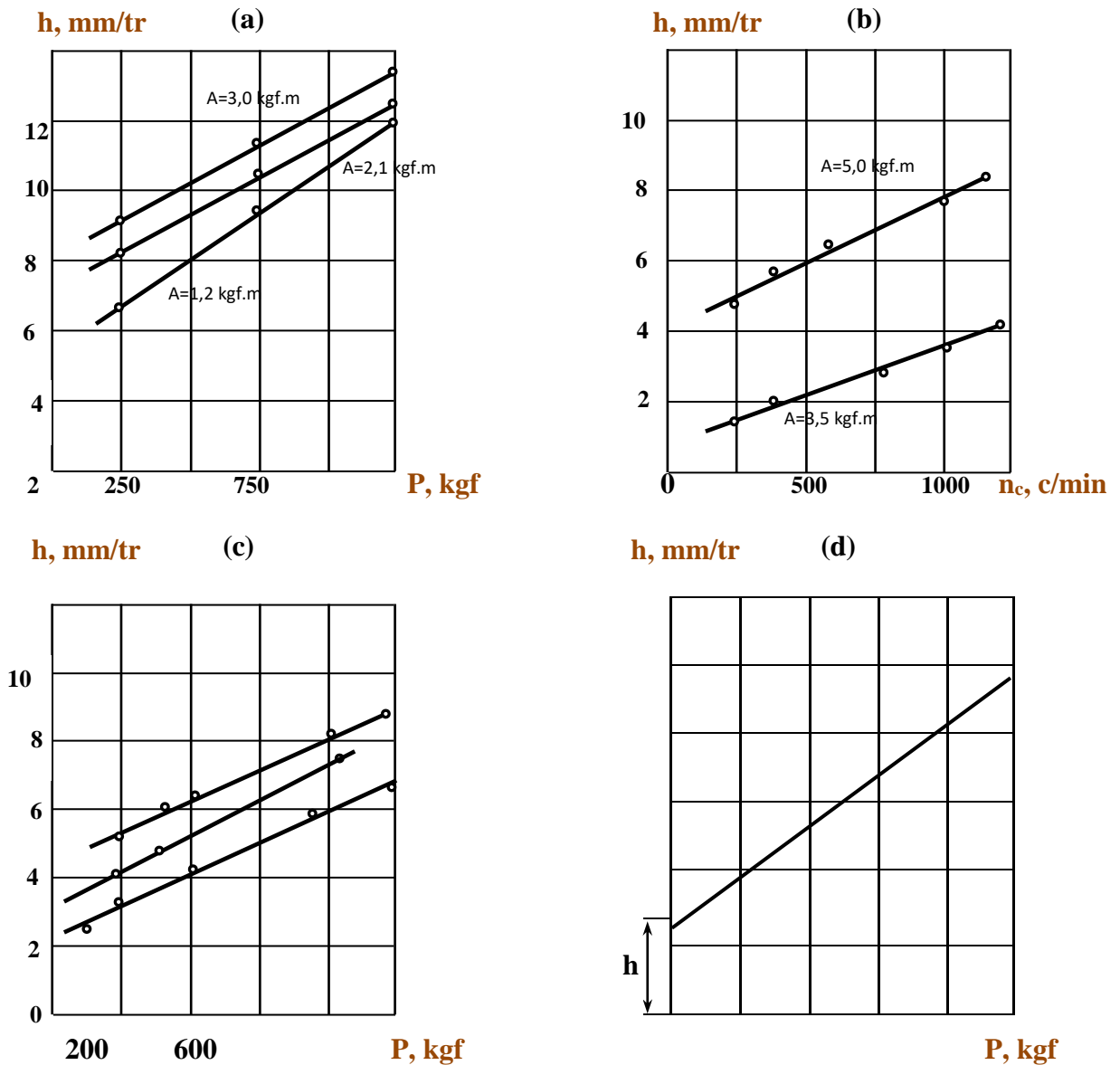


Fig. I.4 Influence de différents facteurs sur l'efficacité de forage roto-percutant [3].

Où :

- h : l'avancement de l'outil de forage, (mm/tr).
- P : force axiale, (Kgf).
- n_c : nombre du coup, (c/mn).

I.3. DETERMINATION DES REGIMES DE FONCTIONNEMENT DES SONDEUSES ROTO-PERCUTANTES

L'analyse des sources bibliographiques effectuée montre qu'il convient de comprendre le terme régime de forage roto-percutant comme étant une combinaison de l'énergie d'un choc, de la force axiale et de l'angle de rotation entre les chocs voisins. Ce dernier est déterminé par la relation du nombre de chocs et la vitesse de rotation. Ce sont les propriétés physico-mécaniques de la roche, les paramètres géométriques de l'outil de forage ainsi que la force axiale appliquée qui exercent une influence sur le choix du régime de forage.

Avec cela, on recommande divers régimes de forage pour différents schémas cinématiques et constructifs des machines de forage.

Par exemple, KRASSAVINE .G [13] recommande d'utiliser la formule suivante qui permet de déterminer l'angle optimal de rotation de l'outil lors d'un choc.

$$\Psi_{opt} = \frac{360 \times m \times Bl}{\pi \times d}, \text{ (degré)} \quad (\text{I.5})$$

Où :

- m : nombre de lames sur la couronne.
- Bl : largeur de la trace de destruction au cours d'un choc; (cm).
- d : diamètre du trou; (cm).

En même temps MENDELI .E [13] a proposé pour le même but la formule suivante :

$$\Psi_{opt} = (6 \times 10^{-2} \times A - 6 \times 10^{-3} \times A^2 + 2.4 \times 10^{-4} \times A^3), \text{ (degré)} \quad (\text{I.6})$$

Où :

- A : paramètre de destruction de la roche,

$$A = \frac{10 \times W}{\sigma_{comp} \times d^3} \quad (\text{I.7})$$

Où :

- W : énergie d'un choc; (j).
- σ_{comp} : résistance à la compression; (MPa).

Cependant, on remarque une différence dans les résultats de détermination dans les mêmes conditions et en outre ces formules ne sont valables que pour les sondeuses avec l'outil de forage sous la forme d'une couronne à lames, ce fait limite leur domaine d'utilisation.

En ce qui concerne les autres paramètres des régimes de forage (vitesse de rotation, force axiale appliquée, etc...) nous pouvons citer les recommandations pratiques élaborées par ALIMOV .O [6].

D'après ces recommandations, par exemple pour le perceur MP-3 muni de la couronne BK-105 lors du forage dans les roches avec la dureté $f= 6 \div 8$, celui-ci doit avancer contre la taille sous l'action de la force axiale de **150 kgf** et tourner avec la vitesse de rotation de **55 ÷ 65tr/min**.

En même temps il existe des recommandations par MENDELI .E [13] d'après lesquelles il convient de prendre les valeurs de la force axiale comme suit :

- ✓ Pour les roches dures et abrasives :

$$P_{ax} = (0.75 \div 1.5)d, \text{ (kgf).}$$

- ✓ Pour les roches mi-dures et abrasives :

$$P_{ax} = (2 \div 3)d, \text{ (kgf).}$$

- ✓ Pour les roches dures, mi-dures et non abrasives

$$P_{ax} = (5 \div 7)d, \text{ (kgf).}$$

Où :

- d : diamètre du trou, (mm).

D'après ces mêmes recommandations les vitesses rationnelles de rotation de l'outil de forage sont égales à **25÷50tr/min** pour les roches dures et de **70÷90 tr/min** pour les roches tendres. Mais il est à noter que les recommandations précitées portent le caractère expérimental, donc particulier.

Il s'agit toujours de forage à l'outil à lames. En outre nous signalons qu'il existe des contradictions entre les recommandations de ALIMOV .O [8] et celles de MENDELI .E [13].

Il convient aussi de mentionner un inconvénient des recommandations en question. Dans ce cas on ne tient pas compte des possibilités techniques des sondeuses qui parfois ne nous permettent pas d'obtenir les régimes de forage recommandée. Pour éviter cet inconvénient, dans la thèse de magister OUADI .M [14] propose une méthode de nomogramme dont l'utilisation tient compte de l'influence de la construction de la sondeuse sur sa productivité et du choix des régimes de forage convenables. Cette méthode porte le caractère général et peut être utilisée pour toutes les machines de forage.

En appliquant les résultats obtenus, l'auteur [14] a élaboré l'analyse comparative des capacités techniques des machines de forage dans les mêmes conditions et a déduit à partir de cette comparaison l'utilisation rationnelle de l'une d'elles. Il est nécessaire de souligner que l'auteur a proposé d'utiliser pour ce but en qualité de critère des dépenses totales, ce qui est de notre point de vue le plus pertinent.

Cependant nous notons certaines limites de ce travail de recherche qui à notre avis rendent son utilisation peu efficace et néanmoins nécessite une correction; ces limites sont:

- L'absence de recherche concernant les propriétés physico-mécaniques des roches, ceci n'a pas permis à l'auteur de déterminer l'influence de l'écart possible de ces derniers sur la productivité des machines de forage et d'élaborer les recommandations visées à la correction des régimes de travail.

- La méthode proposée de détermination des régimes du travail rationnel des machines de forage qui se base sur l'utilisation de formules connues, n'a été vérifiée que pour les perforateurs, la détermination de la productivité a été faite par l'utilisation d'une méthode connue qui présente beaucoup d'inconvénients (**Chapitre II**).

- La méthode concernant les machines de forage roto-percutant est basée sur l'application des formules proposées pour l'outil à lames. Tandis que dans les conditions des carrières de calcaire Algériennes on utilise le plus souvent l'outil à pastilles.

De cette manière, l'analyse réalisée des sources bibliographiques montre que l'étude de la question du choix des régimes de travail des machines de forage roto-percutant est insuffisante.

Tout cela s'accroît par les contradictions concernant les recommandations élaborées dans le cas de l'utilisation de l'outil à lames et l'absence totale de ces dernières au sujet de l'utilisation de l'outil à pastilles.

I.4. BUT DE RECHERCHE

Le but général de la recherche consiste à étudier le régime de forage de la sondeuse roto-percutantes dans les conditions des carrières de calcaires algériennes en faisant un choix optimal des paramètres de forage qui nous permettent de forer avec un prix minimal.

Les méthodes suivantes sont utilisées pour atteindre ce but :

- ✓ L'observation directe et le chronométrage.
- ✓ La planification des expériences.
- ✓ Le traitement statistique des résultats obtenus.

CONCLUSION

D'après les caractéristiques des carrières de calcaire algérienne, on utilise les machines de forage roto-percutant.

L'étude bibliographique montre que le régime de forage roto-percutant est déterminé par la combinaison de la vitesse de rotation de l'outil, de la force axiale appliquée, de l'énergie d'un choc et du nombre de coups portés; leurs valeurs optimales dépendent en particulier du type de l'outil et des propriétés physico-mécaniques des roches à abattre.

Chapitre II

Particularités de L'application des Machines de Forage

INTRODUCTION

Dans le chapitre II nous avons déterminé les propriétés physico-mécaniques (l'abrasivité et la résistance à l'empreinte) d'un échantillon de calcaire Hadjar-Soud en laboratoire; ainsi que nous avons étudié les facteurs qui influent sur l'amélioration de la productivité des sondeuses roto-percutantes.

II.1. PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES DES ROCHES A ABATTRE

Il est difficile d'énumérer les diverses propriétés des roches qu'il est nécessaire de connaître lors de la résolution de divers problèmes pratiques, géologiques, minéralogiques etc...

Le processus de forage dépend de plusieurs propriétés mais en premier lieu des propriétés physico-mécaniques.

II.1.1. Analyse des Propriétés Physico-mécaniques des Roches Influant sur le Processus de Forage

On sait que la roche est caractérisée par plus de vingt constantes élastiques. Il est évident qu'au cours de l'exploitation des minéraux utiles il est impossible de tenir compte de toutes les propriétés des roches pour leur utilisation pendant la correction des régimes de destruction. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver un indice qui permettrait de planifier les travaux miniers d'extraction et de déterminer les régimes rationnels de fonctionnement des machines minières, parmi ces propriétés l'indice du coefficient de dureté proposé par le professeur PROTODIAKONOV .M est le plus simple et le plus largement utilisé [7].

Lors de la détermination du coefficient de dureté, le coefficient de sa variation dans le massif dépasse **30%** ce qui signifie par exemple que si on a la vitesse de forage moyenne de **1000 mm/min** son écart moyen peut être $\pm 300 \text{ mm/min}$ [7].

CHRAINER .B [15] a argumenté l'application d'une nouvelle caractéristique de la résistance de la roche qu'on appelle solidité $-P_{ch}$. Elle est déterminée comme pression de contact moyenne lors de l'enfoncement de l'étampe dans l'échantillon de la roche. Bien que cette caractéristique donne le coefficient de variation égal à **10÷20%** elle n'a pas reçue une large application à cause des difficultés lors du traitement des échantillons [15].

BARON .L et GLATMAN .L ont proposé la méthode de détermination de la résistance à l'empreinte $-P_k$ [16]. Etant donné que cette caractéristique permet de tenir compte des tensions paraissant dans la couche superficielle de la roche, cet indice caractérise le processus de forage. Cette méthode consiste à enfoncer la surface non traitée de l'étampe sous la forme d'un tronc de cône dans la roche. L'utilisation de cet indice comme critère d'efficacité du processus

de forage a permis de recevoir les valeurs du coefficient de variation qui ne dépassent pas **20%** [16].

L'utilisation de la résistance à l'empreinte est plus efficace à celle du coefficient de dureté, cependant il existe des cas où les valeurs des coefficients de variation restent assez considérables. L'inconvénient de cet indice consiste dans les capacités de la roche d'user l'outil de travail. Pour éliminer cet inconvénient BARON .L et KOUZNETSOV L [11] ont proposé une méthode d'appréciation d'une propriété qu'on appelle l'abrasivité.

Les résultats des recherches effectuées montrent que la combinaison des indices de la solidité et de l'abrasivité permet d'obtenir les paramètres de forage avec le coefficient de variation ne dépassant pas les **10%** [11]. Sur cette base nous pouvons déduire les conclusions suivantes :

- ✓ Pour l'obtention des données justes, il est nécessaire d'apprécier les roches d'après la résistance à l'empreinte **-P_k** et l'abrasivité **-a**.
- ✓ Il faut obligatoirement tenir compte de l'abrasivité si sa valeur dépasse **10 mg**.
- ✓ S'il est nécessaire d'obtenir une information rapide sur les propriétés mécaniques des roches, nous pouvons employer le coefficient de dureté **-f (tabl II.1)**.

II.1.2. Méthodologie et Résultats de Détermination des Propriétés Physico-mécaniques des Calcaires Algériens (Abrasivité, Résistance à L'empreinte)

L'étude sur les propriétés physico-mécaniques des calcaires des carrières Algériennes n'a pas suffisamment vue des travaux de recherches approfondies.

Dans sa thèse de magister, LAHMER .K.M [17] ayant effectué une étude sur les propriétés physico-mécaniques des calcaires d'Ain-el-kebira a abouti aux conclusions suivantes :

- La variation de la densité des calcaires de la carrière d'Ain-el-kebira n'est pas importante [17].

- La masse volumique varie de **2.361 kgf/cm³ ÷ 2.676 kgf/cm³** [17].

-Les indices des propriétés mécaniques varient dans de larges limites. Les valeurs des résistances à la compression, à la traction et au cisaillement se trouvent respectivement dans les limites : **117.2÷246.3MPa, 9.2÷26.6MPa, 5.5÷11.4MPa** [17]. Cela détermine une large variation du coefficient de dureté **-f (11.7 ÷ 24.6)** et des indices à la résistance à la destruction **(2.6÷16.8)**, à la fiabilité **(11.1÷21.5)** [17]. Selon l'avis de l'auteur [18] cela s'explique par la composition chimique des échantillons pris dans de diverses parties du gisement.

Dans son travail de magister BOUHEDJA .A n'a pas étudié soigneusement les conditions géologiques des carrières d'Algérie du fait qu'il n'a pas tenu compte des propriétés physico-mécaniques des roches [17].

Notre étude sur les propriétés physico-mécaniques des calcaires de la carrière de Hadjar-Soud a débuté par l'observation visuelle du gisement, subdivision du gisement en nombre de partie d'après les particularités de fissuration, présence d'impuretés (**fig. II.1**). Après avoir fait en plusieurs parties, nous avons prélevé un nombre d'échantillons déterminer l'abrasivité et l'indice le la résistance à l'empreinte dans les conditions de laboratoire [4].

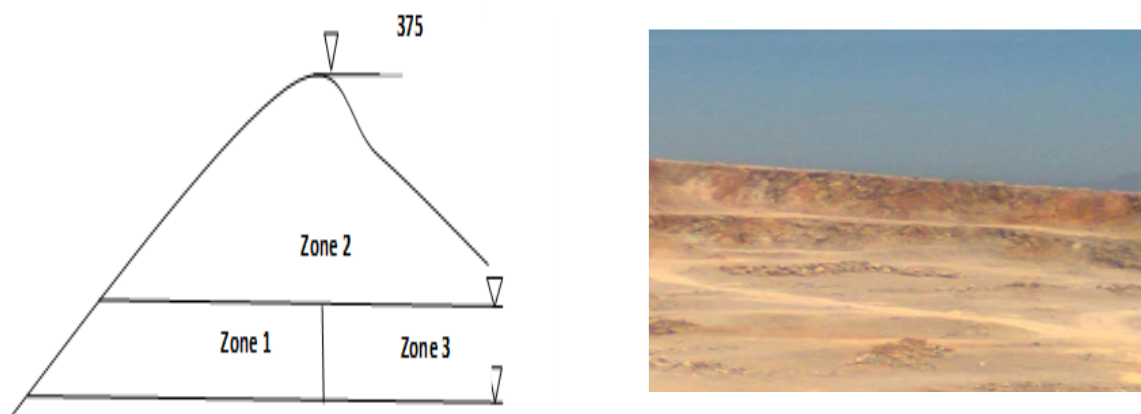


Fig. II.1 Répartition du massif en zones pour l'étude des propriétés physico-mécaniques, (résistance à l'empreinte, abrasivité) [19].

Chaque échantillon de volume $250 \div 300 \text{cm}^3$ et plus, porte deux facettes parallèles. En partant de l'hypothèse que les valeurs des coefficients de variation des indices des propriétés étudiées (abrasivité, résistance à l'empreinte) ne dépassent pas les **10%**, le nombre pour chaque type d'essai physico-mécanique se détermine par la formule suivante [9] :

$$m = \frac{\sigma \times t_{\alpha}}{\varepsilon} \quad (\text{II.1})$$

Où :

- m : écart type.
- t_{α} : sureté.
- ε : erreur admissible.
- σ : variation des indices des propriétés étudiées.

II.1.3. L'abrasivité

L'essai des roches sur l'abrasivité a été réalisé d'après la méthodologie proposé par BARON.L [11].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 se fait avec une force axiale de **15 kgf** et une vitesse de rotation égale à **400tr/min** créant le frottement de la tige [4, 20].

Les essais sont effectués à l'aide de stand représenté sur la (**fig. II.2**), dont le principe de fonctionnement s'illustre de la manière suivante: l'éprouvette de la roche (1) est serrée entre les garnitures (3) d'un dispositif (2) repose sur l'une des deux facettes. Lors de l'essai, une tige mesure (4) fixée dans un mandrin (5) d'une machine à percer descend sur l'échantillon après avoir mis le moteur (7) en marche de la machine outil. La force axiale demandée est assurée par la charge (6). 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** [1].

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

$$a = \frac{(P_{2i} + P_{1i})}{2N}; (mg) \quad (\text{II.2})$$

Où :

- N : Nombre d'essai de chaque échantillon.
- P_{2i} : Masse initiale de l'échantillon.
- P_{1i} : Masse finale de l'échantillon.

D'après les essais réalisés nous avons obtenu les résultats suivants (**tabl II.1**)

Tableau. II.1 Propriété de l'abrasivité.

Parties du gisement	Résultats d'essais, mg
1	3
2	2.5
3	2.7

En comparant ces résultats avec les recommandations de la classification proposée par BARON.L [11, 16,21] nous pouvons dire que les calcaires de la carrière de Hadjare-Soud se rapportent à la première classe, c'est-à-dire d'une très faible abrasivité.

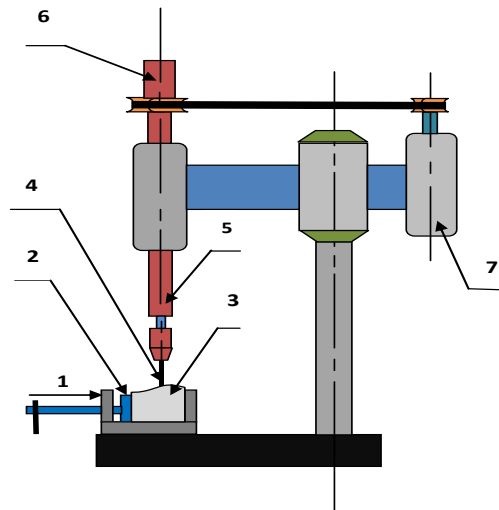


Fig. II.2 Stand pour la détermination de l'abrasivité des roches.

II.1.4. 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 ayant les caractéristiques suivantes :

- ✓ Charge maximale **5000 kgf**.
- ✓ Vitesse du plongeur.

La presse représentée sur la (fig. II.3 a), se compose d'une base (1) où l'on installe tout l'équipement nécessaire et de deux lissières (2) le long desquelles se déplace un plongeur (3). Sur la table supérieure de la presse nous plaçons un échantillon (4) qui est chargé d'une étampe (5) fixée dans un dispositif de serrage (6). L'étampe (fig. II.3 b) est en acier trempé. Lors des essais nous augmentons la charge sur l'étampe jusqu'à la formation d'un poquet dans l'échantillon [1].

L'indice de la résistance à l'empreinte est déterminé à l'aide de la formule suivante:

$$P_k = \frac{\sum F_i}{N \times S_i}; (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (\text{II.3})$$

Où :

- F_i : charge au moment de la formation du poquet; (kgf).
- S_i : aire de la section transversale de l'étampe; (mm^2).
- N : nombre d'essais de chaque échantillon.

D'après les résultats des essais présentés dans le (tabl .II.2) les roches étudiées ont une résistance à l'empreinte moyenne de **105 kgf/mm²**, d'après la classification de BARON L et GLTMAN .L [11, 16,22] ces roches se rapportent à la classe appelée "dureté moyenne".

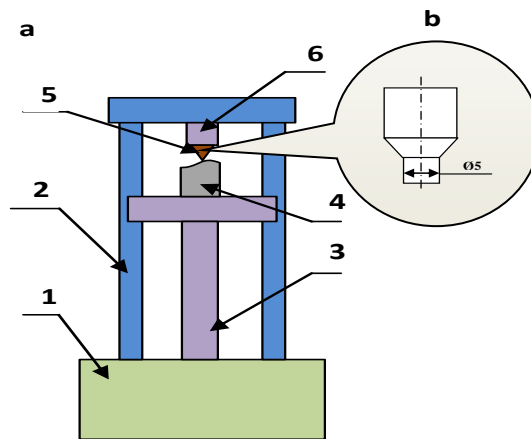


Fig. II.3 Stand pour la détermination de l'indice de la résistance à l'empreinte (a) et l'étampe de mesure (b).

Tableau .II.2. Propriété de la résistance à l'empreinte.

Nature de l'échantillon de calcaire	Nombre d'échantillon à l'essai	N ⁰	Résultats d'essais			
			F ; kgf	S _i ; mm ²	P _k ; kgf/mm ²	\bar{P}_k
Gris	I	1	2000	20.66	100	103
		2	2200	18.78	100	
		3	2000	20.66	110	
	II	1	2500	18.4	125	115
		2	2300	21.9	105	
		3	2100	20	115	
	III	1	2000	20.66	100	103
		2	2200	18.78	100	
		3	2000	20.66	110	
Rougeâtre	I	1	1500	23.11	75	86.6
		2	2000	17.33	85	
		3	1700	20.39	100	
	II	1	2500	20	125	121
		2	2300	21.73	125	
		3	2500	20	115	
	III	1	1500	23.55	75	88
		2	1800	18.27	100	
		3	2000	17.66	90	
Marron-gris	I	1	2000	21	100	105
		2	2000	18.26	100	
		3	2300	21	115	
	II	1	2300	18.84	115	108
		2	2100	20.63	105	
		3	2100	20.63	105	
	III	1	2000	22	100	110
		2	2400	18.33	120	
		3	2200	20	110	

II.2. PRODUCTIVITE DES SONDEUSES ROTO-PERCUTANTES APPLIQUEES DANS LES CARRIERES DE CALCAIRE ALGERIENNES

L'efficacité d'une machine minière peut être caractérisée par quelques paramètres parmi lesquels nous distinguons en premier lieu la productivité. La connaissance de cette dernière pour les machines de forage permet de savoir le volume de forage à réaliser, de faire le choix de la machine dans les conditions concrètes et de planifier la production de l'entreprise.

II.2.1. Méthodes de Détermination de la Productivité des Sondeuses

La productivité des sondeuses dépende de plusieurs facteurs qui pour les sondeuses roto-percutantes, peuvent être divisés en facteurs reflétant :

- Les conditions d'exploitation (propriétés physico-mécaniques des roches, diamètre et profondeur des trous forés).
- La construction des machines en question (puissance des mécanismes d'avancement et de rotation du percuteur, type de l'outil de forage).

En ceux qui caractérisent le degré de l'utilisation des sondeuses pendant le temps. C'est pourquoi il est nécessaire de distinguer la productivité théorique, technique et d'exploitation.

Jusqu'à présent, des nombreuses recherches ont été faites et ont permis d'aboutir à quelques méthodes de détermination de la productivité des sondeuses y compris celles roto-percutantes, la plus répandue [23] est basée sur les suppositions suivantes :

- La productivité théorique correspond à la vitesse mécanique de forage.
- La productivité technique tient compte des pertes de temps qui sont liées à la réalisation des opérations auxiliaires ayant lieu lors du forage du trou, tout en tenant compte de la nécessité d'exercer les opérations préparatoires.

La productivité technique est déterminée d'après la formule [24] :

$$Q_{\text{tech}} = \frac{T - T_{\text{pr}}}{\left(\frac{1}{v_f} + t_{\text{aux}}\right) \times K_{\text{rep}}}; \text{ (m/poste)} \quad (\text{II.4})$$

Où

- t_{aux} : durée des opérations auxiliaires réduites pour un mètre de trou foré; (min/m).
- T_{pr} : durée des opérations préparatoires; (min).
- T : durée d'un poste de travail; (min).
- K_{rep} : coefficient tenant compte de la pause des ouvriers.
- La productivité d'exploitation tient compte des pertes de temps qui portent le caractère fortuit (pannes imprévues des mécanismes de la sondeuse).

La productivité d'exploitation est exprimée par la formule [1]:

$$Q_{\text{exp}} = Q_{\text{tech}} \times K_u ; (\text{m/poste}) \quad (\text{II.5})$$

Où :

- K_u : coefficient d'utilisation de la sondeuse durant un poste.

L'analyse de la méthode exposée de détermination de la productivité des sondeuses montre que celle-ci a quelques inconvénients parmi lesquels nous distinguons :

➤ La division des pertes de temps en deux groupes selon leur caractère (régulier et fortuit) dans certains cas éventuels, exemple remplacement de l'outil de forage. Ces pertes de temps se rapportent aux opérations auxiliaires qui doivent s'effectuer durant chaque poste. Mais dans le cas du forage des trous dans les roches non abrasives, il n'est pas nécessaire de remplacer l'outil de forage assez souvent. Cela veut dire que cette opération portera le caractère aléatoire [1].

➤ Cette méthode ne permet pas d'apprécier séparément le degré de l'influence de la construction de la sondeuse, ou de l'organisation de travail sur le niveau de la productivité.

Afin d'éviter les inconvénients énumérés nous recommandons l'utilisation d'une méthode connue élaborée pour les abatteuses chargeuses [19] pour déterminer la productivité des sondeuses. Comme dans le cas précédent, nous estimons qu'il est nécessaire de distinguer la productivité théorique, technique et d'exploitation et de calculer celle théorique de la façon suivante [19]:

$$Q_{\text{théo}} = V_f ; (\text{m/min}) \quad (\text{II.6})$$

La productivité technique doit tenir compte de l'influence de l'imperfection technique de la sondeuse envisagée sur sa productivité et s'exprime par la formule suivante [1] :

$$Q_{\text{tech}} = 60 \times Q_{\text{théo}} \times K_{\text{tech}} ; (\text{m/h}) \quad (\text{II.7})$$

Où :

- K_{tech} : coefficient de l'imperfection technique de la sondeuse.

$$K_{\text{tech}} = \frac{T_f}{T_f + T_{\text{aux}}} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- T_f : temps de travail productif de la sondeuse pendant un cycle, (min):

$$T_f = \frac{L}{V_f} ; (\text{min}) \quad (\text{II.9})$$

Où :

- L : métrage du trou foré; (m).
- T_{aux} : pertes sommaires de temps à la réalisation des travaux auxiliaires aux temps d'arrêt de la sondeuse à cause de son imperfection [1].

$$T_{aux} = T_{man} + T_{al} + T_{dép} + T_{rep} + T_{remp}; (\text{min}) \quad (\text{II.10})$$

Où :

- T_{man} : temps de manipulation préliminaire avant le forage de chaque trou; (min).
- T_{al} : temps de rallongement et de levage du train des tiges.
- $T_{dép}$: temps de déplacement de la sondeuse au nouveau trou.
- T_{rep} : temps de réparation de la sondeuse; (min).
- T_{remp} : temps de remplacement de l'outil de forage; (min).

Le coefficient technique est déterminé d'après la formule:

$$K_{tech} = \frac{1}{1 + \frac{T_{aux}}{t_f}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{man} + T_{al} + T_{dép} + T_{rep} + T_{remp}}{L} \times V_f} \quad (\text{II.11})$$

Afin d'apprécier l'influence de divers facteurs sur la productivité technique, nous admettons que le coefficient K_{tech} est égal à ;

$$K_{man} = \frac{T_f}{T_f + T_{man}} \quad (\text{II.12})$$

- S'il n'existe que des opérations préliminaires de manipulation.

$$K_{al} = \frac{T_f}{T_f + T_{al}} \quad (\text{II.13})$$

- S'il n'existe que des opérations de rallongement et de levage du train des tiges.

$$K_{dép} = \frac{T_f}{T_f + T_{dép}} \quad (\text{II.14})$$

- S'il n'existe que des opérations de déplacement de la sondeuse au nouvel trou.

$$K_{rep} = \frac{T_f}{T_f + T_{rep}} \quad (\text{II.15})$$

- S'il n'existe que des opérations de réparation de la sondeuse.

$$K_{rem} = \frac{T_f}{T_f + T_{rem}} \quad (\text{II.16})$$

- S'il n'existe que des opérations de remplacement de l'outil de forage.

Après transformation de la formule (II.11) on reçoit l'égalité de K_{tech} suivante:

$$K_{tech} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{K_{man}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{al}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{dép}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{rep}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{rem}} - 1 \right)} \quad (\text{II.17})$$

Examinées en comparant les résultats des essais effectués.

- La productivité d'exploitation dépend du degré d'utilisation des possibilités techniques d'une sondeuse dans les conditions concrètes de l'exploitation [1].

$$Q_{exp} = 60 \times Q_{théo} \times K_{exp}; \text{ (m/h)} \quad (\text{II.18})$$

Où :

- K_{exp} : coefficient tenant compte du travail continu de la sondeuse pendant son exploitation.

$$K_{exp} = \frac{T_f}{T_f + T_{aux} + T_{org}} \quad (\text{II.19})$$

Où:

- T_{org} : pertes de temps à cause de l'organisation du travail;(min).

Dans ce cas il s'agit nécessairement d'exercer les opérations préparatoires (examen superficiel de la sondeuse, graissage) et de l'existence des pertes de temps à cause de l'organisation de travail (repos des ouvriers, manque de front de taille).

Analogiquement nous pouvons écrire [14] :

$$K_{exp} = \frac{1}{1 + \frac{T_{aux} + T_{org}}{T_f}} \quad (\text{II.20})$$

En utilisant la méthode proposée il est possible d'établir l'influence de divers facteurs sur la productivité des machines en question et de faire les propositions visant leur augmentation.

II.2.2. Etude Expérimentale des Facteurs Influant sur la Productivité des Sondeuses Roto- percutantes

En principe, les valeurs de la productivité théorique, technique et d'exploitation peuvent être déterminées à l'aide des calculs correspondants. Par exemple on détermine la vitesse de forage au moyen de la formule connue [27]. Mais cette méthode ne nous permet pas d'avoir des résultats reflétant réellement les capacités des sondeuses [27], vu sa dépendance de certains facteurs qui ne peuvent être précisés que sur le terrain car leur variation est assez grande [26].

Parmi ces facteurs nous pouvons citer les variations des propriétés physico-mécaniques des roches forées, la qualification du personnel desservant la sondeuse ainsi que l'état de l'outil de forage à cause de l'usure. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes proposé de réaliser des expériences visant la détermination des valeurs statistiques des variables entrantes dans formules (II.11) et (II.20).

Une des méthodes permettant de le faire est celle du chronométrage qui suppose la fixation des données caractérisant l'utilisation de telle ou telle sondeuse, à savoir l'heure du commencement et de la fin de chaque opération, nomination de cette dernière, profondeur et métrage de forage. L'exemple d'une carte de chronométrage est présenté dans les (tabl .II.3 et tabl .II.4).

L'ordre de la réalisation du chronométrage doit répondre aux exigences suivantes : véracité, continuité et volume nécessaire des observations. Selon les recommandations [20,25] ce dernier est de deux postes de travail de la sondeuse examinée.

A présent, on utilise dans les carrières de calcaire Algériennes quelques sondeuses travaillant en même temps. Par exemple dans la carrière de Hadjar-Soud ce sont les sondeuses Ingersoll-Rand et Atlas-Copco employées pour le forage de la roche. Pour comparer leur rendement nous avons fait le chronométrage de fonctionnement de chacune d'elles et les résultats obtenus sont représentés dans les (tabl .II.3 et tabl .II.4). L'analyse de ces résultats montre qu'il y a de grandes pertes de temps causées par une mauvaise organisation du travail (environ **60%** de la durée du poste); que pendant le fonctionnement des sondeuses nous n'avons pas enregistré les pertes de temps dues au remplacement de l'outil de forage; cela s'explique par sa longue durée de vie (**plus de 4000m**); qu'il existe une variation des valeurs des vitesses de forage, c'est pourquoi ces dernières sont déterminées par les paramètres des

régimes de forage (force axiale appliquée, vitesse de rotation). Ceux-ci dépendent en premier lieu des performances des sondeuses, de la qualification du personnel et d'autres.

Tableau II.3 Exemple d'une carte de chronométrage de la sondeuse (Ingersoll-Rand).

N°	Temps	Chronométrage	Long. Trou	Sondeuse « INGERSOLL-RAND
1	5h00' - 7h01'	121'	-	Temps perdu
2	7h01' - 7h31'	30'	-	Mise en service (examen, graissage)
3	7h31' - 7h41'	10'	-	Manipulation préliminaire
4	7h41' - 7h54'	13'	3m	Forage
5	7h54' - 7h54'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
6	7h54'30" - 7h57'30"	3'	-	Arrêt de la sondeuse
7	7h57'30" - 8h10'30"	13'	3m	Forage
8	8h10'30" - 8h11'	30"	-	Allongement du train de tiges
9	8h11' - 8h22'	11'	3m	Forage
10	8h22' - 8h22'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
11	8h22'30" - 8h34'	11'30"	3m	Forage
12	8h34' - 8h34'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
13	8h34'30" - 8h47'30"	13'	3m	Forage
14	8h47'30" - 8h50'	2'30"	-	Récupération du train de tiges
15	8h50' - 8h51'30"	1'30"	-	Déplacement de la sondeuse
16	8h51'30" - 8h54'	2'30"	-	Manipulation préliminaire
17	8h54' - 9h07'30"	13'30"	3m	Forage
18	9h07'30" - 9h08'	30"	-	Allongement du train de tiges
19	9h08' - 9h19'30"	11'30"	3m	Forage
20	9h19'30" - 9h20'	30"	-	Allongement du train de tiges
21	9h20' - 9h31'30"	11'30"	3m	Forage
22	9h31'30" - 9h32'	30"	-	Allongement du train de tiges
23	9h32' - 9h43'30"	11'30"	3m	Forage
24	9h43'30" - 9h44'	30"	-	Allongement du train de tiges
25	9h44' - 9h55'30"	11'30"	3m	Forage
26	9h55'30" - 9h58'30"	3'	-	Récupération du train de tiges

(Suite du Tableau II.3): Exemple d'une carte de chronométrage de la sondeuse
(Ingersoll-Rand).

27	9h58'30" - 10h	1'30"	-	Déplacement de la sondeuse
28	10h' - 10h1'	1'	-	Manipulation préliminaire
29	10h1' - 10h11'	10'	3m	Forage
30	10h11' - 10h11'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
31	10h11'30" - 10h23'	11'30"	3m	Forage
32	10h23' - 10h23'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
33	10h23'30" - 10h36'	12'30"	3m	Forage
34	10h36' - 10h36'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
35	10h36'30" - 10h46'30"	10'	3m	Forage
36	10h46'30" - 10h47'	30"	-	Allongement du train de tiges
37	10h47' - 10h58'30"	11'30"	3m	Forage
38	10h58'30" - 11h1'	2'30"	-	Récupération du train de tiges
39	11h1' - 11h2'	1'	-	Déplacement de la sondeuse
40	11h2' - 11h3'	1'	-	Manipulation préliminaire
41	11h3' - 11h4'	1'	-	Réparation de la sondeuse
42	11h4' - 11h12'30"	8'30"	3m	Forage
43	11h12'30" - 11h13'	30"	-	Allongement du train de tiges
44	11h13' - 11h23'	10'	3m	Forage
45	11 h23' - 11h23'30"	30"	-	Allongement du train de tiges
46	11h23'30" - 11h35'30"	12'	3m	Forage
47	11h35'30" - 11h36'	30"	-	Allongement du train de tiges
48	11h36' - 11h49'30"	13'30"	3m	Forage
49	11h49'30" - 11h50'	30"	-	Allongement du train de tiges
50	11h50' - 12h2'	12'	3m	Forage
51	12h2' - 12h5'	3'	-	Récupération du train de tiges
53	12h5' - 12h13'	55'	-	Temps de repos

Tableau II.4: Exemple d'une carte de chronométrage de la Sondeuse (ATLAS-COPCO).

N°	Temps	Chronométrage	Long. Trou	Sondeuse «ATLAS-COPCO»
1	5h00' - 7h01'	134'	-	Temps perdu
2	7h01' - 7h31'	30'	-	Mise en service (examen, graissage)
3	7h31' - 7h41'	7'	-	Manipulation préliminaire
4	7h41' - 7h54'	7'	3m	Forage
5	7h54' - 7h54'30"	31"	-	Allongement du train de tiges
6	7h54'30" - 7h57'30"	4'	-	Arrêt de la sondeuse
7	7h57'30" - 8h10'30"	16'	3m	Forage
8	8h10'30" - 8h11'	32"	-	Allongement du train de tiges
9	8h11' - 8h22'	5'	3m	Forage
10	8h22' - 8h22'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
11	8h22'30" - 8h34'	5'30"	3m	Forage
12	8h34' - 8h34'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
13	8h34'30" - 8h47'30"	7'	3m	Forage
14	8h47'30" - 8h50'	2'39"	-	Récupération du train de tiges
15	8h50' - 8h51'30"	2'30"	-	Déplacement de la sondeuse
16	8h51'30" - 8h54'	1'	-	Manipulation préliminaire
17	8h54' - 9h07'30"	18'30"	3m	Forage
18	9h07'30" - 9h08'	10"	-	Allongement du train de tiges
19	9h08' - 9h19'30"	5'30"	3m	Forage
20	9h19'30" - 9h20'	10"	-	Allongement du train de tiges
21	9h20' - 9h31'30"	5'30"	3m	Forage
22	9h31'30" - 9h32'	10"	-	Allongement du train de tiges
23	9h32' - 9h43'30"	5'30"	3m	Forage
24	9h43'30" - 9h44'	10"	-	Allongement du train de tiges
25	9h44' - 9h55'30"	5'30"	3m	Forage
26	9h55'30" - 9h58'30"	1'	-	Récupération du train de tiges
27	9h58'30" - 10h	30"	-	Déplacement de la sondeuse

(Suite du Tableau II.4): Exemple d'une carte de chronométrage de la Sondeuse (ATLAS-COPCO).

28	10h' - 10h1'	20"	-	Manipulation préliminaire
29	10h1' - 10h11'	5'	3m	Forage
30	10h11' - 10h11'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
31	10h11'30" - 10h23'	5'30"	3m	Forage
32	10h23' - 10h23'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
33	10h23'30" - 10h36'	6'30"	3m	Forage
34	10h36' - 10h36'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
35	10h36'30" - 10h46'30"	4'	3m	Forage
36	10h46'30" - 10h47'	10"	-	Allongement du train de tiges
37	10h47' - 10h58'30"	5'30"	3m	Forage
38	10h58'30" - 11h1'	1'	-	Récupération du train de tiges
39	11h1' - 11h2'	30"	-	Déplacement de la sondeuse
40	11h2' - 11h3'	30"	-	Manipulation préliminaire
41	11h3' - 11h4'	5'	-	Réparation de la sondeuse
42	11h4' - 11h12'30"	3'	3m	Forage
43	11h12'30" - 11h13'	9"	-	Allongement du train de tiges
44	11h13' - 11h23'	4'	3m	Forage
45	11h23' - 11h23'30"	10"	-	Allongement du train de tiges
46	11h23'30" - 11h35'30"	6'	3m	Forage
47	11h35'30" - 11h36'	10"	-	Allongement du train de tiges
48	11h36' - 11h49'30"	7'30"	3m	Forage
49	11h49'30" - 11h50'	10"	-	Allongement du train de tiges
50	11h50' - 12h2'	6'	3m	Forage
51	12h2' - 12h5'	1'	-	Récupération du train de tiges
52	12h5' - 12h13'	33'	-	Temps de repos

Tableau II.5 Généralisation des résultats de chronométrage.

N°	INDICES	Désignation	INGERSOLL-RAND			ATLAS-COPCO		
			1 ^{er} Poste	2 ^{ème} Poste	Valeur moyenne	1 ^{er} Poste	2 ^{ème} Poste	Valeur moyenne
I	Travaux d'organisation	T_{org}	206'	240'	223'	199'	273'	236'
I.1	Mise en service	T_{ser}	30'		15'	30'		15'
I.2	Déplacement préliminaire	T_{dep}				30'		15'
I.3	Repos des travailleurs	T_{rep}	55'	60'	57'30''	67'		35'30''
I.4	D'autres	T_{aut}	121'	180'	150'30''	72'	273'	172'30''
	Total							
II	Travaux auxiliaires	T_{aux}	42'	60'	51'	54'	34'	44'
II.1	Manipulations préliminaires	T_{man}	14'30''	20'	17'15''	15'	14'	14'30''
II.2	Allongement, Levage de tige	T_{al}	19'30''	25'	22'15''	18'	16'	17'
II.3	Déplacement d'un trou à l'autre	T_{dép}	4'	8'	6'	6'	4'	5'
II.4	Réparation de la sondeuse	T_{rep}	4'	7'	6'	5'30''	15'	10'15''
II.5	Remplacement de l'outil	T_{remp}						
	Total							
III	Travaux de forage							
III.1	Forage	T_f	232'	180'	206'	227'	173'	200'
	Total							
	Profondeur totale des trous forés, (m)	L	60	45	52,5	51	39	45
	Vitesse de forage, (m/min)	V_f	0.258	0.25	0.255	0.224	0.225	0.225

Les résultats de calcul obtenus à l'aide des formules (II.11) et (II.20) sont indiqués dans le (Tab1.II.6).

Tableau. II.6 Résultats des calculs des productivités.

	V_f m/min	K_{man}	K_{al}	K_{dep}	K_{remp}	K_{rep}	K_{tech}	Q_{tech} m/h	K_{exp}	Q_{exp} m/h
Ingersoll-Rand	0.255	0.92	0.90	0.97	1.0	0.97	0.80	12.24	0.43	5.26
Atlas-Copco	0.225	0.93	0.92	0.98	1.0	0.97	0.82	11.07	0.42	4.64

A partir du tableau ci-dessus, nous remarquons que malgré l'imperfection technique à la sondeuse Ingersoll-Rand, ce qui est confirmé par les valeurs des coefficients (K_{man} , K_{al} , K_{dep} , K_{rep} , K_{tech}), la sondeuse Ingersoll-Rand assure une plus grande productivité technique que sondeuse Atlas-Copco. Cela s'explique par la possibilité d'obtenir dans le premier cas une grande vitesse de forage, qui en même temps détermine une plus grande productivité d'exploitation. Tout cela est affirmé par les courbes de dépendance $Q_{théo} = f(V_f)$, $Q_{tech} = f(V_f)$, et $Q_{exp} = f(V_f)$ tracées en supposant qu'il est possible de changer la vitesse de forage (fig.II.3).

Cela nous permet de conclure :

✓ La productivité des sondeuses dépend en premier lieu des paramètres du régime de forage parce que ces derniers déterminent la valeur de la vitesse de forage [29].

✓ L'étude des courbes présentées aboutit à une recommandation sur l'amélioration de l'organisation de travail, ce qui nous donne la possibilité d'augmenter la productivité d'exploitation des sondeuses.

✓ L'augmentation de la vitesse de forage et l'amélioration de l'organisation du travail permettent la diminution du nombre des sondeuses utilisées et de perfectionner les indices technico-économiques des carrières [29,30].

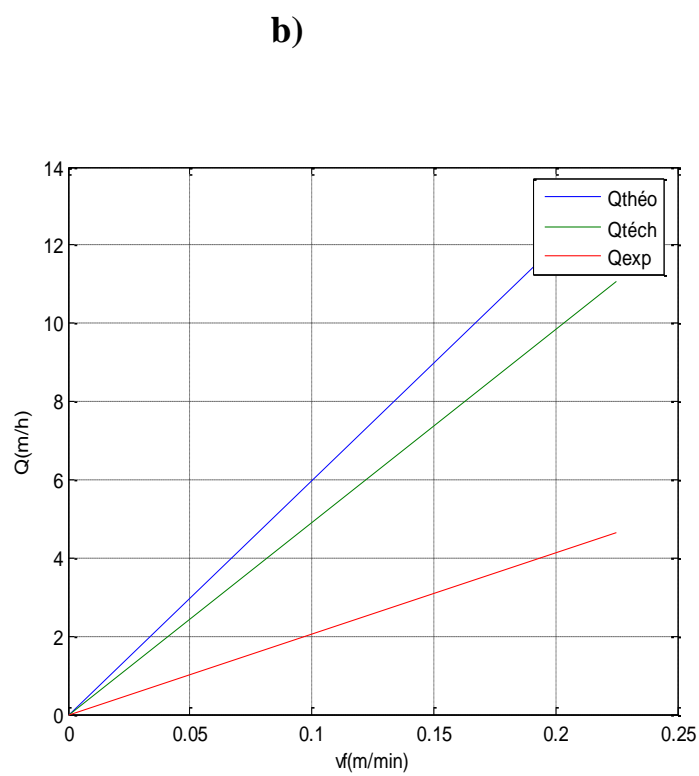
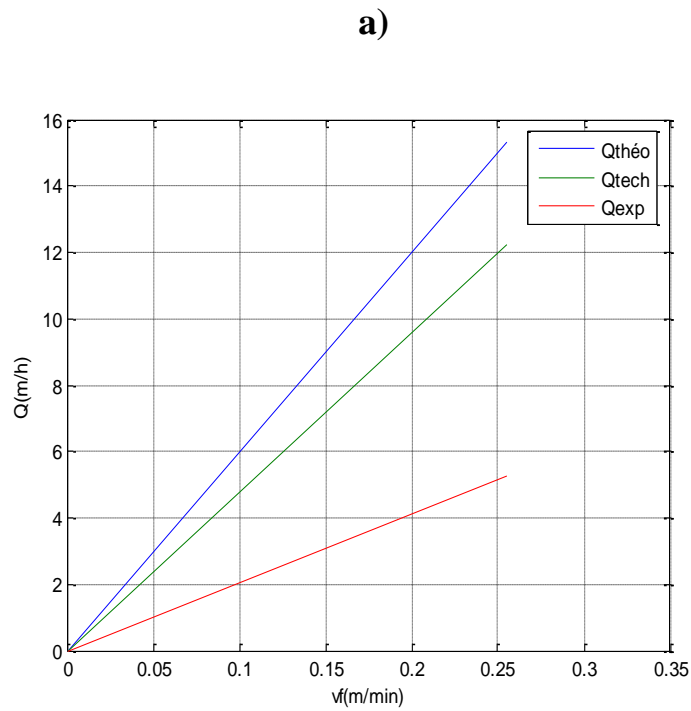


Fig. II.4 Dépendance des productivités $Q_{théo}$, Q_{tech} , Q_{exp} , en fonction de la vitesse de forage, (a) Ingersoll-Rand, (b) Atlas-Copco.

CONCLUSION

1- L'analyse des sources bibliographiques montre que parmi les propriétés physico-mécaniques des roches, la résistance à l'empreinte et l'abrasivité influent principalement sur le choix du régime de fonctionnement des machines de forage y compris les sondeuses roto-percutantes.

2- L'analyse des valeurs de la résistance à l'empreinte et l'abrasivité au laboratoire, pour calcaires de Hadjar-Soud montre l'inexistence d'une grande variation de ces deux paramètres.

Ces calcaires se rapportent à la classe de dureté moyenne ($P_k = 105 \text{ kgf}$) et non abrasifs ($a = 2.7 \text{ mg}$).

3- L'étude des formules de détermination des productivités des sondeuses a permis choisir, pour les conditions des carrières Algériennes celle qui prévoit l'utilisation de toutes pertes de temps susceptibles d'être relevées durant le fonctionnement.

4- L'étude du travail des sondeuses Ingersoll-Rand et Atlas-Copco au moyen du chronométrage permet de conclure qu'il est nécessaire d'améliorer l'organisation de travail et choisir les paramètres des régimes de travail déterminant la vitesse de forage.

Chapitre III

Paramètres Essentiels de L'organe de Travail

INTRODUCTION

Le fonctionnement des machines de forage et particulièrement roto-percutantes se réalise sous l'influence des conditions extérieures qui varient d'une façon aléatoire [31,32].

Le réglage de la machine de forage est effectué par la variation des paramètres du régime de travail. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître les dépendances entre ces paramètres et les facteurs extérieurs. En outre les paramètres des régimes de travail de la machine de forage doivent être coordonnés avec les facteurs caractérisant les travaux de tir [33], et dans ce sens on va élaborer la particularité de l'interaction de l'outil à pastillé avec la roche.

III.1. PRINCIPE DU CHOIX DES OUTILS

Les terrains traversés par le forage présentent une grande variété de dureté ou plutôt de forabilité. Pour détruire des roches ayant de telles différences de forabilité, les outils utilisés procéderont suivant des principes différents [34].

Les outils pour terrains tendres doivent avoir des dents effilées pour pénétrer profondément dans la roche et un mouvement de "ripage" important pour enlever le maximum de terrain [34,35].

Les outils pour terrains durs doivent avoir des dents courtes et robustes, que l'on pourra charger avec des poids importants pour éclater la roche [36].

Pour ces outils, le ripage est inutile et même invisible car il ne pourrait que provoquer une usure prématurée de la tranchante du taillant par frottement sec des roches forées [36].

Pour les terrains tendres, mi-tendres et mi-durs, les outils les plus utilisés sont les trépons [35].

III.2. LES DIFFERENTS TYPES DES OUTILS DE FORAGE

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains [16]. Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser. Les outils de forge se distinguent par le mode de destruction des roches, il se divise en [37]:

III.2.1. Les Outils à Molettes

Le tricône (outil à trois molettes) est le plus utilisé. Les éléments de coupe font partie de la molette, ce sont [38]:

- ✓ Des dents usinées dans le cône.
- ✓ Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône.

Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures. Mais les outils à dents ne pouvaient ne forer que quelques mètres avec une vitesse

d'avancement faible. Les picots de carbure et les paliers de friction ont permis d'appliquer des poids de plus en plus importants sur l'outil et d'augmenter la durée de vie des outils dans les formations dures (la durée de vie de ces outils est pratiquement trois fois plus longue que celle des outils à dents et à roulement à rouleaux) [38].

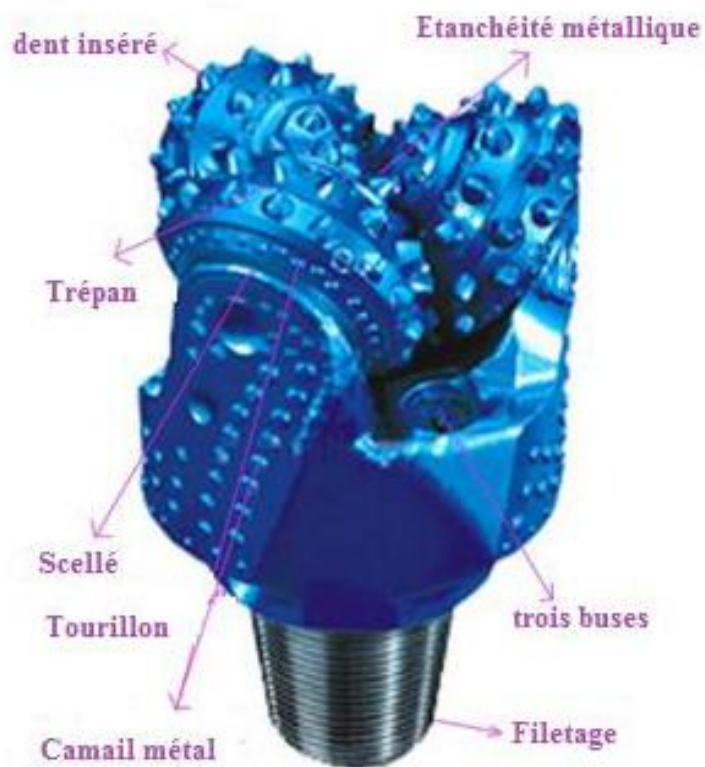


Fig. III.1 Les outils à molettes (tricône) [37].

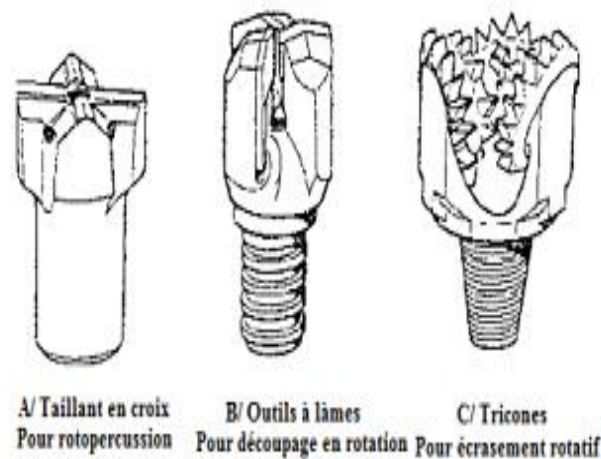


Fig. III.2 L'objectif des outils à molettes [39].

A. Classification des Outils à Molettes

La grande variété de fabrication des outils à molettes a rendu nécessaire l'établissement d'une normalisation. Cette classification regroupe entre eux l'ensemble des constructeurs et normalise les caractéristiques de chaque outil à molettes [40].

La première classification a été réalisée en **1972** par l'IADC (International Association of Drilling Contractors) dans le but d'éliminer toute confusion provenant des différents systèmes de codage utilisés par les fabricants [40,41].

La classification IADC actuellement en vigueur date de **1987** et comprend quatre caractères (3 chiffres et une lettre). L'adjonction d'une lettre à l'ancien code IADC apporte un complément d'information sur les caractéristiques de l'outil [37, 38,39].

Premier chiffre : Il renseigne sur la nature des éléments de taille (dents en acier ou picots de carbure), sur la dureté, l'abrasivité et la résistance à la compression des terrains que l'on peut forer avec l'outil. Les chiffres **1, 2, 3** caractérisent les outils à dents en acier et correspondent à des duretés de terrains croissantes [37]. Les chiffres **4, 5, 6, 7** et **8** caractérisent les outils à picots en carbure de tungstène et correspondent également à des duretés de terrains croissantes.

Deuxième chiffre : Les chiffres **1, 2, 3** et **4** définissent une sous-classification de la dureté des formations dans chacune des **8** classes déterminées par le premier chiffre (**1** indique une formation tendre tandis que **4** indique une formation dure) [37].

Troisième chiffre : Les chiffres **1** à **7** définissent le type de roulement utilisé et précisent la présence ou l'absence de protections par pastilles en carbure de tungstène sur les bords d'attaque des molettes [38]:

- 1 : Roulements à rouleaux non étanches et sans pastilles de protection,
- 2 : Roulements à rouleaux non étanches et sans pastilles de protection pour le forage à l'air,
- 3 : Roulements à rouleaux non étanches avec pastilles de protection des molettes,
- 4 : Roulements à rouleaux étanches sans pastilles de protection des molettes,
- 5 : Roulements à rouleaux étanches et avec pastilles de protection des molettes,
- 6 : Paliers lisses étanches et sans pastilles de protection des molettes,
- 7 : Paliers lisses étanches avec pastilles de protection des molettes.

III.2.2 Les Outils Diamants

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc, des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot [42].

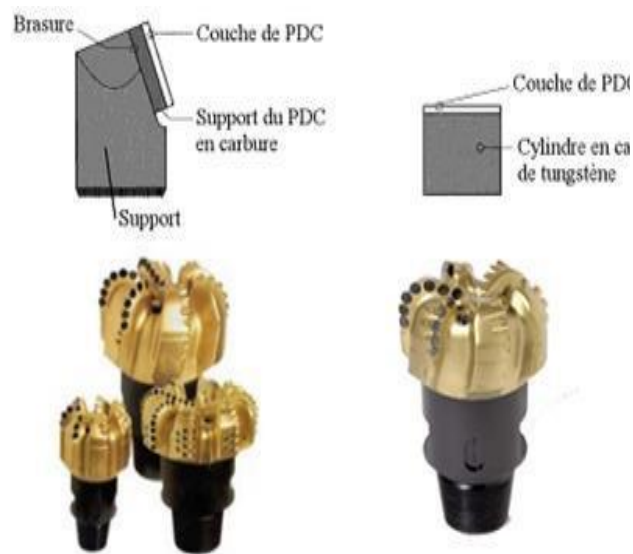


Fig. III.3 Les outils à diamant [37].

A. Le Diamant Naturel

C'est une cristallisation du carbure de densité **3.52**. Du point de vue chimique le diamant et le graphite sont identiques. Alors que du point de vue physique, ils sont totalement contradictoires. Le graphite est fragile, noir et faible souvent utilisé comme lubrifiant [37,38].

Le diamant par contre est extrêmement dur meilleur conducteur thermique hautement abrasif; la plupart du temps transparent, il est aussi un excellent isolant (**tabl. III.1**) [37].

Tableau. III.1 Caractéristiques principales du diamant naturel [37].

Caractéristiques	Unité	Diamant	PDC	Carbure tungstène	Acier
Dureté	Kg/mm ²	6000-9000	5000-8000	1475	558
Résistance à la Compression	10 ³ psi	1260	890	780	238
Conductivité thermique (25°)	W/cm.C°	5.2	4.3	1.00	0.48
Densité	g/cm ³	3.25	3-3.25	14.95	785
Point de fusion	C°	3650	-	2860	1530
Résistance à l'écrasement	Bars	80000	-	50000	15000
Module de Young	106 psi	105-152	132	92	29

Le diamant est le matériau le plus dur et a des caractéristiques supérieures parmi les matériaux que l'on connait. Pour cela, c'est l'élément essentiel dans l'outil de forage qui résiste aux conditions de fond (haute température et haute pression) [37].

B. Diamant Synthétique

Ce type d'outil est divisé en trois familles :

B.1. Les Outils PDC

Les outils à pastilles de diamants poly cristallins existent soit avec corps acier, soit avec matrice. Les corps en acier sont usinés puis recouverts de carbure de tungstène pour limiter l'érosion. Les corps en matrice sont fabriqués à partir du même matériau au carbure de tungstène que les outils aux diamants naturels [43].

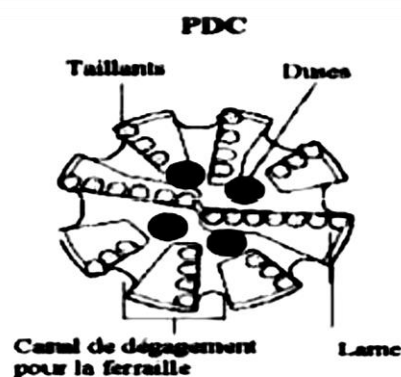


Fig. III.4 Outil PDC [37].

B.2. Corps en Acier (Steel Body)

Le corps est en acier monobloc obtenu par usinage. Ces outils ont des taillants PDC sertis directement dans le corps sans brasage. Le diamètre est protégé par des barres en carbure de tungstène sur toute la hauteur de la jupe extérieure [37]. Pour réduire le phénomène d'érosion du corps, la surface d'attaque de l'outil est protégée par une métallisation dure [44]. Ce type d'outils offre la possibilité d'utiliser toute la surface du taillant, étant donné qu'il est entièrement exposé, et de remplacer les taillants après utilisation s'il n'y a pas eu érosion du corps. Par contre, les taillants ne peuvent pas supporter un torque important et se cassent à la base du corps [38].



Fig. III.5 Outil PDC Steel Body [37, 38].

B.3. Corps en Carbure de Tungstène (Matrix Body)

Le corps en deux parties soudées a une âme en acier et une matrice en carbure de tungstène. Ces outils ont des taillants cylindriques brasés directement dans un évidage dans le corps, qui en plus, les protège contre les chocs [37,38]. Ainsi, ils peuvent travailler avec des torques très importants [44].



Fig. III.6 Outil PDC Matrix body [5].

III.3. PROCESSUS DE DESTRUCTION DE LA ROCHE PAR LES MACHINES DE FORAGE ROTO-PERCUTANTES

Pour atteindre le but de ce chapitre nous proposons le schéma de description du processus de destruction de la roche (**fig. III.7**) selon lequel l'ensemble des facteurs est divisé en :

✓ Paramètres d'entrée, l'ensemble des indices ($/X/ = x_1, x_2, \dots, x_n$) caractérisant la roche comme objet de destruction (résistance à l'empreinte, abrasivité, etc...). Les valeurs de cet ensemble sont généralement comprises dans les limites ($X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}$) et peuvent être représentées par les caractéristiques statistiques [1].

✓ Paramètres des travaux de tir ($/T/ = t_1, t_2, \dots, t_m$) qui reflètent l'influence du diamètre, de la distance entre les trous, du type d'outil et de la quantité d'explosif sur l'efficacité du processus de destruction de la roche de sortie. Les travaux de tir se présentent comme données de départ ou bien limites technologiques [1].

✓ Indices qui caractérisent l'organisation de travail ($/S/ = s_1, s_2, \dots, s_n$) par exemple le coefficient d'utilisation de la machine, temps de réalisation des travaux préparatoires et auxiliaires [4].

✓ Paramètres de réglage ($/Z/ = z_1, z_2, \dots, z_n$) caractérisant les capacités techniques de la machine de forage, ces paramètres peuvent être divisés en : limites techniques $/Y/$ (puissance de la commande, force et vitesse d'avancement maximales de l'outil) qui sont défini lors de la construction de la machine et en action de réglage $/X/$ (vitesse de rotation et d'avancement, force axiale) qui peuvent être variées pendant le travail ou bien lors de la préparation.

Le but de la recherche aboutit à des régularités de la variation des actions de réglage [2].

✓ Paramètres de sortie ($/W/ = w_1, w_2, \dots, w_n$) caractérisant les résultats du processus de destruction de la roche (productivité, diamètre moyen du morceau de la roche abattue, prix de revient d'un mètre du trou foré, prix du revient d'un mètre cube de la roche abattue, dépenses totales, dépenses réduites, consommation d'énergie et de l'outil de forage, etc...). Lors de la détermination des paramètres du processus de destruction ces paramètres jouent le rôle des fonctions de base [1, 2,45].

Le schéma proposé peut être utilisé lors de la résolution des problèmes suivants :

✓ Etablissement des relations entre les paramètres de sortie et d'entrée $/W/ = \varphi_1(x)$ avec $/Z = \text{const}, T = \text{const}, S = \text{const}/$. Par exemple en détermine la productivité de la machine de forage dans diverses conditions d'exploitation [1, 2,4].

✓ Détermination de la corrélation entre les paramètres de sortie et de réglage; $/W/ = \varphi_2(z)$ avec $/X=const, T=const, S=const/$. Par exemple étudier l'influence de la vitesse de rotation et de la force axiale sur la consommation spécifique de l'outil [4, 5].

✓ Etude de l'influence des paramètres des travaux de tir sur les paramètres de sortie $/W/ = \varphi_3(z)$ avec $/X=const, Z=const, T=const/$. Par exemple déterminer la productivité d'exploitation de la machine de forage en fonction des indices de l'organisation du travail.

✓ Etablissement des relations entre les paramètres de sortie et le reste des $\varphi_4/X/, /Z/, /T/, /S/$. Malgré la complexité du problème cette méthode nous permet de trouver la solution optimale [1, 2].

Ainsi le schéma proposé permet d'analyser l'influence de tous les facteurs sur le processus de destruction de la roche par les machines de forage roto-percutant.

Parfois, il est possible de se limiter à la considération d'un des problèmes énumérés. Si par exemple, nous exploitons une sondeuse déterminée dans les conditions des roches homogènes, le problème qui se pose consiste à augmenter sa productivité ou bien d'améliorer d'autre indices technico-économiques. C'est pourquoi, dans ce cas, nous nous limitons à l'établissement de la corrélation entre un paramètre de sortie choisi préalablement et les paramètres de réglages [46].

Pour les sondeuses roto percutantes, en qualité de paramètres de réglage nous prenons la vitesse de rotation, la force axiale appliquée et parfois l'énergie et la fréquence de chocs.

Ainsi le problème de formule sous la forme suivante [46] :

$$/W_1/ \varphi_2(z_1, z_2, z_3, z_4) \text{ avec } /X= const, T=const, S=const)$$

Où :

- W_1 : paramètre de sortie choisi.
- $Z_1 = n$: vitesse de rotation de l'outil de forage.
- $Z_2 = p$: force axiale appliquée à l'outil de forage.
- $Z_3 = a, Z_4 = n_c$: respectivement l'énergie et la fréquence de chocs.

En qualité de paramètre de sortie, il est préférable d'utiliser l'indice du prix de revient d'un mètre foré (**Chapitre IV**), reflétant assez complètement les performances de telle ou telle sondeuse. Mais, nous pouvons prouver que cet indice est proportionnel à la vitesse de forage et par conséquent à la hauteur de pénétration de l'outil dans la roche durant un tour de ce dernier [47, 48].

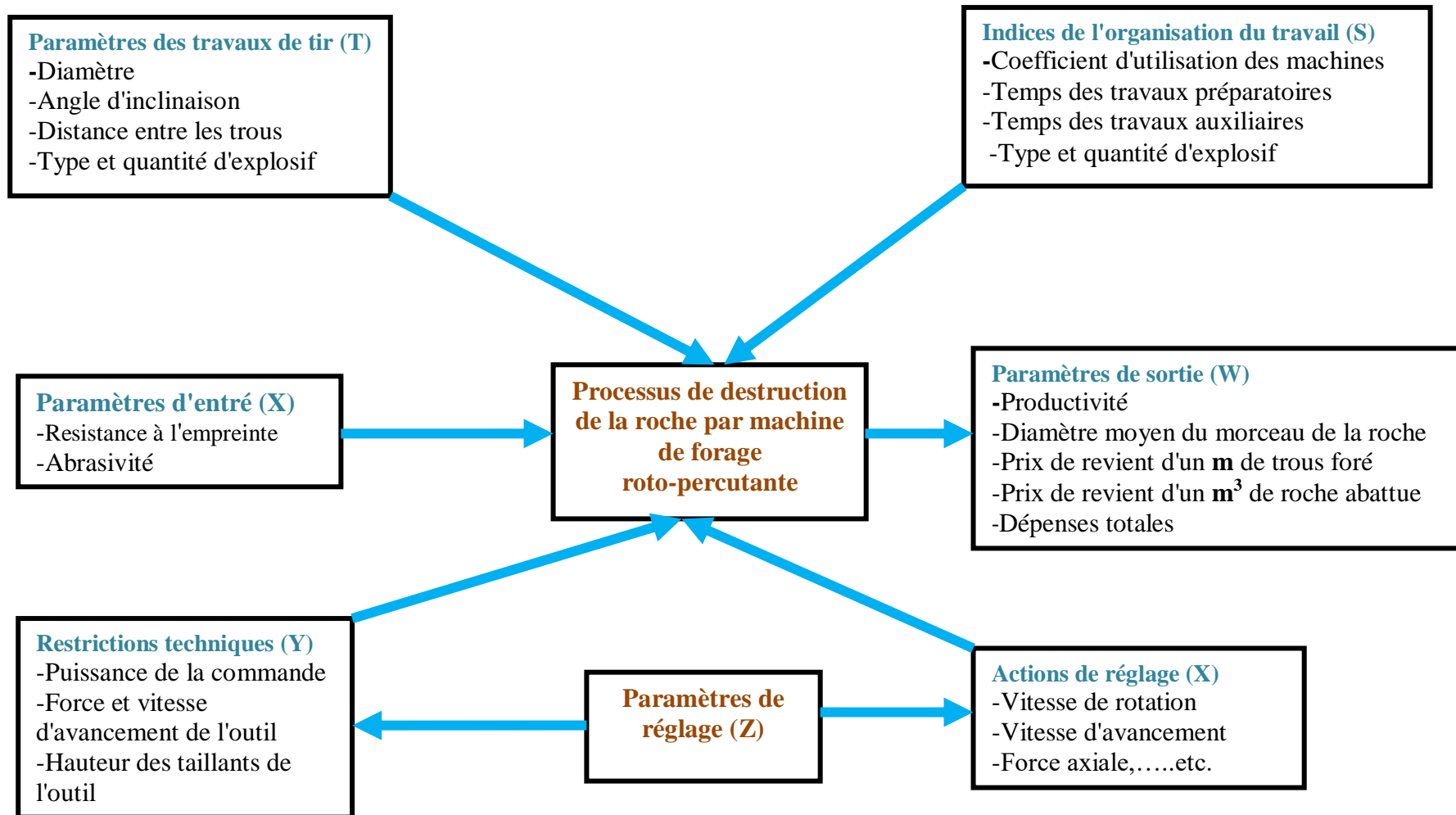


Fig. III.7 Schéma principale du processus de destruction de la roche par les machines de forage roto-percutantes [1].

Ainsi le problème en question se transforme sous la forme suivante :

$$/h/ = \varphi_r / n, P, A, n_c/$$

Où :

- h : hauteur de la pénétration de l'outil dans la roche durant un tour.

La corrélation établie donnera la possibilité de déterminer les paramètres rationnels de réglage.

III.4. PARTICULARITE DE L'INTERACTION DE L'OUTIL DE FORAGE A PASTILLES AVEC LA ROCHE

La possibilité de la machine de forage à détruire la roche de dureté déterminée, dépend avant tout du type de l'outil employé [4].

Lors du forage des roches par sondeuses roto percutantes, ceux sont les couronnes amovibles armées d'alliage métallo céramique dur contenant du carbure de tungstène et le cobalt qui ont trouvées une large application [4,35].

Les couronnes de forage existantes sont classées d'après la forme des éléments écrasants. Il existe les couronnes à lames et à pastilles. Les couronnes à lames s'affûtent sous l'angle de $90 \div 120^\circ$ en fonction de la dureté des roches et exigent un affûtage périodique, en supportant $10 \div 15$ affûtages au fur et à mesure de l'éroussement. Le deuxième type de couronnes est réalisé sous la forme de bout plat et est armé de pastilles cylindriques ayant la surface de travail sphérique. L'expérience montre que la durée de vie de ces couronnes est **1.5÷2 fois** plus que celle des couronnes à lames [35].

Cependant comme nous l'avons indiqué ci-dessus, on avait étudié plus en détail les Particularités de l'interaction de l'outil de forage à lame avec la roche. Sur cette base on propose les formules permettant de déterminer la vitesse de forage et d'autres paramètres caractérisant le processus envisagé [29,35].

A notre connaissance dans la bibliographie existante, il manque jusqu'à présent des recommandations dont l'utilisation pourrait nous déterminer les indices analogiques pour les couronnes à pastilles, ce qui ne donne pas la possibilité de déterminer leur régime rationnel de travail. C'est pourquoi dans le travail présenté nous faisons une tentative d'étudier certaines particularités de l'interaction des couronnes à pastilles avec la roche et de proposer sur cette base les relations permettant de déterminer la profondeur de pénétration de l'outil dans la roche (vitesse de forage) en fonction des propriétés physico- mécaniques de la roche, des paramètres géométriques de l'outil et ceux du régime de travail.

Il est évident que les valeurs qui nous intéressent dépendent de la construction de l'outil de forage, à savoir du schéma de disposition des pastilles. Sur la (**fig. III.8 a**), nous avons représenté graphiquement la disposition géométrique de l'ensemble des pastilles sur l'outil de la sondeuse Ingersoll-Rand.

Pas de découpage **-t** (distance entre les sommets disposés dans les lignes de découpage voisines).

✓ Distance angulaire **-f** (distances entre les deux sommets dans la même ligne de découpage).

✓ Nombre de pastilles dans une ligne de découpage **-m**.

Le travail des pastilles (schéma de destruction) lors du forage est représenté graphiquement sur la (**fig. III.8**). Au cours de ce dernier nous avons considéré que la pénétration des pastilles n'a lieu qu'au moment du choc. Cette considération se confirme par les résultats soulignés dans le chapitre I d'une part et de l'autre part par nos observations dans les conditions réelles d'exploitation (**chapitre IV**).

Le paramètre essentiel caractérisant le schéma de destruction de la roche et l'épaisseur du copeau **-h**. Dans le régime stable, ce dernier dépend du nombre de pastilles dans une ligne de découpage. Avec cela, l'épaisseur du copeau est déterminée par corrélation entre la vitesse de rotation de l'outil et la fréquence de chocs portés [8].

Il est également évident que la profondeur de pénétration dépend des propriétés physico-mécaniques des roches à abattre, des paramètres géométriques des pastilles et de l'énergie d'un choc [35].

Pour l'établissement des régularités d'interaction des pastilles de différents paramètres géométriques avec la roche, nous avons effectué des essais expérimentaux sur un stand gravitationnel représenté sur la (**fig. III.9**).

Ce stand se compose principalement d'un bâti (1) sur lequel nous avons fixé un tube (2) servant de guide et un dispositif de serrage (3) de l'échantillon (4) ayant deux surfaces plates. A l'intérieur du dispositif de guidage nous avons placé une charge (5) sur laquelle nous avons fixé alternativement des billes d'acier [2] de diamètre respectivement **9.5mm** et **14mm**. Les dimensions des billes sont conformes aux paramètres géométriques des couronnes de forage des sondeuses étudiées.

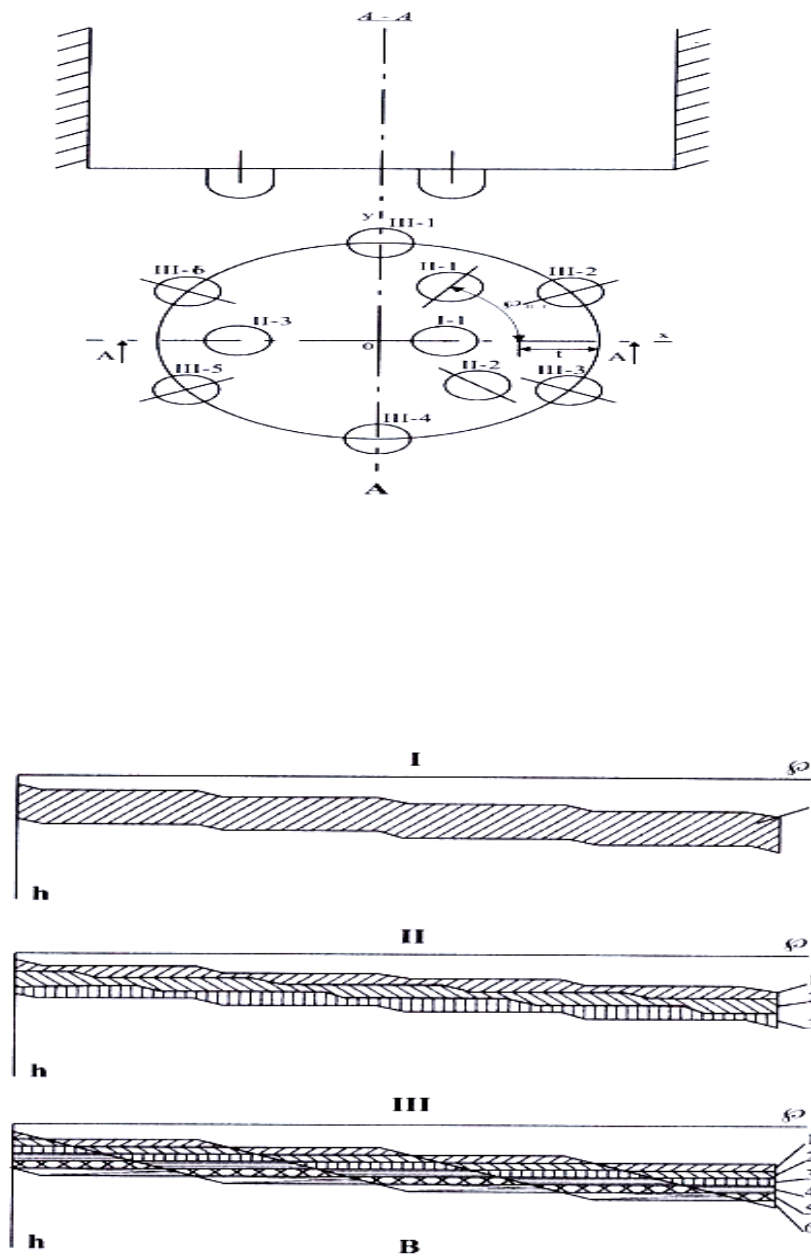


Fig. III.8 Schémas de destruction de la roche par l'outil à pastilles [35].

Quant à la roche, nous avons pris le calcaire de la carrière de Hadjar-Soud dont la résistance à l'empreinte est égale à **105 kfg/mm²** et l'abrasivité de **2.7 mg**. Lors des essais, la charge est soulevée à une certaine hauteur et puis relâchée, elle descend sous l'action de son propre poids. Ainsi la bille s'enfonce dans la roche à une profondeur **-h**.

Le changement de l'énergie $-A$, s'effectue par la variation de la hauteur de levage de la charge [4].

$$A = m \times g \times h, \text{ (kgf.m)} \quad \text{(III.1)}$$

Où :

- m : masse de la charge tombante, (kg).
- g : accélération de la pesanteur, (kgf/kg).
- h : hauteur de levage de la charge, (m).

Pour chaque valeur de l'énergie de choc quatre essais ont été effectués, chaque fois dans une superficie vierge. Après cela en utilisant le micromètre, nous avons mesuré la profondeur de pénétration des billes. Les résultats de mesure sont présentés dans le (tab1. III.2).

Tableau. III.2 Résultats de recherche expérimentale de la dépendance $h = f(A)$.

A	d = 9.5mm					d = 14mm				
Kgf.m	h_1 , mm	h_2 , mm	h_3 , mm	h_4 , mm	\bar{h} , mm	h_1 , mm	h_2 , mm	h_3 , mm	h_4 , mm	\bar{h} , mm
0.25	0.30	0.31	0.33	0.34	0.32	0.23	0.22	0.20	0.26	0.23
0.5	0.52	0.53	0.50	0.51	0.51	0.47	0.50	0.43	0.42	0.46
0.75	0.63	0.63	0.63	0.65	0.64	0.48	0.48	0.44	0.45	0.46

Afin de déterminer la forme des courbes obtenues, nous avons fait le traitement statistique correspond aux résultats expérimentaux. Comme nous le remarquons dans la (fig. III.8 b); la relation entre la profondeur de pénétration et l'énergie d'un choc à une allure parabolique de la forme [4]:

$$h = a + bA + cA^2 \quad \text{(III.2)}$$

Les coefficients a , b et c peuvent être déterminés de la manière suivante; en utilisant les données du (tabl. III.2) on écrit :

$$h_1 = a + b \times 0.25 + c \times 0.25^2$$

$$h_2 = a + b \times 0.5 + c \times 0.5^2$$

$$h_3 = a + b \times 0.75 + c \times 0.75^2$$

Si nous prenons :

$$h_2 - h_1 = b \times 0.25 + c \times 0.1875$$

$$h_3 - h_2 = b \times 0.25 + c \times 0.3125$$

Nous calculons le déterminant :

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0.25 & 0.1875 \\ 0.25 & 0.3125 \end{vmatrix} = 0.078125 - 0.046875 = 0.03125$$

Pour la bille ayant le diamètre de **9.5mm**, nous avons :

$$\bar{h}_2 - \bar{h}_1 = 0.51 - 0.32 = 0.19$$

$$\bar{h}_3 - \bar{h}_2 = 0.64 - 0.51 = 0.13$$

Ce qui permet de composer les déterminants suivants :

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} 0.19 & 0.1875 \\ 0.13 & 0.3125 \end{vmatrix} = 0.035$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} 0.25 & 0.19 \\ 0.25 & 0.13 \end{vmatrix} = -0.015$$

D'où :

$$\mathbf{b} = \frac{\Delta_b}{\Delta} = \frac{0.035}{0.03125} = 1.12$$

$$\mathbf{c} = \frac{\Delta_c}{\Delta} = \frac{-0.015}{0.03125} = -0.48$$

Selon **(III.2)**, nous avons :

$$0.32 = \mathbf{a} + 1.12 \times \mathbf{A} - 0.48 \times \mathbf{A}^2$$

D'où : **a = 0.07**

Ce qui nous permet d'écrire l'équation de la profondeur de pénétration pour la bille de diamètre **9.5mm** :

$$\mathbf{h} = 0.07 + 1.12 \times \mathbf{A} - 0.48 \times \mathbf{A}^2 \quad \text{(III.3)}$$

Analogiquement nous aurons l'équation de la profondeur de pénétration pour la bille de diamètre **14 mm** :

$$\mathbf{h} = -0.29 + 2.6 \times \mathbf{A} - 2.08 \times \mathbf{A}^2 \quad \text{(III.4)}$$

Les résultats de calcul d'après les formules **(III.3)** et **(III.4)** sont représentés graphiquement par la **(fig. III.9.b)**.

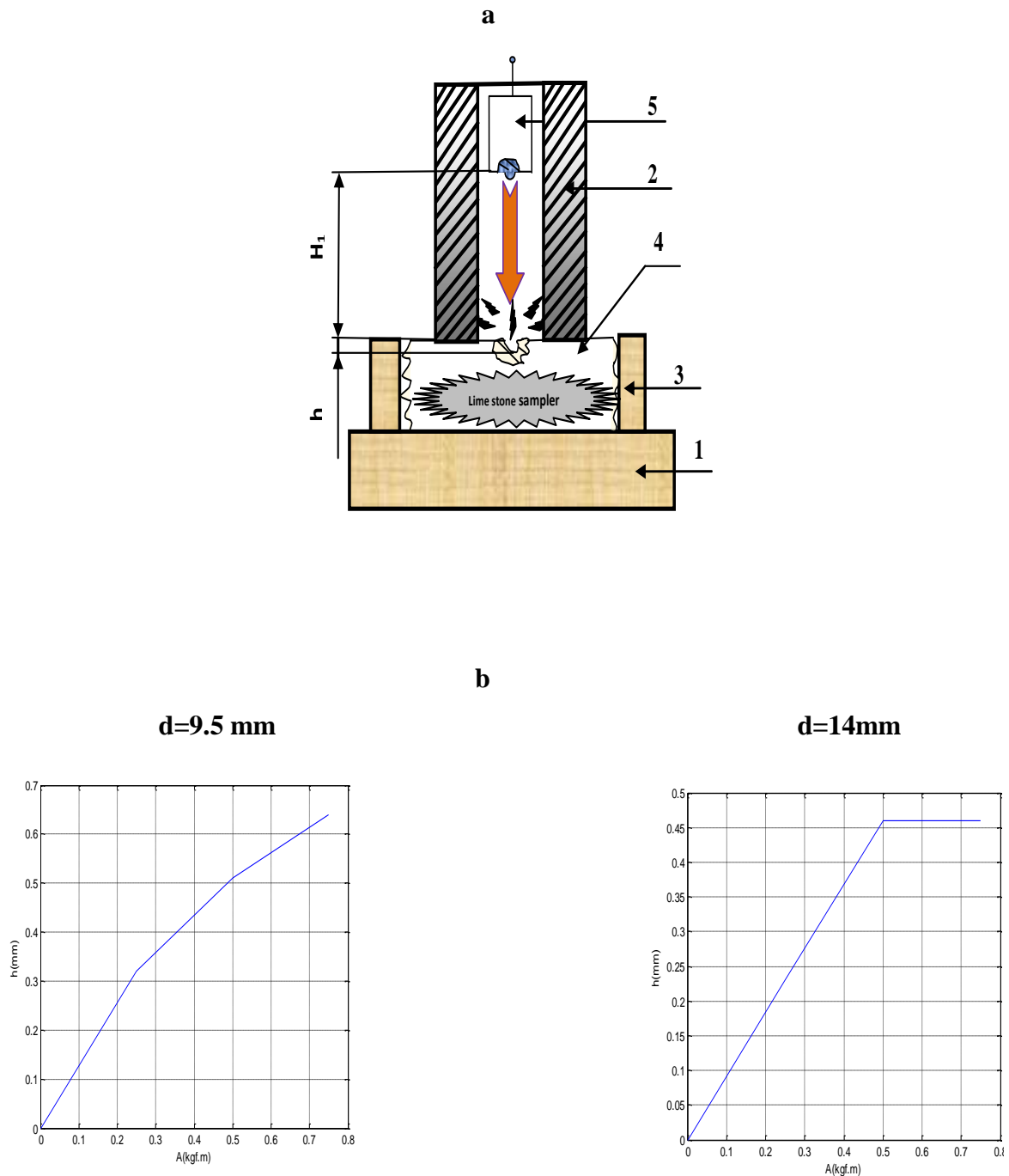


Fig. III.9 Stand (a) et résultat de déterminations (b) de la profondeur d'enfoncement de l'outil dans la roche.

Cependant, les formules proposées présentent un inconvénient, les coefficients **a**, **b** et **c** faisant partie de ces formules tiennent compte de l'influence des propriétés physico-mécaniques de la roche et le diamètre des billes. Afin de bien distinguer l'influence des facteurs énumérés nous proposons une méthode analytique qui suppose que l'énergie

cinétique $-T_1$ de la bille frappante passe complètement à l'énergie potentielle $-U$ de la déformation de la roche, c'est-à-dire :

$$T_1 = U \quad (\text{III.5})$$

L'énergie cinétique de la bille frappante est mesurée par le travail effectué et est égale à l'énergie du choc porté.

$$T_1 = A \quad (\text{III.6})$$

L'énergie potentielle dans le cas envisagé est égale à :

$$U = \frac{1}{2} \times Q \times h; (kgf.m) \quad (\text{III.7})$$

Où :

- h : pénétration de l'outil; (m).
- Q : force agissante sur la bille; (kgf).

Dans notre cas, la force $-Q$ peut être présentée comme suit :

$$Q = C_1 \times S, (kgf) \quad (\text{III.8})$$

Où:

- C_1 : facteur de proportionnalité tenant compte des propriétés physico-mécaniques de la roche, de l'état de la surface extérieure de l'échantillon et d'autres facteurs.
- S : surface de la bille se trouvant en contact avec la roche.

$$S = \Pi \times d \times h, (m^2) \quad (\text{III.9})$$

Où :

- d : diamètre de la bille; (m).

Comme le sens physique du processus étudié est analogue au processus d'enfoncement de l'étampe au cours de la détermination de la résistance à l'empreinte de la roche, nous prenons :

$$C_1 = K \times P_k \quad (\text{III.10})$$

Où :

- K : coefficient tenant compte de la fragilité de la couche superficielle ainsi que des particularités de l'action dynamique de l'outil; ($K=1.2 \div 1.3$).
- P_k : résistance à l'empreinte de la roche; (kgf/mm²).

Dans une forme définitive nous écrivons :

$$A = \frac{10^6}{2} \times K \times P_k \times \Pi \times d \times h^2, (kgf.m) \quad (\text{III.11})$$

D'où :

$$h = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-6} \times A}{K \times P_k \times \Pi \times d}}, (m) \quad (\text{III.12})$$

A l'aide de la formule proposée (III.12), nous pouvons trouver la profondeur de l'écrasement de la roche munie d'une bille. Mais nous savons que normalement l'outil est chargé par quelques billes dont le nombre est égale à N, c'est pourquoi la formule d'après laquelle nous déterminons l'enfoncement de l'outil dans la roche au cours d'un choc est la suivante:

$$h = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-6} \times A}{K \times P_k \times \Pi \times d \times N}}, (m) \quad (\text{III.13})$$

Connaissant le nombre de coups du piston du percuteur durant un tour $-n_c$ ou bien le nombre de coups durant une minute $-n_m$, nous trouvons conformément l'enfoncement total pour un tour ou une minute.

$$h_o = h \times n_c, (m/cp) \quad (\text{III.14})$$

$$h_m = h \times n_m = V_f, (m/min) \quad (\text{III.15})$$

Les formules proposées (III.13), (III.14) et (III.15) peuvent être utilisées pour déterminer la productivité des sondeuses et leurs régimes rationnels de fonctionnement.

CONCLUSION

L'étude des particularités de l'interaction de l'outil à pastille avec la roche s'effectue pour la première fois. A cet effet nous proposons une formule permettant de déterminer la vitesse de forage en tenant compte de l'influence des paramètres géométriques de l'outil, des propriétés physico-mécaniques des roches et des paramètres de travail du percuteur (**formule III.13**).

Chapitre IV

Etude Expérimentale de Régime de Fonctionnement d'une Machine de Forage

INTRODUCTION

Dans ce chapitre on va déterminer l'influence des paramètres de réglage à savoir la vitesse de rotation et la force axiale appliquée sur l'efficacité du processus de forage, qui se caractérise par la vitesse de forage; et comme critère de choix de régime de fonctionnement de la machine de forage, nous avons pris l'indice du prix de revient d'un mètre du trou foré.

IV.1. BUT DE L'ETUDE ET PARTICULARITES DE LA METHODOLOGIE DE RECHERCHE EXPERIMENTALE

Il existe à présent un nombre de recherches consacrées à l'étude du processus de forage roto-percutant. Les résultats de ces recherches ont permis de créer pour les conditions à ciel ouvert les constructions originales des sondeuses [49].

Cependant, il existe des questions qui n'ont pas été suffisamment développées [49]. Par exemple, il n'y a pas un avis commun sur le caractère de l'influence de la force axiale agissant sur l'outil à pastilles et de sa vitesse de rotation sur la vitesse de forage; cela provoque la mauvaise exploitation des sondeuses [49,50].

A cet effet, le but de l'étude expérimentale s'enserme dans la détermination de l'influence de certains facteurs sur l'efficacité du processus de forage des sondeuses roto-percutantes munies d'un outil à pastilles.

De l'analyse du processus de destruction de la roche au moyen des sondeuses permet de conclure que les paramètres de réglage des machines, les limites des possibilités techniques et l'état de l'outil influent considérablement sur la vitesse de forage [49].

Cette dernière, prédétermine à son tour les indices technico économique de l'exploitation des sondeuses.

La méthodologie de recherche expérimentale prévoit [51]:

- ✓ La détermination de certains paramètres caractérisant la construction des sondeuses roto-percutantes (limite technique).
- ✓ L'étude de l'influence du métrage des trous forés sur la vitesse de forage.
- ✓ La réalisation d'une expérience préalable permettant de limiter le domaine d'étude de la dépendance de la vitesse de forage en fonction des paramètres de réglage (force axiale appliquée, et vitesse de rotation).

Dans la plus part des cas, l'étude sur les limites des possibilités techniques des sondeuses s'effectue à partir des caractéristiques de ces dernières indiquées sur leurs plaques

signalétiques. Ce qui fait défaut pour le fonctionnement des sondeuses Ingersoll-Rand et Atlas-Copco qui font l'objet de notre étude.

Pour cela, il est indispensable d'établir expérimentalement les limites des vitesses de rotation, des forces axiales appliquées et les vitesses d'avancement de l'outil.

L'étude du métrage des trous forcés permet d'établir le degré de l'usure de l'outil et déterminer son influence sur la vitesse de forage.

Sachant que les paramètres de réglage (vitesse de rotation, force axiale appliquée) influent considérablement sur les paramètres de sortie, il est nécessaire d'effectuer les expériences en deux étapes en appliquant la méthode mathématique de planification des expériences et le traitement statistique des résultats obtenus.

Les calcaires choisis ne sont pas abrasifs ($a = 2.7\text{mg}$) et ont une résistance à l'empreint de ($P_k=105\text{kgf/mm}^2$). Ce type de calcaire est caractéristique pour l'ensemble des carrières Algériennes.

Durant la réalisation des expériences nous avons utilisé comme moyen de mesure l'appareillage suivant :

- ✓ Un dynamomètre à la compression de type **h_{rc}-500**.
- ✓ Un tachymètre.
- ✓ Un chronomètre.

La mesure des limites techniques des paramètres de réglage s'effectue de manière suivante :

- ✓ Installation de chariot de forage en position horizontale.
- ✓ Mise en marche du rotateur (2) au moyen de la manette (3) en changeant successivement sa position.
- ✓ A l'aide du tachymètre (4) placé sur la circonférence de la tige de forage (5) fixé une rotation de cette tige.
- ✓ La détermination de la vitesse d'avancement de l'outil se réalise en mesurant à l'aide du chronomètre le temps de son déplacement le long de la longueur déterminée des glissières du chariot de forage en changeant la position du levier d'avancement.

La mesure de la force axiale ne peut s'effectuer durant le forage, vu que cette mesure est assurée au moyen d'un dynamomètre qui doit être placé entre l'outil et la surface de contact. Et à l'aide de la manette nous établissons le niveau supérieur de la poussée. Après cela, on évacue le dynamomètre à la compression tout en gardant la manette de poussée à la même position lors du forage [1].

Au fur et à mesure que le forage s'effectue, on procède à la mesure des paramètres de réglage (vitesse de rotation et d'avancement), en utilisant le même appareillage et la même méthode employée lors de la détermination des limites techniques de la sondeuse (**fig. IV.1**).

Le plan d'expérience [52] est présenté dans le (**tab1. IV.1**).

Tableau. IV.1 Plan d'expérience.

Indices	Facteurs étudiés	
	P (X ₁), kgf	n (X ₂), tr/min
Niveau de base, X ₀	450	65
Intervalle de variation, S	50	10
Niveau supérieur, +1 = X ₀ + S	500	75
Niveau inférieur, -1 = X ₀ - S	400	55

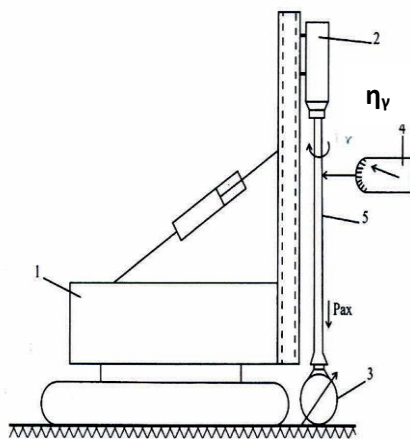


Fig. IV.1 Schéma de l'étude expérimentale des régimes de fonctionnement des sondeuses roto-percutantes [1].

- 1- Machine de forage.
- 2- Rotateur.
- 3- Dynamomètre.
- 4- Tachymètre.
- 5- Tige de forage.

Les facteurs étudiés, représentent les valeurs des variables dans le domaine duquel commence l'étude du processus de forage avec le but d'obtenir les valeurs optimales de ces facteurs. Comme niveau de base, nous avons pris la force axiale appliquée et la vitesse de rotation respectivement égale à **450 kgf et 65 tr/min**, leurs intervalles de variation sont de **50 kgf et 10 tr/min**, quand aux niveaux supérieurs et inférieurs pour la poussée axiale de **400÷500 kgf** et pour la vitesse de rotation de **55÷75 tr/min**. Le choix du niveau de base et de l'intervalle de variation a été fait en tenant compte des possibilités techniques de la sondeuse étudiée (Ingersoll-Rand).

La méthode mathématique de planification de l'expérience permet d'obtenir le modèle mathématique du processus de forage et de diminuer le nombre d'expériences [53].

La recherche du modèle de l'objet étude se compose des étapes suivantes [52]:

- ✓ Planification de l'expérience.
- ✓ Réalisation de l'expérience.
- ✓ Vérification de la reproductibilité de l'expérience.
- ✓ Obtention du modèle du processus avec la vérification de la signification de l'équation de régression.
- ✓ Vérification de l'adéquation du modèle.

Du point de vue résultat final des travaux accomplis en qualité du paramètre d'optimisation, nous avons choisi la vitesse mécanique de forage, les facteurs étudiés (vitesse de rotation du train de tige **-n**, force axiale appliquée **-P**) représentent les valeurs numériques réglées, c'est à dire lors du forage expérimental nous pouvons leur donner des valeurs déterminées.

Quand nous utilisons l'expérience complète, nous réalisons toutes les combinaisons non répétant des facteurs étudiés, dont chacun varie sur deux niveaux. Le nombre de telles combinaisons est déterminé d'après la formule :

$$N = 2^k \tag{IV.1}$$

Où :

- k : nombre de facteurs étudiés (dans notre cas $k = 2$).
- 2 : nombre de niveaux.

D'où :

- $N = 2^2 = 4$ expériences.

Pour déterminer l'erreur de l'expérience nous les avons doublés, donc le nombre d'expérience est égal à **8**.

A l'aide du (tabl. IV.2), nous déterminons la suite des expériences à réaliser.

Tableau. IV.2 Matrice d'expérience.

Expériences	Niveaux des facteurs étudiés	
	P (X ₁), kgf	n (X ₂), tr/min
1	400 (-1)	55(-1)
2	500 (+1)	55(-1)
3	400 (-1)	75 (+1)
4	500 (+1)	75(+1)

N.B : La présentation des valeurs du niveau des facteurs sous la forme (+1) et (-1) permettra de faciliter le traitement des résultats obtenus.

IV.2. ANALYSE DES RESULTATS DE REGIME DE FONCTIONNEMENT DE LA SONDEUSE INGERSOLL-RAND

L'étude des régimes de fonctionnement de la sondeuse Ingersoll-Rand, a été réalisée dans les conditions de la carrière de Hadjar-Soud selon la méthodologie proposée. Les paramètres techniques de la sondeuse Ingersoll-Rand déterminés pendant son fonctionnement à vide sont :

- ✓ Force axial appliquée maximale **700kgf**.
- ✓ Vitesse de rotation maximale **300tr/min**.
- ✓ Vitesse d'avancement maximale **0.30m/min**.

Durant les expériences, nous avons constaté que la vitesse de forage reste constante, cela peut être expliqué par la longue de durée de vie de l'outil de forage (plus de **4000m**).

Nous signalons qu'au cours de notre étude expérimentale, ce sont les ruptures des pastilles qui sont la cause essentielle de la diminution de la durée de vie de l'outil de forage, (on procède directement à son changement).

Les résultats relevés sont représentés dans le (tabl. IV.3) suivant:

Tableau. IV.3 Résultats de détermination de la vitesse de forage.

Expériences	Paramètres d'optimisation		
	$V_{f1} (Y_{1u}), \text{ m/min}$	$V_{f2} (Y_{2u}), \text{ m/min}$	$V_f (\check{Y}_u), \text{ m/min}$
1	0.06	0.05	0.055
2	0.1	0.12	0.11
3	0.12	0.16	0.14
4	0.25	0.20	0.225

Le traitement des résultats pour la détermination de la vitesse du forage s'effectue en supposant que l'équation de régression se présente sous la forme [52] :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (\text{IV.2})$$

Les coefficients de cette équation se déterminent d'après les formules suivantes [14]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \bar{y}_u \quad (\text{IV.3})$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{1u} \times \bar{y}_u \quad (\text{IV.4})$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{2u} \times \bar{y}_u \quad (\text{IV.5})$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N X_{1u} \times X_{2u} \times \bar{y}_u \quad (\text{IV.6})$$

Où :

- ✓ Y_u : valeur moyenne de la vitesse de forage dans chaque expérience.
- ✓ X_{1u}, X_{2u} : sont respectivement les valeurs des facteurs étudiés (force axiale appliquée, vitesse de rotation) sous forme de variable codées, $u = 1, 2, 3, 4$: numéros d'ordre d'expérience.

La résolution des coefficients nous permet de présenter l'équation (IV.2) sous la forme:

$$Y = 0.1325 + 0.035X_1 + 0.05X_2 + 0.0075X_1 X_2 \quad (\text{IV.7})$$

La vérification des coefficients de cette équation s'effectue par son analyse statistique qui comprend trois étapes suivantes:

✓ Appréciation de la dispersion de la reproductibilité ou bien appréciation de l'erreur d'expérience.

✓ Appréciation de signification des coefficients de l'équation de régression.

✓ Appréciation de l'adéquation du modèle pris.

L'erreur de l'expérience est estimée d'après les expériences parallèles. Pour ce but, nous calculons les dispersions par ligne $-S^2$, et nous vérifions leur homogénéité. Le calcul se fait d'après la formule suivante :

$$S_u^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (Y_{uk} - \bar{Y}_u)^2 \quad (\text{IV.8})$$

Où :

- m: nombre d'expérience parallèles (dans notre cas m= 2).
- k : 1, 2 numéros d'expériences parallèles.

Les calculs ont permis les valeurs suivantes :

$$S_1^2 = 0.0005, S_2^2 = 0.0002, S_3^2 = 0.0008, S_4^2 = 0.00125.$$

La vérification de l'homogaméité des dispersions S_u^2 se fait selon le critère de COHREN. G_t [9].

$$G_p \leq G_t$$

Où :

$$G_p = \frac{S_u^2 \max}{S_u^2} \quad (\text{IV.9})$$

Où :

$-S_u^2 \max$: dispersion par ligne maximale.

$$S_u^2 \max = 0.00125$$

$-S_u^2$: Somme totale des dispersions par N lignes.

$$S_u^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 = 0.0023$$

D'où: $G_p = 0.5434$

Si la condition $G_p \leq G_t$ est vérifiée, l'hypothèse sur l'homogénéité des dispersions est retenue.

Le critère de COHRENE $-G_t$ est déterminé pour les degrés de liberté $f_1 = m - 1$, $f_2 = N$ et le niveau de signification $-q$ [9]. Pour notre cas, $f_1 = 1$, $f_2 = 4$, $q = 0.05$, $G_t = 0.9065$, donc l'hypothèse sur l'homogénéité des dispersions est retenues.

La détermination de l'erreur de l'expérience s'effectue d'après la formule [9,52]:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 \quad (\text{IV.10})$$

L'appréciation de la signification des coefficients de l'équation de régression s'établit de la manière suivante :

Avant tout, nous déterminons la dispersion des coefficients de régression :

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_0^2}{4} \quad (\text{IV.11})$$

Ensuite nous utilisons l'intervalle de confiance b_i qui s'exprime par :

$$\Delta b_i = \pm t_t \times S_{b_i} \quad (\text{IV.12})$$

Où :

- t_t : critère de STUDENT, pour notre cas $t_t = 2.78$ [20].

On apprécie la signification des coefficients en comparant leurs valeurs absolues par rapport à l'intervalle de confiance.

$$|b_i| > |\Delta b_i| \quad (\text{IV.13})$$

La comparaison nous permet d'éliminer le coefficient b_{12} du fait qu'il n'est pas significatif.

L'équation de régression prend la forme suivante :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (\text{IV.14})$$

L'étape suivante consiste à vérifier l'adéquation de l'équation de régression. Pour ce but, nous comparons deux dispersions. La première s'appelle la dispersion d'adéquation et se détermine d'après la formule :

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-L} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \tilde{y}) \quad (\text{IV.15})$$

Où :

- L : nombre de membres dans l'équation de régression retenus après l'appréciation de la signification.

- \tilde{y} : valeur des paramètres d'optimisations trouvées d'après l'équation de régression.

La deuxième dispersion est l'erreur de l'expérience S_0^2 .

On vérifie l'adéquation selon le critère de FISCHER $F_p \leq F_t$ [20] :

$$Fp = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2} \quad (\text{IV.16})$$

Si cette condition $F_p \leq F_T$ est vérifiée, l'équation de régression est adéquate, pour notre cas $F_p = 1.075$, tandis que $F_T = 7.71$.

Après avoir apprécié la signification de l'adéquation de l'équation de régression dans laquelle figurent les variables codées, nous passons à l'équation de régression aux variables réelles, ce passage nous donne l'équation de régression suivante :

$$Y = V_f = -0.215 + 0.0007P + 0.0005n \quad (\text{IV.17})$$

L'équation obtenue est vérifiée pour le domaine d'application de la force axiale appliquée de **400÷500 kgf** et de la vitesse de rotation de **55÷75tr/min**. En même temps, il est à signaler que cette équation ne reflète pas l'influence de l'énergie d'un choc et la fréquence de coups, car lors des expériences nous n'avons pas changé la pression de l'air comprimé à l'entrée du perceur, tout cela est provoqué par :

✓ 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 l'augmentation de pression diminue la durée de la vie de l'organe de travail à cause des surcharge agissant sur ses éléments.

C'est pourquoi il est nécessaire de garder la pression dans les limites recommandées par les constructeurs de la sondeuse (**8÷10 bars**).

La vérification de l'expérience a montrée qu'avec l'augmentation de la poussée axiale jusqu'à **500kgf** et la vitesse de rotation jusqu'à **75tr/min**, provoque l'augmentation de la vitesse de forage. 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 déblais au fond du trou.

Pour remédier à cela et pour l'utilisation des possibilités entières de la sondeuse, nous recommandons de munir cette dernière d'un dispositif d'aspiration qui remplacera le soufflage inefficace existant.

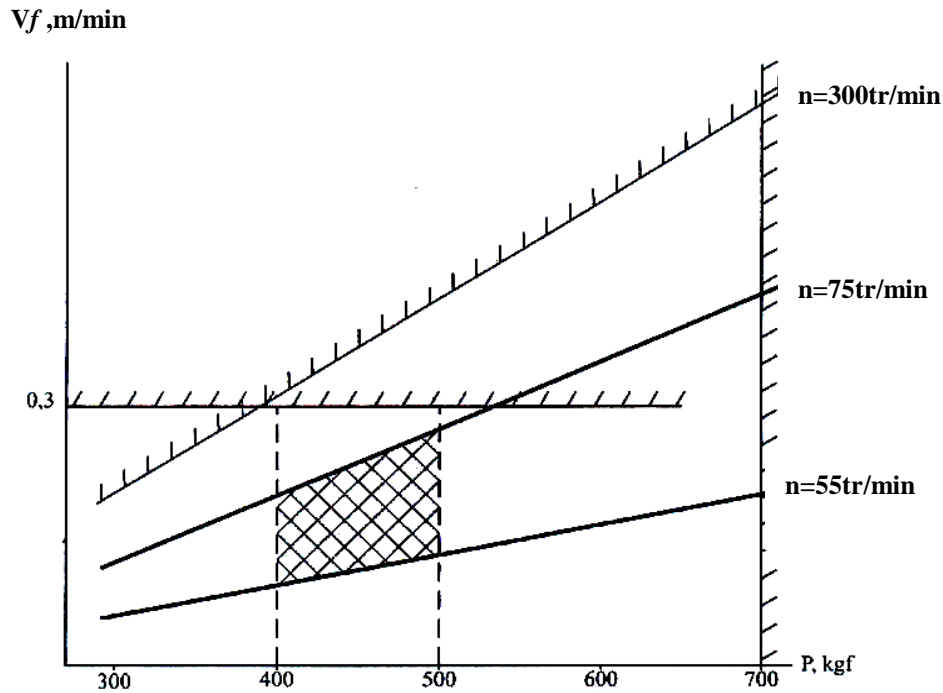


Fig. IV.2 Dépendance de la vitesse de forage en fonction de la force axiale appliquée et de la vitesse de rotation.

IV.3. DETERMINATION DE REGIME DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES DE FORAGE ROTO-PERCUTANTES

L'analyse des formules empiriques de la détermination des régimes de forage roto-percutant recommandées par un nombre de recherches consacrées à l'étude du processus de forage roto-percutant. Les résultats de ces recherches ont permis de créer pour les conditions des carrières les constructions des sondeuses [1].

Parmi toutes ces méthodes, ils existent d'autres qui sont abandonnées à cause de la négligence de certains paramètres malgré leur importance et leur nécessité; seulement certaines méthodes nous permettent de faire une étude plus simple avec des résultats plus proches, mais tous les paramètres de forage ne sont pas forcément connus, voila pourquoi il est nécessaire de faire une recherche expérimentale sur le régime de forage roto-percutant outil à pastille ayant pour but de préciser les résultats théoriques obtenus préalablement par l'établissement des résultats expérimentaux et la détermination des régimes de forage les plus favorables pour les conditions concrètes des carrières algériennes; il convient que dans les mêmes conditions de travail ce sont les paramètres de réglage, les limites techniques et l'état de l'outil qui influent sur la vitesse de forage [2, 4].

L'étude de l'influence du métrage des trous forés a été programmée dans le but de déterminer l'état d'outil et d'établir son influence sur la vitesse de forage.

Vu que les paramètres de réglage de la machine (vitesse de rotation, force axiale appliquée) influent considérablement sur les paramètres de sorties, donc on a pris la décision d'effectuer deux étapes d'expérience en appliquant les méthodes théoriques et de la planification expérimentale.

L'expérience montre que l'utilisation de n'importe quelle machine sans aucune argumentation ne peut assurer une amélioration des indices technico économiques pendant le fonctionnement, mais au contraire ce qui est très important lors de la mise en exploitation d'une nouvelle carrière ou une mine souterraine.

Le choix des machines et leur régime de fonctionnement rationnel restent l'objectif primordial. La solution à ce problème peut être obtenue par méthode analytique avec bien sûr l'utilisation du critère qui permet d'apprécier l'efficacité de ces machines [46].

L'indice de l'efficacité qui est pris comme critère doit prendre en considération les facteurs qui influent sur le fonctionnement de la machine, sont les suivants :

- ✓ données de départ.
- ✓ propriétés de la roche.
- ✓ caractéristiques de la machine.
- ✓ régime de fonctionnement de la machine.
- ✓ type de l'outil.
- ✓ type de l'explosif.

Actuellement, les critères les plus recommandés pour le choix des machines minières en générale et leur régime de fonctionnement sont les suivants : productivité, prix de revient d'une unité de la production ou d'une unité de volume, investissement pour une unité de la puissance installé, les dépenses totales, etc.... [2, 27, 36 et 49]. Concernant les machines de forage, on peut sélectionner les critères essentiels comme suit :

- ✓ productivité de la machine.
- ✓ prix de revient de 1 mètre de trou foré.
- ✓ prix de revient de 1 m³ de la roche abattue (tenant compte des dépenses d'exploitation des machines de forage).
- ✓ Dépenses totales.

IV.3.1. Critère et Modèle de Choix de Régime Rationnel de Fonctionnement

Il existe un point de vue commun sur la question du choix du type d'outils rationnels et les régimes de leur travail.

Il consiste en présence pour chaque variété de la roche d'un par type d'outil qui est capable de la détruire d'une manière efficace par le régime rationnel.

La diversité des roches, leur composition pétrographique différente, les propriétés mécaniques et d'autres nécessitent la résolution de ce problème pour les groupes des roches des propriétés variantes dans les limites.

En ce qui concerne l'appréciation de l'efficacité du choix du type de l'outil et des régimes de fonctionnement, certains chercheurs prennent en considération la vitesse mécanique du forage et le métrage planifié pour l'outil [15].

Les auteurs des recherches [24] concernant le travail des trépan à molettes dans les branches de l'industrie du pétrole et d'autres ont recommandé en qualité de ce critère deux indices, qui sont la vitesse maximale de forage et le prix de revient d'un mètre du trou foré. Le critère du prix de revient d'un mètre du trou foré est le plus considéré. La pratique montre que la présence de deux critères provoque parfois le non résolution du problème [24].

La structure du prix de revient d'un mètre du trou foré se compose de deux parties, dépenses dépendant du temps lié à la productivité des travaux de forage ainsi qu'au métrage pour l'outil [1,2]. D'ici il convient de dire que le prix de revient d'un mètre du trou foré est le critère qui tient compte du niveau technique des machines employées et de l'organisation du travail.

Lors de la réalisation des travaux miniers compte tenu du critère généralisé de l'efficacité de n'importe quelle méthode de forage, nous pouvons prendre le prix de revient d'un mètre cube de la masse rocheuse, qui dépend du prix de revient d'un mètre du trou foré et du rendement d'un mètre du trou ($m^3/1mtr$) [1].

Dans ce cas nous tenons compte de l'organisation des travaux de tir, du diamètre de forage, des mailles de disposition des trous de mine et de la qualité de fragmentation de la roche abattue.

Cela permet de recommander ce critère lors de la projection des travaux de tir et au cours du choix des machines à forer.

S'il s'agit de l'exploitation des machines de forage choisies permettant de forer des trous de diamètre déterminé, le critère le plus juste de la détermination des paramètres du régime rationnel de forage sera le prix de revient d'un mètre du trou foré. Ce dernier est déterminé d'après la formule suivant [11] :

$$C = \frac{C_p}{Q_{\text{exp}}} + \frac{C_{\text{ou}}}{H}, \text{ DA/m} \quad (\text{IV.18})$$

D'où :

✓ Q_{exp} : productivité par poste de la sondeuse lors du forage dans les conditions déterminées avec la combinaison constante des paramètres de forage, (m/poste).

✓ C_{ou} : prix de l'outil, (DA).

✓ H : métrage des trous forés se rapportant à un outil, (m).

✓ C_p : dépenses se rapportant à l'exploitation de la machine de forage, (DA/poste).

$$C_p = C_s + C_e + C_{\text{ma}} + C_{\text{rép}} + C_a, \text{ (DA/poste)}$$

✓ C_a : Coût de la machine amorti, ($C_a=412.66$ DA/poste).

✓ C_s : Le salaire de l'ouvrier par poste, ($C_s=400$ Da/poste).

✓ $C_{\text{rép}}$: Le coût de la réparation par poste, ($C_{\text{rép}}=90$ Da/poste).

✓ C_e : Le coût de l'énergie par poste, ($C_e=118$ Da/poste).

✓ C_{ma} : Le coût de la matière (graisse), ($C_{\text{ma}}=2.62$ Da/poste).

✓ $C_{\text{ou}} = 1\ 140$ DA.

Donc:

$$C_p = 400 + 118 + 2.62 + 90 + 412.66 = 1\ 023.28 \text{ DA/poste}$$

Les calculs du prix de revient d'un mètre de trou foré sont représentés en deux tableaux (tabl IV.4 et tabl IV.5).

Tableau. IV.4 Résultats expérimentaux réalisés dans les conditions de la carrière.

E	V_f , m/min	H, m	$Q_{thé}$	K_{tech}	Q_{tech}	K_{exp}	Q_{exp}	C, DA/m
01	0.0509	196	3.054	0.948	2.896	0.792	2.418	425.23
02	0.0523	192	3.138	0.968	2.968	0.790	2.479	414.86
03	0.0537	190	3.222	0.944	3.041	0.788	2.530	406.55
04	0.0551	188	3.306	0.942	3.114	0.787	2.601	395.53
05	0.0618	160	3.708	0.925	3.429	0.773	2.866	359.54
06	0.0630	158	3.786	0.923	3.494	0.771	2.919	353.08
07	0.0645	152	3.87	0.918	3.552	0.768	2.972	346.93
08	0.0659	148	3.954	0.914	3.643	0.765	3.024	341.08
09	0.0726	146	4.356	0.905	3.942	0.757	3.297	313.09
10	0.0726	123	4.460	0.887	3.938	0.742	3.294	313.89
11	0.0740	106	4.524	0.870	3.935	0.728	3.293	314.51
12	0.0754	86	4.608	0.848	3.907	0.708	3.262	318.34
13	0.0768	63	5.01	0.783	3.922	0.657	3.291	317.27
14	0.0834	56	5.088	0.758	3.856	0.638	3.246	322.28
15	0.0862	43	5.172	0.704	3.641	0.593	3.066	343.05
16	0.0876	31	5.256	0.627	3.295	0.531	2.790	379.66

- Avec l'outil de diamètre $d=160$ mm.
- Vitesse de rotation $n_1=55$ tr/min.

Tableau. IV.5 Résultats expérimentaux réalisés dans les conditions de la carrière.

E	V_f , m/min	H, m	$Q_{thé}$	K_{tech}	Q_{tech}	K_{exp}	Q_{exp}	C, DA/m
01	0.0511	126	3.071	0.921	0.828	0.770	2.364	436.02
02	0.0544	125	3.265	0.916	2.991	0.776	2.500	412.51
03	0.0576	115	3.460	0.904	3.128	0.757	2.619	394.18
04	0.0609	112	3.655	0.897	3.279	0.751	2.744	376.48
05	0.0766	108	3.600	0.870	4.002	0.729	3.353	308.88
06	0.0799	103	4.795	0.860	4.123	0.720	3.452	300.31
07	0.0864	101	4.990	0.848	4.252	0.710	3.542	292.85
08	0.0864	89	5.184	0.837	4.308	0.697	3.613	287.71
09	0.102	86	6.126	0.800	4.900	0.672	4.116	253.26
10	0.105	64	6.324	0.743	4.698	0.625	3.952	265.17
11	0.108	56	6.522	0.710	4.630	0.599	3.906	269.16
12	0.11	52	6.714	0.689	4.629	0.570	3.826	275.14
13	0.127	43	7.656	0.616	4.716	0.481	3.774	280.43
14	0.130	34	7.848	0.553	4.339	0.469	3.680	289.82
15	0.134	32	8.048	0.531	4.272	0.451	3.628	294.55
16	0.137	26	8.238	0.474	4.904	0.403	3.319	323.96

- Avec l'outil de diamètre $d=160$ mm.
- Vitesse de rotation $n_2=75$ tr/min.

A l'aide de deux tableaux précédents on trace le nomogramme ci-dessous qui donne les valeurs optimales du régime de fonctionnement de la machine de forage roto-percutant.

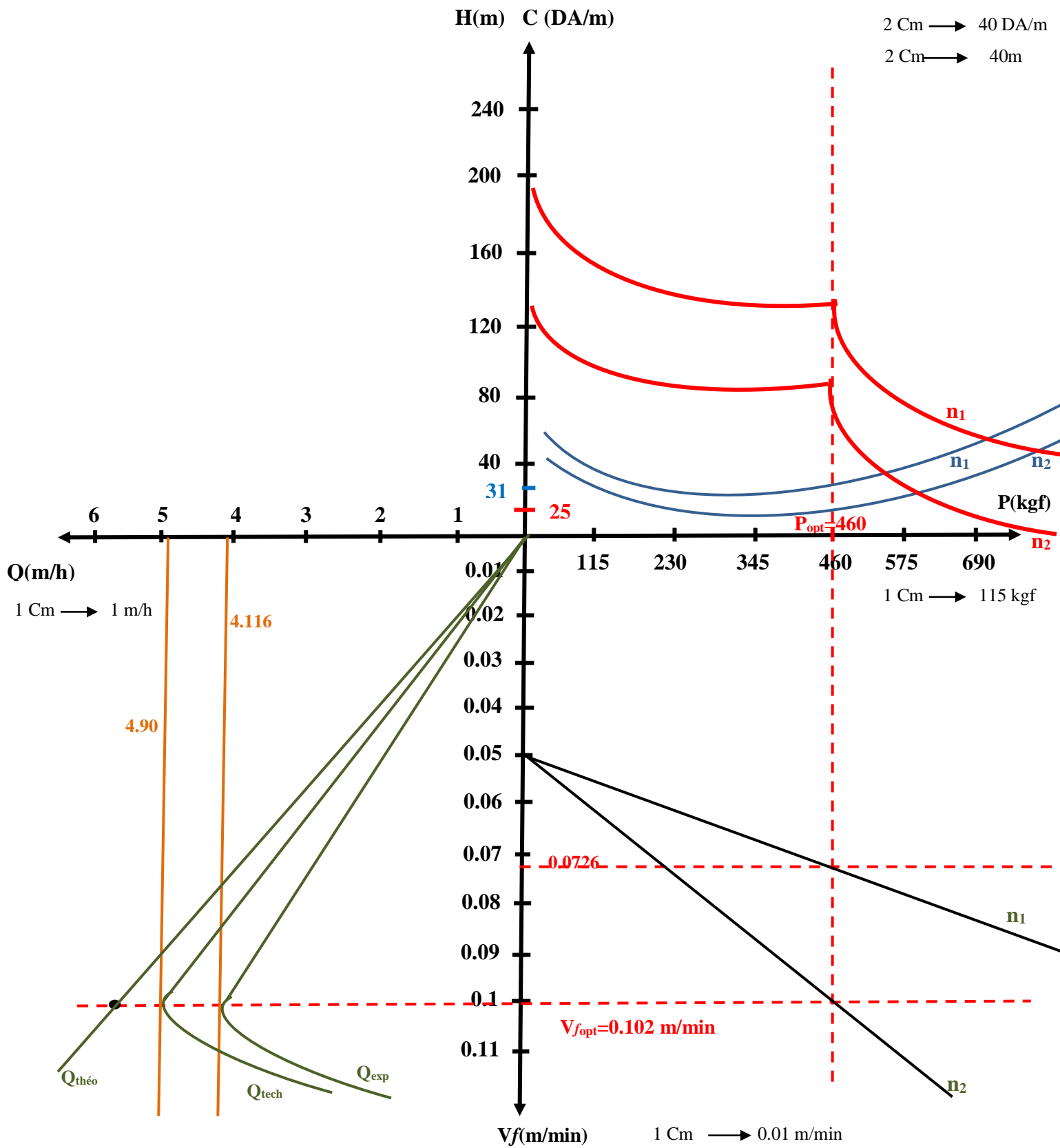


Fig. IV.3 Détermination des valeurs optimales du régime de fonctionnement de la machine de forage roto-percutantes.

D'après l'analyse des résultats expérimentaux (**tabl IV.4 et tabl IV.5**), on a abouti à la conclusion que dans les conditions des carrières employant les moyens de forage défini, il est préférable d'utiliser le critère de prix de revient d'un mètre du trou foré pour déterminer les paramètres des régimes de fonctionnement rationnels et on comprendre que l'indice permettant de limiter les paramètres de réglage de la machine est un indice technico-économique (le prix de revient d'un mètre de trou foré).

Ce dernier vérifier exactement la rationalité du régime de fonctionnement de la machine de forage.

Bien que représenté sur le nomogramme (**fig. IV.3**), nous pouvons dire que pour l'étude faite avec l'utilisation de l'outil à pastillé de diamètre **d=160mm**, nous avons la pression axiale optimale **P_{opt}= 460kgf**, la vitesse de rotation **n₁=55tr/min et n₂=75tr/min** et on obtient graphiquement la vitesse de forage optimale **V_{fopt}=0.102m/min**.

La comparaison graphique des résultats de calcul obtenus théoriquement avec ceux obtenus expérimentalement a fait ressortir que la méthode la plus proche des résultats réels est celle de **PERETOLCHKINE** (méthode de détermination de régime rationnel de fonctionnement d'une machine de forage) [29].

Donc on recommande l'application de cette dernière méthode lors de l'utilisation de la machine de forage roto-percutant pour les conditions de la carrière de Hadjar-Soud.

Les paramètres rationnels du régime de fonctionnement de la machine de forage roto-percutant dans les conditions de la carrière sont représentés dans le tableau ci-dessous (**tabl IV.6**) avec l'outil de diamètre **d=160mm**:

Tableau. IV.6 Paramètres rationnels de régime de fonctionnement.

Vitesse de rotation, tr/min		P, kgf	V _f , m/min	Productivité			C DA/m
				Q ^{thé} m/h	Q ^{tech} m/h	Q ^{exp} m/h	
n ₁	55	460	0.0726	4.356	3.942	3.297	313.09
n ₂	75		0.102	6.126	4.900	4.116	253.26

D'après le tableau (**tabl IV.6**) pour assurer le prix de revient d'un mètre de trou foré minimal, il faut chercher à travailler avec la force axiale appliquée et la vitesse de rotation optimale en se limitant par l'apparition des vibrations de la machine et le coincement de l'outil; mais l'augmentation de la force axiale et la vitesse de rotation jusqu'à leurs valeurs optimales provoquent l'accroissement de la vitesse de forage.

Au-delà de ces limites la productivité de la machine diminue ce qui s'explique par la détérioration de l'outil de forage et les vibrations dues aux déséquilibres de la machines.

D'ici découle que dans le formule (**IV.18**), Q_{exp} et H sont les fonctions de la vitesse de forage et par conséquent de la vitesse de rotation et de la force axiale appliquée. Le problème posé consiste à déterminer les valeurs des paramètres de réglage ou on obtient le plutôt possible le prix de revient d'un mètre de trou foré minimal.

IV.4. MODELE MATHEMATIQUE DU PRIX DE REVIENT D'UN METRE DE TROU FORE

Pour élaborer le modèle mathématique du prix de revient d'un mètre de trou foré de mine et déterminer sur cette base le régime rationnel de forage, nous considérons la formule (**IV.18**) et en substituant la formule (**II.18**) dans (**IV.18**) nous aurons :

$$C = \frac{C_p}{60 \times T \times V_f \times \frac{1}{1 + \frac{T_{aux} + T_{org}}{L} \times V_f}} + \frac{C_{ou}}{H} \quad (\text{IV.19})$$

Posons :

$$\alpha = 60 \times T \quad , \quad \gamma = \frac{T_{aux} + T_{org}}{L}$$

$$C = \frac{c_p(1 + \gamma \times V_f)}{\alpha \times V_f} + \frac{c_{ou}}{H} \quad (\text{IV.20})$$

Selon les résultats d'expériences réalisées, nous n'avons pas établi l'influence des paramètres de réglage sur le métrage foré par un outil. Ceci lié aux particularités de l'outil de forage à pastilles.

$$\frac{c_{ou}}{H} = \text{const} \quad (\text{IV.21})$$

Des mêmes expériences, il convient de souligner que la vitesse de forage est une fonction à deux variables **-P** et **n**.

Nous déterminons les valeurs extrémales de la fonction **C=f(P,n)** en appliquant les dépendances suivantes :

$$\frac{\partial C}{\partial P} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial n} = 0 \quad (\text{IV.22})$$

Dans ce cas :

$$\frac{\partial C}{\partial P} = \frac{\partial \frac{C_p(1 + \gamma \times V_f)}{\alpha \times V_f}}{\partial P} = \frac{c_p}{\alpha} \left(\frac{V_f \times \gamma \frac{\partial V_f}{\partial P} - \frac{\partial V_f}{\partial P} (1 + \gamma \times V_f)}{V_f^2} \right) = 0 \quad (\text{IV.23})$$

$$\frac{\partial C}{\partial P} = \frac{c_p}{\alpha} \times \left(\frac{(\gamma \times V_f - 1 - \gamma \times V_f) \times \frac{\partial V_f}{\partial P}}{V_f^2} \right) = -\frac{C_p}{\alpha V_f^2} \times \frac{\partial V_f}{\partial P} = 0$$

D'où :

$$\frac{\partial C}{\partial p} = -\frac{C_p}{\alpha V_f^2} \times \frac{\partial V_f}{\partial p} = 0 \quad (\text{IV.24})$$

Remarque: $-\frac{C_p}{\alpha} \neq 0$

Analogiquement nous avons :

$$\frac{\partial C}{\partial n} = -\frac{c_p}{\alpha V_f^2} \times \frac{\partial V_f}{\partial n} = 0 \quad (\text{IV.25})$$

Après les transformations des formules (IV.24) et (IV.25), nous obtenons le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{V_f^2} \times \frac{\partial V_f}{\partial P} = 0 \\ \frac{1}{V_f^2} \times \frac{\partial V_f}{\partial n} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{IV.26})$$

Vue que :
$$V_f = - 0.215 + 0.0007P + 0.0005n$$

Nous aurons le système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{0.0007}{(-0.215+0.0007P+0.0005n)^2} \simeq 0 \\ \frac{0.0005}{(-0.215+0.0007P+0.0005n)^2} \simeq 0 \end{array} \right. \quad (\text{IV.27})$$

L'analyse du système (IV.26) montre que la fonction $C=f(p, n)$ n'a pas de minimum et de maximum finals, c'est-à-dire augmente et diminue infiniment, Par contre si nous considérons cette fonction dans le domaine limité, celle-ci obtient ses valeurs minimales quand $P = \text{max}$ et $n = \text{max}$.

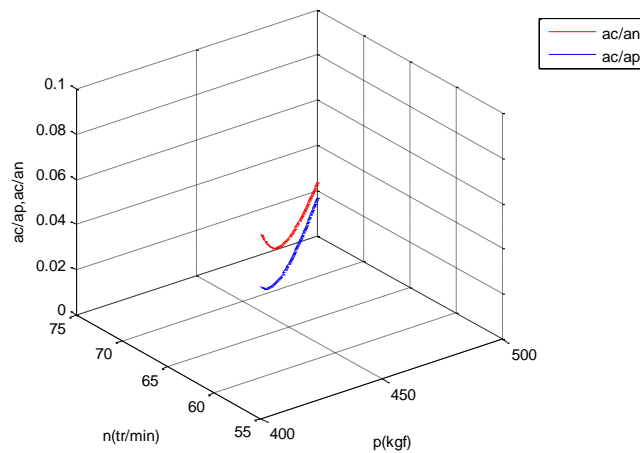


Fig. IV.4 Courbe des valeurs extrémales de la fonction $C= f (p, n)$.

Donc, afin d'obtenir le meilleur indice du prix de revient d'un mètre de trou foré pour nos conditions, nous recommandons de travailler avec la force axiale appliquée et la vitesse de rotation de l'outil ayant leurs valeurs maximales.

Comme nous l'avons remarqué pendant l'expérience, la présence des déblais au fond du trou limite les valeurs maximales de ces paramètres (apparitions des vibrations et le coincement de l'outil).

Donc la première réserve de l'amélioration des indices technico-économique consiste à perfectionner l'évacuation des déblais.

L'étude des moyens existants pour l'évacuation des déblais a permis de relever trois méthodes principales.

✓ Le soufflage périodique du trou avec l'arrêt correspondant du perceur, ce procédé donne la possibilité de bien nettoyer le trou et par conséquent d'augmenter la vitesse de forage; mais les arrêts fréquents du perceur provoquent la diminution de la productivité d'exploitation. Cette méthode est employée actuellement dans la carrière de calcaire de Hadjar-Soud.

✓ Le lavage par pulvérisateur de poussières, cette méthode améliore les conditions de travail des ouvriers; mais possède un inconvénient qui consiste dans le coincement et l'arrêt du train de tige provoqué par la formation de la schlamme sur tout dans les trous de grande profondeur.

✓ L'utilisation de l'aspiration des déblais, cette méthode améliore non seulement les conditions de travail mais augmente la vitesse de forage, cela demande la présence d'une installation supplémentaire. L'expérience montre que l'efficacité obtenue en résultat de son application recouvre les investissements préliminaires. C'est pourquoi, nous recommandons son utilisation dans les conditions des carrières de calcaire [29].

CONCLUSION

Le traitement statistique des résultats expérimentaux a permis de définir l'équation de régression décrivant l'influence des paramètres de réglage sur la vitesse de forage. Nous avons déduit que cette dernière augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'outil et de la force axiale appliquée.

Il est préférable d'utiliser le critère du prix de revient d'un mètre de trou foré pour déterminer les paramètres des régimes rationnels de fonctionnement dans les conditions des carrières de calcaire employant les moyens de forage définis.

Pour assurer le prix de revient minimal d'un mètre de trou foré, il faut travailler avec la force axiale appliquée et la vitesse de rotation les plus élevées en se limitant à l'apparition des vibrations de la sondeuse et au coincement de l'outil.

L'augmentation de la vitesse de forage jusqu'à sa valeur maximal déterminée par le mécanisme d'avancement est possible si nous employons en plus l'aspiration des déblais; cela améliorera en même temps les conditions de travail des ouvriers.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'importance du secteur de l'industrie minérale est primordiale pour le développement de l'économie nationale, cela constitue l'amont de toutes les industries dérivant des ressources naturelles. L'industrie algérienne est axée principalement sur les industries lourdes, a contraint l'industrie minière à se développer afin de faire face aux besoins sans cesse croissant des différentes industries, parmi elles l'industrie des matériaux de construction telle que le calcaire.

Dans le présent travail de recherche, nous avons donné une nouvelle solution à un problème pratique et actuel.

Cette nouvelle solution consiste en la détermination des régimes de fonctionnement des machines de forage roto-percutantes dans les conditions des carrières de calcaire Algériennes.

Les recherches accomplies nous permettent de faire les conclusions et les recommandations suivantes :

➤ L'analyse des sources bibliographiques, l'étude des conditions géologique et minérales des carrières de calcaire algériennes ainsi que la généralisation correspondante, ont permis de recommander dans ces conditions l'utilisation du mode de forage roto-percutant. L'analyse des travaux scientifique traitant le problème étudié nous a permis de dire que le régime de forage roto-percutant est déterminé par la combinaison de la vitesse de rotation de l'outil, de la force axiale appliquée, de l'énergie d'un choc et du nombre de coups portés. Leurs valeurs optimales dépendent en particulier du type de l'outil et des propriétés physico-mécaniques des roches à abattre.

➤ Les résultats expérimentaux de l'étude de la détermination des propriétés physico-mécaniques nous permettent de dire que les calcaires de la carrière de Hadjar-Soud se rapportent à la classe moyenne; c'est-à-dire une très faible abrasivité et une résistance à l'empreinte moyenne de l'ordre de 105 kgf/mm^2 .

L'efficacité du travail de la sondeuses peut être caractérisée par quelques paramètres, parmi eux la productivité. Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs qui peuvent être divisés en ceux reflétant les conditions d'exploitation, la construction des machines, le régime de destruction des roches et en ceux qui caractérisent le degré de l'utilisation des sondeuses pendant le temps; par exemple on utilise dans la carrière de Hadjar-Soud deux sondeuses travaillant en même temps qui sont: Ingersoll-Rand et Atlas-Copco.

La méthodologie de choix préconisé à travers le modèle technico-économique permet le choix optimal, d'où l'affirmation que la machine Ingersoll-Rand est meilleure que Atlas-Copco dans les conditions réelles de la carrière.

L'analyse des résultats selon les courbes de dépendance des productivités théoriques, techniques et d'exploitation en fonction de la vitesse de forage nous permet de dire que la productivité dépend en premier lieu des paramètres du régime de forage parce que ces derniers déterminent la valeur de la vitesse de forage. Ainsi on peut conclure que la vitesse de forage influe considérablement sur la productivité des sondeuses.

Actuellement dans la carrière de calcaire Hadjar-Soud pour nettoyer le trou de forage on employant la méthode de soufflage périodique du trou avec l'arrêt correspondant du perceur, mais les arrêts fréquents du perceur provoquent la diminution de la productivité d'exploitation; pour remédier à cela nous recommandons une autre méthode qui spécifie mieux ce problème, on demande l'utilisation de l'aspiration des déblais au fond du trou.

➤ Malgré l'existence des travaux de recherche scientifique réalisés, liés à l'utilisation du mode de forage roto-percutant renferment quelques points mal étudiés, surtout s'il s'agit de l'application de l'outil à pastilles. L'étude expérimentale de l'interaction de l'outil à pastilles avec la roche a permis de proposer une formule qui permettra de déterminer la hauteur de pénétration de l'outil en fonction des paramètres caractérisant la roche à forer, la géométrie de l'outil ainsi que les performances de la construction du perceur.

L'augmentation de la hauteur de pénétration dépend des propriétés Physico-mécaniques des roches, des paramètres géométriques de l'outil et peut augmenter avec l'accroissement de l'énergie d'un choc.

➤ L'étude du processus de forage par sondeuse roto-percutantes nous a permis d'obtenir les valeurs des limites techniques des paramètres de réglage (vitesse de rotation et d'avancement, force axiale appliquée) déterminées par le coincement de l'outil et la vibration de la sondeuse, ainsi que l'équation de régression décrivant l'influence des paramètres de réglage sur la vitesse de forage, et pour augmenter cette dernière jusqu'à sa valeur maximale déterminée par le mécanisme d'avancement est possible si nous employons en plus l'aspiration des déblais, cela améliore en même temps les conditions de travail des ouvriers.

➤ L'analyse des critères du choix de fonctionnement rationnel des sondeuses a aboutie à l'utilisation du critère du prix de revient minimal d'un mètre du trou foré.

Conclusion Générale

Dans notre cas, pour assurer le prix de revient minimal d'un mètre du trou foré, il faut travailler avec la force axiale et la vitesse de rotation de l'outil les plus élevées jusqu'au ces valeurs maximales (a été confirmé par le modèle mathématique du prix de revient proposé) toujours en se limitant à l'apparition des vibrations de la sondeuse et au coincement de l'outil de forage.

Pour conclure, l'optimisation des paramètres de réglage obtenus d'une machine de forage roto-percutant par la méthode de nomogramme des valeurs optimales du régime de fonctionnement, dans le sens d'atteindre un prix de revient d'un mètre de trou foré minimum sa prendre beaucoup du temps et d'essai. C'est pour ça il faut mieux de travailler avec les valeurs maximales du paramètres rationnels du régime de fonctionnement de la sondeuse roto-percutante (force axiale appliquée maximal, vitesse de rotation et de forage maximal) dans les conditions réelles de la carrière de Hadjar-Soud, et remplaçant la méthode de soufflage périodique des trous par la procédure de l'aspiration des déblais pour le nettoyage des trous de forage pour éviter les inconvénients possibles pendant l'exploitation.

Nomenclature

Nomenclature

Abréviation	Définition
Ψ_{opt}	Angle optimal de rotation de l'outil lors d'un choc, (degré)
P_{ax}	La force axiale appliquée sur la roche, (kgf)
n	Vitesse de rotation de l'outil
a	Abrasivité de la roche, (mg)
P_k	La résistance à l'empreinte, (kgf/mm ²)
V_f	La vitesse de forage, (m/min)
T_f	Temps de travail productif de la sondeuse pendant un cycle, (min)
L	Métrage du trou foré pendant un cycle; (m)
$Q_{théo}$	Productivité théorique, (m/h)
Q_{tech}	Productivité technique, (m/h)
Q_{exp}	Productivité d'exploitation, (m/poste)
K_{tech}	Coefficient de l'imperfection technique de la sondeuse
K_{exp}	Coefficient tenant compte du travail continu de la sondeuse pendant son exploitation
K_u	Coefficient d'utilisation de la sondeuse durant un poste
A	Energie d'un choc, (kgf.m)
h	Hauteur de levage de la charge, (m)
d	Diamètre de l'outil, (mm)
C	Prix de revient d'un mètre de trou foré, (DA/m)
C_p	Dépenses se rapportant à l'exploitation de la machine de forage, (DA/poste)
C_{ou}	Prix de l'outil, (DA)
H	Métrage des trous forés se rapportant à un outil, (m)

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] L.KHOCHEMANE. Optimisation des paramètres des machines de forage à molettes dans les conditions de la carrière de OUENZA. Thèse de Doctorat, Annaba 2006.
 - [2] L.KHOCHEMANE. Augmentation de l'Efficacité Technique d'Utilisation des Machines de Forage Rotatif à Taillant Coupant. Magister, Université d'Annaba 1990.
 - [3] M.FREDJ. Etude du régime de forage dans les conditions de la carrière de calcaire (Chouf-Amar M'SILA). Mémoire de Magister en Mines, Annaba 2012.
 - [4] A.DALIA. Etude et détermination des régimes de fonctionnement des machines de forage roto-percutant dans les conditions des carrières de calcaire Algériennes. Thèse de Magister, Annaba 1988.
 - [5] S.MEHENNAOUI. Optimisation des Paramètres de Réglage d'une Sondeuse de Forage Rotatif. Thèse de Doctorat en sciences, Skikda 2015.
 - [6] G.MALEEV, V.GOULIAEV & N.BOIKO. Elaboration des projets et construction des machines minières et complexes. Edition NEDRA, Moscou 1988.
 - [7] G.RABINDER & V.KIRPITCHEV-KIK. Equipment minier et de forage. Edition NEDRA, Moscou 1983.
 - [8] O.ALIMOV & M.KRAPIVIN. Outil minier. Edition NEDRA, Moscou 1979.
 - [9] R.MURRAY & S.PIEGEL. Probabilité et statistique, Paris 1985.
 - [10] K.CHEIRETOV, A.KINOV & B.VASSILIEN. Manuel de projection des machines minières. Edition TECHNIKA, Sofia 1980.
 - [11] L.BARON & L.KOUZNITSOV. Appareils et moyens de contrôles des processus de forage. Edition NEDRA, Moscou 1989.
 - [12] I.BOUINY & N.TREBOUGOV. Sondeuses, Technologie et économie du forage à molettes. Edition NEDRA, Moscou 1975.
 - [13] E.MENDELI & L.G.KRASSAVINE. Machines minières et complexes. Edition NEDRA, Moscou 1975.
 - [14] M.OUADI & I.ASENVO. Machines de forage (1^{ère} partie). OPU, Alger 1990.
 - [15] R.PODERNI & B.CHRAINER. Machines minières et complexes automatisés pour les carriers. Edition NEDRA, Moscou 1979.
 - [16] L.BARON & L. GLATMAN. Outils de forage, Edition NEDRA, Moscou 1985.
 - [17] K.LAHMER. Recherche sur la valorisation des matériaux de construction d'Algérie. Thèse de Magister, Annaba 1984.
-

- [18] T.ATKINSON, V.B.CASSAPI & R.Morris. The Management of Synergistic Wear in Mineral Exploitation. "Anti-Wear '88", the Royal Society. PP 9.1-9.7.London, Sept 1988.
- [19] A.E.Hadjadj. Predicted fragmentation in Algerian's Mines. (Gorny Informatissimo-Analititchisky Bouliten. P.34-36-ISSN 0236 – 1493, 06/2001).
- [20] T.ATKINSON & V.B.CASSAPI. Prédiction et réduction de l'usure abrasive dans les machines d'excavation minières. Int Conf sur la tribologie de l'extraction minière. IMechE. Nottingham, Sept.1984.
- [21] E.D.YARDLEY. Matériaux résistants au port. Colliery Guardian, pp 8-16, Jan 1997.
- [22] N.S.M.BERRY & J.G.W.BROWN, Performance of Full Facers on Kielder Tunnels and Tunnellings, 9(4) 35-39, 1977.
- [23] T.ATKINSON. Confidential Report to World Wide Shipping Corporation PLC, 1983.
- [24] K.CHEIRETOV. Machines minières (1^{ère} partie). Edition TECHNIKA, Sofia 1987.
- [25] N.CHEIKCHOUK. Paramètres optimaux des chargeurs articulés. Thèse Magister, Annaba 1986.
- [26] J.C.MCKENZIE & G.S.DODDS. Mersey Kingsway Tunnel Construction. Proc. Instn. Civ. Engrs. Pan 1-5 I. 503-533, March 1972.
- [27] I.BOUINY & N.TREBOUGOV. Sondeuses, Technologie et économie du forage à molettes, Edition NEDRA, Moscou ,1975.
- [28] T.N.SINGH, A.JAIN & K.SARKAR. Paramètres pédophysiques affectant la peccabilité micro bits de la roche, Int. J. Exploitation minière et génie minier. Thèse, 1(3) 261-277,2009.
- [29] FICHER SONATRACH. Les paramètres de forage.59p.
- [30] CENERG GLOBAL TOOLS PVT. LTD. Bit catalogue, 11p.
- [31] S.BENCHEIKH & M.RABHI. Etude du choix des outils de forage dans le champ de Hassi-Messaoud. Mémoire de Master pro. En forage d'eau, Ouargla 2017.
- [32] F.MARTA, K.RIIHIOJA & G.CHITOMBO. Forage de matériaux composites en carbone à l'aide d'un bit de forage. Part I: Représentation en Cinq étapes et facteurs influent sur la force et le couple maximaux.70 –75, 2005.
- [33] E.TUNA. Optimisation en temps réel des paramètres de forage pendant l'opération de forage, une thèse soumise à l'université technique supérieure des sciences naturelles et appliqués du Moyen-Orient, 145p, 2010.
- [34] F.GRONDIN. Module second l'outil de forage. SONATRACH-Division forage, Edition Juin 2004.
-

- [35] FICHER SONATRACH. Choix Des Outils et paramètres de forage.
- [36] X.YOUBAI. Etude sur la théorie et la méthodologie de la conception moderne. Chin. J. Mech. Eng., 40(4), 1-9, 2004.
- [37] B.SOBHI, B.CHELLAL & H.GHOUL. Optimisation des paramètres mécaniques de forage (WOB et RPM) application au champ de Hassi Messaoud dans la phase 16'' et 6''. Mémoire de MASTER PROFESSIONNEL en Forage, Ouargla 2018.
- [38] K.GHALEM. Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage. Mémoire de magistère en forage et production, 87p, Ouargla 2015.
- [39] E.M.GALLE & WOOD. Poids constant et vitesse de rotation optimale pour les roches du Rotary. Présenté à la réunion de printemps du district de la cote du pacifique. API Division de Production, Mai 1963.
- [40] J.P.NGUYEN. Technique d'exploitation pétrolière de forage, institut français de pétrole, Edition TECHNIP 993, 369p.
- [41] NGOC Ha DAO. Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe. Thèse de Doctorat en Technique et Economie de l'Exploitation du Sous-sol. Paris, 179p, L'école nationale supérieure des mines de Paris 2014.
- [42] F.ZAHRI, M.L.BOUKELLOUL, R.HADJI & K.TALHI. Analyse de la stabilité des pentes dans les mines à ciel ouvert de la carrière de Jebel Gustar, NE Algérie, multi steps approach. Mining Science, 23, 137-146, 2016.
- [43] M.WILLIAM, U.HECTORET & al, Prédicateur de ROP unique à l'aide d'un coefficient de frottement et d'une efficacité mécanique spécifique au bit en fonction de la résistance compressive limitée impacts performance de forage, Chevron Texaco Energy Technology Company, SPE/IADC conférence de forage, 19p, 2005.
- [44] R.TEALE. Le concept d'énergie spécifique dans le forage de la roche. Int. J. Rock Mech. Mining Science, 1965.
- [45] H.HORRA. Approche adaptative d'optimisation des paramètres mécaniques de forage. Mémoire de Magister en forage et production, Boumerdès 2010.
- [46] K.RAIS. Recherche du régime rationnel de fonctionnement des installations de forage (Cas de la mine de Djebel-Onk). Thèse de Doctorat en science, Spécialité : Electromécanique, Skikda 2018.
- [47] S.A.BILLINGTONAN & K.A.BLENKARN. Vitesse de rotation constante et poids variable pour réduire les coûts de forage. Présenté à la réunion de printemps du district du milieu du continent, API Division de Production, Avril 1962.
-

- [48] E.M.GALLE & H.B. Poids variable et vitesse de rotation pour le coût de forage le plus faible, présenté à la réunion annuelle de AAODC, New Orleans 1960.
- [49] J.P.WANG, Y.Z.CHEN, X.W.GE & H.Q.YU. Optimisation du processus de Coagulation-Floculation pour le recyclage du papier de traitement des eaux usées à l'aide de la méthodologie de la surface de réaction. Colloques et Surfaces A: Aspects physico-chimiques et techniques, Volume 302(1-3), pp. 204–210, 2007.
- [50] O.VINCENT. Optimisation des performances du bit d'exploration à l'aide du simulateur DROPS, thèse de magister en Génie pétrolier: Université d'état Major, Faculté des sciences et de la technologie, 127p, 2010.
- [51] A.C.SEIBI. Force de roulement dans les puits de moyenne à haute courbure: Une étude expérimentale et une simulation numérique des cas de laboratoire et de terrain. Transactions-American society of mechanical engineers journal of energy resources technology, 123(2), 133-137, 2001.
- [52] P.J.ROSS. Technique de Taguchi pour l'ingénierie de la qualité : Fonction de perte, Expérience orthogonales, conception des paramètres et de la tolérance. 2^{ème} Edition, New York, NY: Mc Graw Hill, 1996.
- [53] N.ANDREAS, D.T.K.Mathematical & al. Modélisation appliqué à l'ingénierie de forage: Application d'un modèle de Bourgoyne and Young ROP à une étude de cas préalte, 9p.
-

*Communications et
Publications*

Communications et Publications

I- Communications

1- Participation: à 3^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle (CIMSI'2015); 09-10 Novembre, 2015.Skikda :"**Proposition d'une gamme d'entretien des engins**".

Auteurs : Moufida BENMOUSSA, Lakhdar KHOCHMANE.

2- Participation: The 3rd International Symposium on Mineral Industry and Environment (3SIMINE'17); 11-12 et 13 Octobre, 2017.Annaba :"**Entretien et réparation des engins au niveau de Gisement de Fer de Bouhkadra**".

Auteurs : Moufida BENMOUSSA, Zina RABBOUCHE, Lakhdar KHOCHMANE.

3- Participation: The 3rd International Symposium on Mineral Industry and Environment (3SIMINE'17); 11-12 et 13 Octobre, 2017.Annaba :"**Etude de la détermination du régime de fonctionnement rationnel des machines de forage percutant**".

Auteurs : Zina RABBOUCHE, Moufida BENMOUSSA, Lakhdar KHOCHMANE.

4- Participation: à 4^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle (CIMSI'2017); 20-21 Novembre, 2017.Skikda :"**Elaboration d'un plan de maintenance par la méthode MBF sur un Aéro-réfrigérant**".

Auteurs : Moufida BENMOUSSA, Lakhdar KHOCHMANE.

5- Participation: The International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics (ISIEAM'2018); 23-24 Octobre, 2018.Skikda :"**Etude et amélioration d'un compresseur a piston au niveau d'unité « COX » à Arcelor Mittal - Annaba**".

Auteur : Moufida BENMOUSSA.

6- Participation: The 3rd International Conference on Electromechanical Engineering (ICEE'2018); 21-22 Novembre, 2018.Skikda:"**Etude et maintenance d'une turbine Gaz**".

Auteurs : Moufida BENMOUSSA, Fouad INEL.

II-Publications

1- "**Study and Determination of Rational Operating Ratio for Percussion Drilling Machines**", Journal of Fundamental and Applied Sciences, Vol 12 (2), **ISSN 1112-9867**,pp 755-773 (2020), <http://www.jfas.info>.
