

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université du 20 Août 1955 Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



Réf : D012122012D

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Electromécanique

Spécialité : Mécanisation Industrielle

THEME

**Amélioration du rendement d'un marteau
perforateur
(dans les conditions des carrières Algériennes)**

Présentée par :

NEMOUCHI SAMIA

Devant le Jury composé de :

Président	BOUZAOUIT Azzedine	Professeur	Université d' Skikda
Rapporteur	HADJADJ AOUL Elais	Professeur	Université d' Annaba
Examineurs	DEKHMOCHE Mohamed tahar	MCA	Université d' Annaba
Examineurs	INEL Fouad	MCA	Université d' Skikda

Pensée

J'aimerais exprimer ici ma tristesse à la disparition de

M.Pr. KHOCHEMANE Lakhdar.

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

jamais ce qu'il a fait pour moi.

Toutes mes condoléances à sa famille et ses proches,

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

paradis.

À Dieu nous appartenons et à Dieu nous retournerons.

Dédicaces

*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 toute ma famille

A tous mes amis.

Remerciements

*Nous tenons à remercier et exprimer notre gratitude et
Reconnaissance tout d'abord à ALLAH, le tout puissant,
Qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail. et c'est bien
normal, à mon directeur de thèse le professeur HADJADJ
Aoul Elias qui a accepté d'assurer mon encadrement, il
m'a encouragé, soutenu et surtout fait confiance durant
ces années. j'ai beaucoup appris à son contact et le
.remercie pour tout ce qu'il m'a apporté*

Résumé

Résumé :

Dans notre travail on a étudié le mode de forage percutant avec différentes méthodes en se basant sur les propriétés physicomécanique de la roche, paramètres de réglage de la machine, paramètres géométriques de l'outil

Le but de recherche présenté consiste à élaborer les méthodes de la détermination des paramètres du régime rationnel de fonctionnement de la machine de forage percutant lors de son exploitation dans les conditions géologiques et minières définies.

Il est nécessaire d'analyser les méthodes existantes des calculs des paramètres de fonctionnement du régime de forage percutant et déterminer les valeurs numériques des propriétés mécaniques des roches nécessaires pour faire le calcul correspondant et 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 puis proposer une méthode de la détermination des paramètres rationnels du forage percutant ayant les meilleurs résultats et déterminé les valeurs optimales de réglage de la machine de forage percutant.

Après avoir comparé les résultats des méthodes théoriques avec les résultats expérimentaux, constaté que la théorie de KARBATCHV est la meilleure Par conséquent, nous recommandons d'appliquer ce dernier lors de l'utilisation de forets à percussion pour les mêmes conditions dans la carrière de calcaire Hdjar-Soud.

Mot clés : vitesse de forage, roche, productivité, force axiale, paramètre de réglage

Abstract:

In our work, we studied the percussive drilling mode with different methods based on the physic mechanical properties of the rock, machine adjustment parameters, geometric parameters of the tool

The purpose of the presented research consists in developing methods for determining the parameters of the rational operating regime of the impacting drilling machine during its operation in the defined geological and mining conditions.

Résumé

It is necessary to analyze the existing methods of calculations of the operating parameters of the percussive drilling regime and determine the numerical values of the mechanical properties of the rocks necessary to make the corresponding calculation and apply the listed calculation methods in order to determine the values of the drilling speed

Carry out experimental research in order to verify the calculation methods in order to compare and analyze them, then propose a method for determining the rational parameters of the impacting drilling having the best results and determining the optimal adjustment values of the impacting drilling machine.

After comparing the results of theoretical methods with experimental results, found that KARBACHV's theory is the best Therefore, we recommend applying the latter when using impact drills for the same conditions in the Hdjar-Soud limestone quarry.

Keywords: drilling speed, productivity, rock, axial force, setting parameter

الملخص :

في عملنا، درسنا وضع الحفر الإيقاعي بطرق مختلفة بناء على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للصخور، ومعلمات ضبط الماكينة والمعلمات الهندسية للأداة. يتمثل الغرض من البحث المقدم في تطوير طرق لتحديد معايير نظام التشغيل الرشيد لآلة الحفر المؤثرة أثناء تشغيلها في الظروف الجيولوجية والتعدين المحددة. من الضروري تحليل الطرق الحالية لحسابات معلمات التشغيل لنظام الحفر الإيقاعي وتحديد القيم العددية للخصائص الميكانيكية للصخور اللازمة لإجراء الحساب المقابل وتطبيق طرق الحساب المدرجة من أجل تحديد قيم سرعة الحفر. إجراء البحوث التجريبية من أجل التحقق من طرق الحساب من أجل مقارنتها وتحليلها، ثم اقتراح طريقة لتحديد المعلمات العقلانية للحفر المؤثر مع الحصول على أفضل النتائج وتحديد قيم الضبط المثلى لآلة الحفر المؤثرة. بعد مقارنة نتائج الأساليب النظرية مع النتائج التجريبية، وجدت أن نظرية كارباشيف هي الأفضل لذلك، نوصي بتطبيق هذا الأخير عند استخدام المناقب الصدمية لنفس الظروف في مقلع الحجر الجيري حجار السود.

الكلمات المفتاحية : سرعة الحفر، الإنتاجية، الصخور، القوة المحورية، الضبط.

Liste des figures	Page
Figure .I.1.a : Destruction de la roche lors de divers modes de forage	5
Figure. 1.1.b : Valeurs relatives de l'effort axial P_{ax} ; de la Puissance de rotation N_r ; et de la puissance de Choque N_{ch} ; lors de divers modes de forage	6
Figure. I.2: vue générale du perforateur	11
Figure I.3: Principe de fonctionnement du perforateur pneumatique	13
Figure. I.4:Dispositifs de distribution d'air comprimé par soupape	15
Figure I.5 : Mécanisme de rotation dépendant	17
Figure I.6: Schéma simplifié le principe de fonctionnement du Marteau perforateur	18
Figure II.1 : Extrait de la carte région azzaba	20
Figure. II.2: Les différentes formations rocheuses de Hadja-soud de lieu de travail	22
Figure. II.3 : Stand de la détermination de l'abrasivité	24
Figure. II.4 : Stand pour la détermination de l'indice de la résistance à l'empreinte	25
Figure. II.5:Fleurets du marteau perforateur	29
Figure. II.6 : Emmanchement de fleurets	30
Figure. II.7 : Types de taillants du perforateur.	31
Figure. II.8 : Dépendances de la vitesse de forage (V_f) de la pression d'air comprimé (P_a), de l'effort axial (F) et de l'angle de rotation du fleuret par coup (β)	32
Figure. II.9 :Stand expérimental	33
Figure. II.10: Schéma principal du stand d'essai du perforateur (IMGA, Bulgarie)	33
Figure.III.1: Marteau perforateur (RH658 L)	35
Figure.III.2: Schéma de détermination des paramètres de base des perforateurs .	37
Figure. III.3 : Le piston du perforateur.	40
Figure.III .4 : Schéma de la section longitudinal du piston du perforateur.	40
Figure III.5 : La variation de la vitesse de forage en fonction de la pression d'air comprimé par les deux méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV)	44
Figure. III.6 : La variation de la vitesse de forgeage expérimentale en fonction de la pression d'air comprimé.	47
Figure .IV.1: Productivité d'exploitation en fonction de la vitesse de forage de la méthode de (V.SEMENOV).	54
Figure .IV.2: Productivité d'exploitation en fonction de la vitesse de forage par la méthode de(A.KARBATCHV).	55

Figure .IV.3: Productivité d'exploitation en fonction de la vitesse de forage par la méthode expérimentale.	56
Figure. IV.4: Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air comprimé (V.SEMENOV).	59
Figure. IV.5 : Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air Comprimé (KARBATCHEV).	60
Figure. IV.6 : Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air Comprimé (expérimentale).	61
Figure. IV.7: Comparaison graphique des résultats de calcul de la productivité (rendements) d'exploitation par les trois méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV, expérimental).	62
Figure. IV.8: comparaison graphique des Résultats de calcul du prix de revient d'un mètre du trou foré par les trois méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV, expérimental).	62

Liste des tableaux	Page
Tableau. I.1 : types des machines de forage.	06
Tableau. I.2 : Domaine d'utilisation de divers mode de forage.	07
Tableau. I.3: classification des perforateurs selon le poids kg.	09
Tableau. II.1 : Résultats de l'indice de solidité ; kgf/cm ² .	23
Tableau. II.2. Résultats de l'indice d'abrasivité (a), mg.	24
Tableau. II.3: Résultats de l'indice de la résistance à l'empreinte (Pk);kgf/mm ² .	26
Tableau. II.4: Résultats de l'indice de la résistance à la compression [kgf /cm ²].	27
Tableau. II.5 : Valeurs de l'angle d'affûtage du taillant φ (dégre).	28
Tableau.III.1: Caractéristiques techniques d'un marteau perforateur type Atlas Copco (RH658L).	36
Tableau. III.2: Résultat de calcul des paramètres de travail d'un marteau perforateur utilisé dans les conditions de la carrière de Hadja-Soud.	41
Tableau .III. 3: La variation de la vitesse de forage en fonction de la pression d'air comprimé par les deux méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV).	43
Tableau. III.4 : Résultat de l'étude expérimentale d'un marteau perforateur travaillant dans les conditions de la carrière (Hadja-Soud) (Algérie).	44
Tableau.III. 5 : Résultat de détermination de la méthode de Moindres carrés.	46
Tableau.III.6 : Résultat de détermination le Coefficient de Corrélation.	47
Tableau. IV.1: Productivité (rendements) par la méthode de (V.SEMENOV).	53
Tableau. IV.2: Productivité (rendements) par la méthode de (A.KARBATCHV).	54
Tableau. IV.3: Productivité (rendements) par la méthode expérimentale.	55
Tableau. IV.4 : Résultat de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (V.SEMENOV).	58
Tableau. IV.5 : Résultats de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (KARBATCHEV).	59
Tableau. IV.6 : Résultats de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (expérimentale).	60
Tableau. IV.7: Paramètres optimaux du marteau perforateur.	63

Table des matières

Page

Introduction générale.....	01
 CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MARTEAUX PERFORATEURS	
I.1. Introduction	
I.2. Etat actuel de la détermination des travaux de forage aux moyens des machines de forage percutant (marteau perforateur).....	03
I.3. Argumentation sur le choix du mode de forage	03
I.3.1. Mode de forage rotatif	
I.3.2. Mode de forage roto-percutant	08
I.3.3. Mode de forage percutant	09
I.4. Les marteaux perforateurs	09
I.4.1. Classification des perforateurs pneumatiques	09
I.4.1.1. Perforateur pneumatique à main	09
I.4.1.2. Perforateur pneumatique à colonne	10
I.4.1.3 :Perforateur pneumatique télescopique	10
I.4.2. Construction du marteau perforateur pneumatique.....	10
I.5. Principe de fonctionnement	10
I.6. Dispositifs de distribution d'air comprimé	12
a) Dispositif de distribution d'air comprimé par soupape	13
b) Dispositif de distribution par soupape annulaire.....	14
I.7 . Mécanisme de rotation	14
I.8. Exigences d'exploitation des perforateurs	16
I.9. Conclusion	17
 CHAPITRE II : LES PROPRIETES PHYSICOMECANIQUES DE LA ROCHE ET CHOIX DE L'OUTIL	
II.1. Introduction	
II.2. Analyse des propriétés physico-mécaniques des roches influant sur le processus de forage.....	19
II.2.1. Situation du gisement.....	19
II.2.2. Géologie du gisement.....	19
	20

II.2.2.A. Lias	21
II.2.2.A.1. La dolomie du lias	21
II.2.2.A.2. Calcaire du lias.....	21
II.2.2.B. Jurassique	21
II.2.2.C. Crétacé.....	21
II.3. Les principales propriétés physico-mécaniques des roches	22
II.3.1. Détermination de la dureté, de l'abrasivité de la solidité et de la résistance l'empreinte	22
A. Indice de Solidité des roches ou dureté.....	22
B. Indice de l'abrasivité.....	23
C. Indice de la résistance à l'empreinte	24
D. Indice de la résistance à la compression.....	27
II.3.2. Résultat et discussion.....	27
A. Influence de l'abrasivité sur la vitesse de pénétration.....	27
B. Influence de la résistance à la compression R_c et la résistante à l'empreinte P_k	28
II.4. Choix de l'outil de forage	28
II.4.1. Outil de travail	28
II.4.1.1 . Les fleurets	28
II.4.1.2. Les type de taillants	30
II.5. Les essais des perforateurs	32
II.6: Conclusion :.....	34
CHAPITRE III : LES METHODES DE LA DETERMINATION DES PARAMETRES D'UN MARTEAU PERFORATEUR	
III.1. Introduction	35
III.2. Les paramètres de base du perforateur pneumatique.....	35
III. 2.1. Détermination des forces appliquées au piston.....	36
III.2.2. Détermination des vitesses maximales du piston.....	37
III.2.3. Détermination du nombre de coups du piston.....	38
III.2.4. Détermination du nombre de coups du piston	39
III.2.5. Détermination de l'énergie d'un coup du piston du perforateur	40
III.2.6: déterminer l'angle de rotation du fleuret par un coup.....	40

III.2.7: Détermination de la consommation de l'air comprimé.....	41
III.3.choix de régime de fonctionnement de la machine de forage percutant (la vitesse de forage)	42
III.3 .1. La vitesse de forage par la méthode de V.SEMENOV.....	42
III.3 .2. La vitesse de forage par la méthode de KARBATCHEV.....	43
III.3.3. La vitesse de forage expérimentale.....	44
III.3.3.1. La méthode de moindre carré	45
III.3.3.2. le coefficient de corrélation.....	46
III.4. Conclusion	48
CHAPITRE IV : CRITERE DE CHOIX DU REGIME RATIONNEL DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE	
IV.1. Introduction	49
IV.2. Détermination de la productivité des machines de forage percutant	49
IV.3. Critères et modes du choix du régime de fonctionnement rationnel des machines de forage	56
III.4. Comparaison des résultats de calcul obtenus théoriquement avec les résultats expérimentale	61
IV.5.Détermination du régime rationnel de fonctionnement des machines de forage percutant	63
IV.6. Conclusion	63
Conclusion générale.....	64

INDRODUCTION GENERALE

Introduction Générale :

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

La communauté d'ingénierie a tenté d'influencer l'utilisation de l'énergie pour forer des formations rocheuses dès la fin des années 1940 quand elle a développé un certain nombre de machines de forage [2] [3][4][5] Jusqu'à présent, les méthodes de forage les plus utilisées pour le dynamitage sont le forage percutant, roto-percutant, rotatif [6]. La technologie de forage joue un rôle majeur dans l'industrie minière algérienne. En fait, il serait juste de dire que l'optimisation des paramètres de forage est une partie intégrante de la réussite économique ou l'échec de toute exploitation minière [7] [8]. L'utilisation de la machine de forage appropriée est toujours associée avec le coût de l'excavation et le coût global du projet [9]. Les opérateurs et les fabricants ne cessent d'explorer les moyens de réduire les coûts et accroître la productivité en améliorant la vitesse de pénétration de forage et de diminuer l'usure de l'outil de forage [10],

La consommation d'énergie [11] [12] et les vibrations produites dans la tige. La vitesse de pénétration est généralement acceptée comme l'un des paramètres les plus importants dans la planification des travaux de forage dans les gisements miniers et l'estimation des coûts [13], donc la prédiction de la vitesse de pénétration, est essentielle pour évaluer le total des coûts de forage à l'aide d'une équation de prédiction [14]. En outre peut utiliser cette équation pour sélectionner le type de la machine de forage le mieux adapté à des conditions données [15]. La vitesse de pénétration dépend principalement à des variables opérationnelles ainsi que les propriétés de la roche. Cependant, les variables opérationnelles sont connues en tant que paramètres contrôlables, en cite entre autres, la vitesse de rotation, la poussée, la fréquence de soufflage et le rinçage. Cependant, les propriétés des roches dans les conditions géologiques et minières sont des paramètres incontrôlables [16][17][18] a ainsi amélioré les facteurs qui permettent de contrôler et de lier la vitesse de pénétration et la caractéristique des roches, car la force de forage et la vitesse influencent l'excès d'usure des dents de forage [29][20][21][22] et donc augmenter le

coût de production [23] [24] Afin d'extraire les valeurs optimales de production, ce travail présenté qui divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre consacré à parler de la machine et à la présenter, car le choix de la mécanisation a un grand impact sur les coûts et les rendements. Quant au deuxième chapitre, consacré à l'étude des propriétés physico-mécaniques des roches afin de choisir l'outil de forage approprié. Alors que le troisième chapitre consacré à l'étude des méthodes et paramètres de la machine de forage et de l'effet de la pression d'air sur la vitesse de forage, quant au quatrième chapitre, une comparaison faite entre les résultats obtenus et l'étude du prix de revient pour trouver la meilleure théorie de la carrière Hdjar -Soud

CHAPITRE I

**Généralités sur les marteaux
perforateurs**

I.1. Introduction :

Le choix de la mécanisation a une incidence directe sur la production, les prix et ce d'autant plus que les investissements sont élevés. En ce qui concerne la production nationale, l'objectif que se fixent nos mines et carrières est celui d'une exploitation optimale des ressources Algériennes en tenant compte de leurs diverses caractéristiques techniques, économiques, et humaines.

Ceci, donne à réfléchir sur les travaux à effectuer et parmi eux le processus de forage. Le forage peut être réalisé par différentes machines, que nous pouvons réunir en deux grands groupes : les marteaux perforateurs et les sondeuses [25]. Les études de forage sont principalement basées sur l'approche empirique. Il existe différentes manières de définir la capacité de forage de la roche. Le concept d'énergie spécifique a été proposé par Teale [26], Miller [27] Et Pathinkar et Misra [28] comme un guide pour évaluer l'aptitude à la roche. Rabia [29] que l'énergie spécifique en termes de volume unitaire ou de surface ne constitue pas une propriété intrinsèque de la roche. Le forage percutant est largement utilisé dans l'industrie minière et la construction de trous dans la roche. Habituellement, le forage de la roche, contenant un marteau alternatif, est placé trou, Le mode de forage percutant est très répandu lors de l'exploitation des gisements de minerai [30].

I.2. Etat actuel de la détermination des travaux de forage aux moyens des machines de forage percutant (marteau perforateur):

Le forage est l'action de creuser un trou (aussi appelé « Puits » dans le domaine de la prospection) dans la Terre. L'équipement du puits, tel les tubages, et de manière générale, les moyens techniques permettant de creuser, varient en fonction de son dimensionnement et de ses objectifs. Fore pour prospecter et/ou exploiter le sous-sol.

À titre d'exemple, des puits sont forés pour :

- ✓ Trouver et exploiter des ressources naturelles enfouies (eau, pétrole, ressources minières).
- ✓ La géotechnique.
- ✓ La géothermie.
- ✓ La recherche scientifique pure.

Les moyens techniques mis en œuvre diffèrent largement : de la foreuse manuelle, à la foreuse légère et mobile pour les forages de moins de 10 mètres, à une plate-forme pétrolière pour l'exploitation pétrolière offshore [31].

Les machines de forage utilisées pour le creusement des trous dans les carrières sont divisées en général en deux (2) groupes :

- Avec la destruction mécanique de la roche par l'outil spécial ;
- Avec la destruction physique de la roche ;

Les machines du premier groupe qui sont à leur tour les plus répandues, peuvent être divisées d'après le caractère du travail de l'outil et l'application des charges. Ce sont les machines de forage rotatif, percutant et roto percutant.

Le schéma de la destruction de la roche au fond du trou au cours de divers mode de forage est présenté sur la (Figure I.1.a).

La (Figure I.1.b) reflète la distribution des valeurs relatives à l'effort axial (P_{ax}), à la puissance du choc (N_{ch}) et à la puissance de rotation (N_r).

La pratique du forage témoigne que l'efficacité de l'application des machines de forage est déterminée par l'ensemble des facteurs parmi lesquels on distingue :

Les conditions minières et géologiques, ainsi que les schémas technologiques de la réalisation des travaux miniers.

Les facteurs du premier groupe (propriétés physico mécaniques des roches, composition structurelle du talus, viscosité des roches) influent sur les indices technico-économiques et déterminent le type de l'outil à appliquer et le moyen de nettoyage des trous.

Les facteurs du deuxième groupe (type des machines à charger ; éléments des méthodes d'exploitation) forment les exigences à la profondeur et au diamètre du trou. Une généralisation des recherches effectuées dans ce domaine [32][33][34] 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.

Dans ce cas la tendance générale consiste à la diminution de la productivité des machines de divers types avec l'accroissement de la dureté des roches. Il est à noter que la diminution rapide de la productivité des machines. Le phénomène peut être expliqué par la considération des relations des dépenses d'énergie spécifique et de la durée de vie de l'outil en fonction de la dureté des roches.

La destruction des roches

se déroule dans le régime de frottement et de glissement ce qui détermine la durée basse de l'outil ou dans le cas où la dureté des roches s'accroissent.

L'épaisseur du copeau diminue et par conséquent le volume des déblais augmente ; Tout cela provoque comme on sait d'après les hypothèses de RABENDER et KIRPITCHEV-KIK l'accroissement des dépenses d'énergie.

La productivité relativement haute des machines de forage percutant ne peut être expliquée que dans ce cas, on ne considère que les sondeuses permettant à forer des trous de diamètres inférieurs aux autres modes de forage.

Un des indices économiques caractérisant le travail des machines de forage est le prix de revient d'un mètre de trou foré, les valeurs relativement hautes de cet indice pour les machines à molettes sont liées à leur haut prix.

Il est à signaler que le diamètre des trous égal à 50 mm pour les perforateurs, 100mm pour les machines à outil coupant, 150 mm pour les machines Roto percutante et 200mm pour les sondeuses à molettes détermine le rendement de la masse rocheuse d'un mètre du trou. C'est pourquoi l'application des machines de forage possédant de grand diamètre de l'outil s'accompagne comme règle générale par la diminution des dépenses spécifiques d'une unité de volume du massif abattu, cependant le degré rationnel de broyage du massif de la roche doit être pris en considération [35].

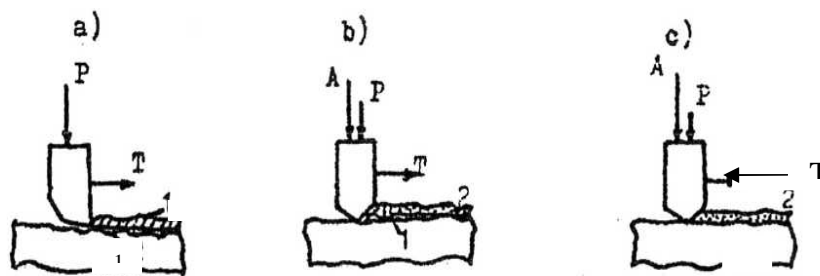


Figure J.1.a : Destruction de la roche lors de divers modes de forage.[35]

a) Rotatif

b) Roto percutant.

c) Percutant

A → Impulsion d'une force de choc.

P → Effort axial.

T → Effort tangentiel.

1 → Destruction de la roche par coupe.

2 → Destruction de la roche par choc.

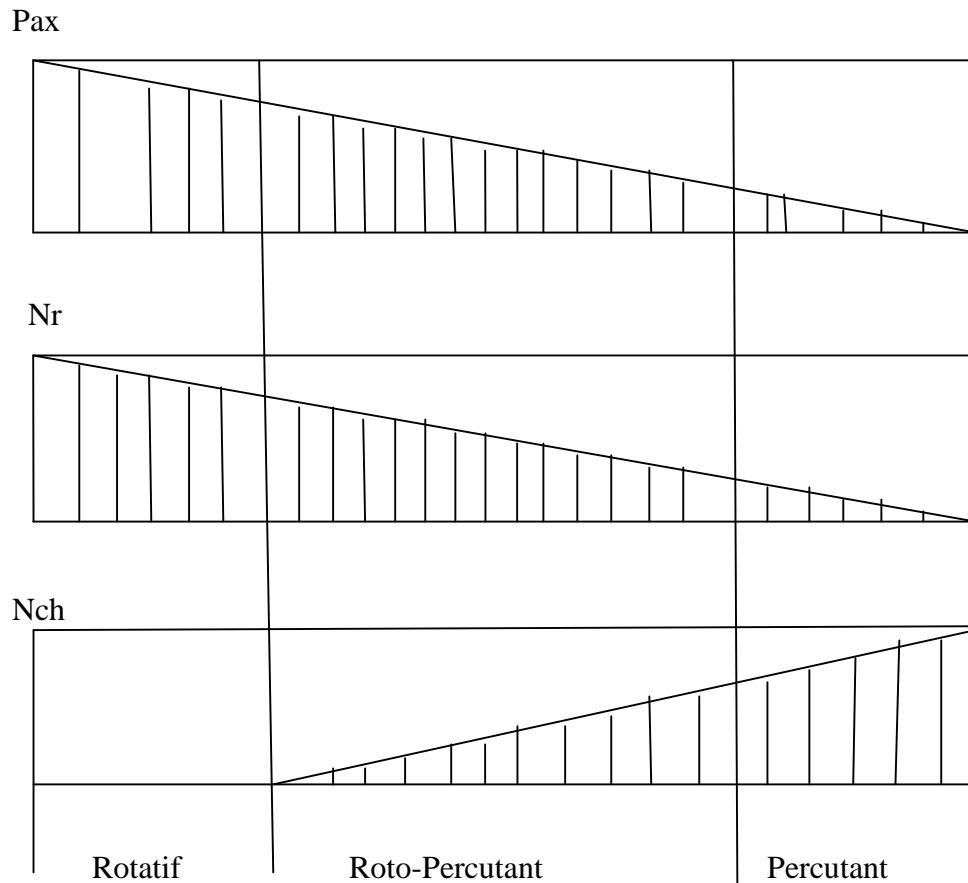


Figure. 1.1.b : Valeurs relatives de l'effort axial P_{ax} ; de la Puissance de rotation N_r ; et de la puissance de Choque N_{ch} ; lors de divers modes de forage . [35]

































I.3. Argumentation sur le choix du mode de forage :

D'après le mode de forage, il existe trois modes de forage (tableau I.1).

Tableau. I.1 : types des machines de forage. [36]

Mode de forage	Dureté (Kgf/cm)	Profondeur de forage (m)	Diamètre de sondage (mm)
Rotatif	10÷20	à 50	33÷78
Roto percutant	8÷20	à 50	85÷160
Percutant	6÷20	40	150÷300

Tableau. I.2 : Domaine d'utilisation de divers mode de forage. [37]

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

Dans plusieurs cas l'application du grand diamètre peut provoquer la nécessité d'une large utilisation des débitages secondaires ou bien d'augmenter la puissance des machines de chargement et de transport. Les conditions les plus favorables pour l'utilisation de grands diamètres sont les massifs ayant la grande dureté et en même temps les caissons de la roche.

Une telle combinaison des conditions minières et géologiques conditionne l'utilité de l'application des trous de diamètre 120 à 150mm pour recevoir une bonne fragmentation de la roche.

L'analyse des caractéristiques techniques des machines à forer existantes nous a permis de déterminer le domaine d'utilisation de divers modes de forage réalisé par ces machines (voir tableau.1.2) 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 cités ci-dessus et par les particularités de construction des marteaux perforateurs.

Par exemple la limite inférieure du diamètre du trou foré à l'aide d'une couronne est restreinte par les facteurs constructifs. La profondeur du forage pour les autres modes se limite par l'efficacité des moyens de nettoyage, ainsi le tableau cité permet, en sachant les propriétés physico mécaniques des roches, et les paramètres de tir déterminés de nommer le mode de forage préalable ; bien qu'il faut avoir en vue d'autres facteurs qui influent sur le choix des machines à forer (niveau de formation des cadres, existence des bases de réparation).

Le forage percutant réalisé jusqu'ici principalement pour la perforation des trous dans les roches de n'importe quelle dureté ayant des forces de compression jusqu'à 1500 bars.

Toute augmentation de la pression d'alimentation entraîne ou provoque en principe un accroissement de la vitesse de pénétration. Des essais permettent de déterminer la pression assurant un optimum entre la vitesse de pénétration et l'usure de l'équipement [38].

La pression ne doit pas non plus être excessive car la machine risquerait d'augmenter les vibrations.

I.3.1. Mode de forage rotatif :

Il est réalisé par les machines à forer suivantes : tarières électriques (pneumatiques et hydrauliques) à main ; tarières électriques à colonnes ; sondeuses à vis sans fin ; sondeuses à molettes ; sondeuses à grenaille et sondeuses à couronnes à diamant.

I.3.2. Mode de forage roto-percutant :

Le forage roto- percutant des roches s'effectue à l'aide d'un marteau perceur plongé dans le trou qui est fixé à l'extrémité inférieure de la colonne de forage. L'avancement du perceur contre la taille se fait par le mécanisme d'avancement à chaîne, par les vérins hydrauliques. Le couple de rotation est transmis à la colonne de forage de l'entraînement électrique, hydraulique ou pneumatique.

Ainsi la progression du trépan est provoquée par l'action simultanée d'un effort axiale et d'une percussion. La percussion et le couple de rotation agissant simultanément ont, pour effet, le découpage de la roche sur toute la section du trou de mine.

I.3.3. Mode de forage percutant :

Le mode de forage percutant est très répandu lors de l'exploitation du gisement de minerais. La forassions des trous de mine est réalisée par les marteaux perforateurs manuels avec les supports pneumatiques par les perforateurs télescopiques et par les perforateurs à colonnes. Lors du creusement des ouvrages souterrains les perforateurs lourds et les perforateurs à colonnes peuvent être installés sur les supports mobiles de la plate-forme automotrice (du chariot).

I.4. Les marteaux perforateurs :**I.4.1. Classification des perforateurs pneumatiques :**

Les marteaux perforateurs ou perforateurs sont destinés au forage des trous de mines dans les formations très dures, dures et moyennes. On les utilise souvent dans les mines souterraines, dans les exploitations à ciel ouvert et dans le domaine de la construction.

Le classement des perforateurs, s'effectue selon certains indices :

- L'énergie utilisée – électrique, pneumatique ou hydraulique ;
- La destination – perforateur à main, à colonne et télescopique ;
- Le poids :

Tableau. I.3: classification des perforateurs selon le poids kg. [39]

perforateurs	à main	à colonne	télescopique
léger	< 15	< 40	< 35
moyen	15_25	40_50	35_40
lourd	> 25	> 50	> 40

- La construction des mécanismes d'avancement- mécanique, pneumatique et hydraulique ;
- La construction des mécanismes de rotation – dépendante et indépendante ;
- La construction des mécanismes de distribution de l'air comprimé- à soupape, sans soupape et à tiroir.

L'utilisation des perforateurs pneumatiques est très répandue dans les travaux miniers, vu les avantages qu'ils présentent, tels que : la simplicité de la construction en comparaison aux autres types, un rendement assez élevé et une sûreté pendant le fonctionnement.

Les perforateurs pneumatique présentent aussi certains inconvénients, tels que ; les grandes vibrations reçues par le corps de l'opérateur ; le bruit assez important, provoqué lors du fonctionnement et l'utilisation de l'énergie pneumatique qui revient assez cher.

I.4.1.1.Perforateur pneumatique à main :

Ce type de marteau est utilisé lors du forage des trous horizontaux et inclinés. Le diamètre des trous varie de 30 à 55 mm et la profondeur de forage de 3 à 4m.

I.4.1.2.Perforateur pneumatique à colonne :

On les trouve aussi, lors du forage des trous horizontaux et inclinés, pour des diamètres qui varient de 40 à 85mm et des profondeurs plus importants jusqu'à 40m.

I.4.1.3.Perforateur pneumatique télescopique :

On l'utilise, lors du forage des trous verticaux et inclinés dont le diamètre varie de 40 à 85mm et la profondeur jusqu'à 15m.

I.4.2. Construction du marteau perforateur pneumatique :

Les mécanismes et dispositifs composant le perforateur pneumatique sont les suivants :

- mécanisme de frappe ;
- mécanisme de rotation ;
- dispositif de distribution de l'air comprimé ;
- dispositif de graissage ;
- dispositif de lavage du trou ;
- dispositif de soufflage du trou ;

Le perforateur pneumatique est une machine à percussions composée d'un cylindre, d'une roue à rochet, d'un dispositif de distribution d'air comprimé, d'un piston, d'une douille, d'une tige hélicoïdale et d'un mandrin.

L'admission de l'air comprimé s'effectue à travers la roue à rochet et le distributeur d'air comprimé. Le déplacement du piston de gauche à droite constitue la course de travail et se réalise à l'aide de la pression d'air comprimé. Le cylindre étant séparé par le piston en deux chambres, l'une sous pression (chambre gauche), l'autre en dépression (chambre droite) cela pendant le forage ; lors de la course à vide, le rôle des deux chambres est inversé.

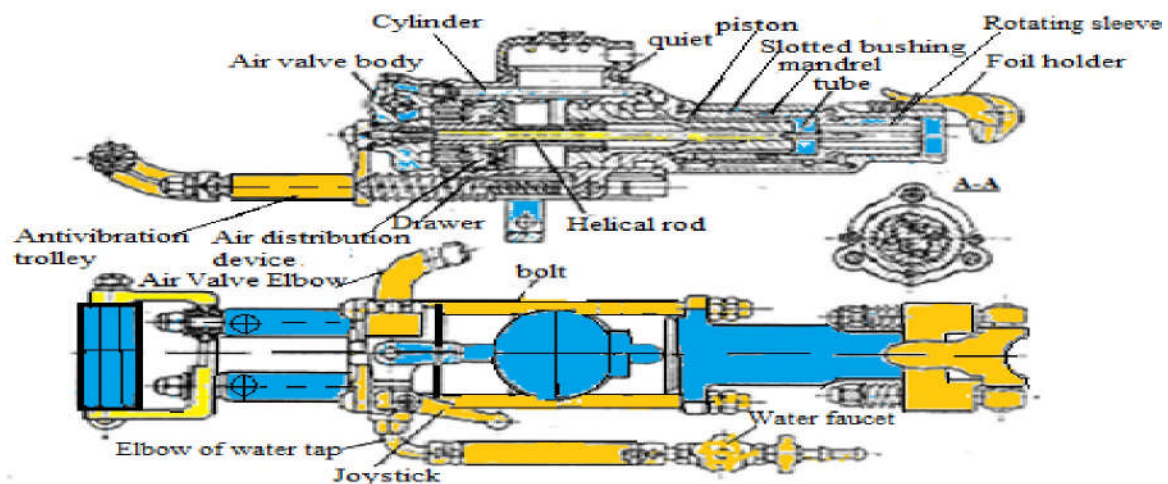


Figure. I.2: vue générale du perforateur. [40].

1. cylindre ; 2.corps du robinet d'air ; 3.mandrin ; 4.porte-fleuret ; 5.boulon ; 6.dispositif de distribution d'air ; 7.piston ; 8.tige hélicoïdale ; 9.tube ; 10.silencieux ; 11.chariot antivibratoire ; 12. Manette de commande ; 13.douille à rainures ; 14. Douille tournante ; 15. Tiroir ; 16. Coude du robinet à air ; 17.robinet à eau ; 18.coude du robinet à eau.

L'air comprimé qui pénètre dans la chambre droite est réparti à l'aide du mécanisme de distribution. Le piston commence à se déplacer, à la fin de sa course, il frappe sur l'emmanchement du fleuret sans aucune rotation car la tête de la tige hélicoïdale tourne librement dans la roue à rochet. Pendant la course à vide du piston, la tête de la tige hélicoïdale et fixée dans la roue à rochet par les cliquets ; le piston tourne d'un certain angle en se vissant à la tige hélicoïdale, cette rotation du piston est transmise au fleuret à travers la douille à cannelures et la douille tournante. La commande du perforateur pneumatique est assurée par une manette à quatre positions :

- Soufflage du trou.
- Arrêt.
- Fonctionnement en moyenne puissance.
- Fonctionnement en plein puissance.
- Le graissage est assuré par un graisseur automatique monté sur le corps du marteau.

I.5.Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du perforateur est assuré à l'aide du dispositif de distribution de l'air comprimé qui alimente successivement les chambres gauche et droite du cylindre. Cela permet au piston s'effectuer son mouvement alternatif (va et vient) et un mouvement de rotation au fleuret.

Le diagramme de fonctionnement du mécanisme de frappe montre la dépendance entre la position du piston dans le cylindre pendant les courses allé et retour, la pression d'air dans les chambres et la vitesse de mouvement du piston.

La course retour du piston **A** (figure I.3a) débute sous l'action de la pression d'air comprimé **P** passant par le dispositif de distribution **B**, le canal **C**, pour pénétrer dans la chambre droite. Dans le diagramme de la figure (I.3.b), sont présentées les variations de la pression d'air comprimé et des vitesses d'avancement du piston **V** en fonction des courses du piston **L** .l'air comprimé pénètre à travers le dispositif de distribution **B**, le canal **C** dans la chambre droite du cylindre. La pression reste constante selon la droite **1-2**.

Le piston en se déplaçant ouvre l'orifice d'échappement **D** et le relie avec l'atmosphère. La pression de l'air comprimé dans cette chambre baisse brusquement selon la course **2-3**. en même temps, le piston se déplace avec une vitesse croissante **V** jusqu'à la grandeur (V_{max}). A la fin du trajet retour, le piston se déplace par inertie avec une vitesse décroissante. La pression d'air diminue jusqu'à celle de l'atmosphère (P_a) selon la droite **3-4**.

Au début de la course retour, la chambre gauche du cylindre étant liée par l'orifice d'échappement **E** avec l'atmosphère, la pression d'air varie selon la droite **5-6-7**.

Quand le piston ferme l'orifice **E**, l'air se trouvant dans la chambre gauche commence à se comprimer, la pression augmente selon la courbe **7-8-10**. vers la fin du trajet retour, une forte pression agit sur la bille **B** à travers le canal **F**. la chambre droite étant en liaison avec l'atmosphère après l'ouverture de l'orifice **D**, ainsi la pression dans la chambre chute brusquement et la bille se déplace vers la droite. La bille en se déplaçant à droite, ferme le canal **F**. le piston continue instantanément son trajet retour par inertie en comprimant l'air jusqu'au point **9**. Le coussin d'air formé repousse le piston afin de faciliter le début de son trajet allé.

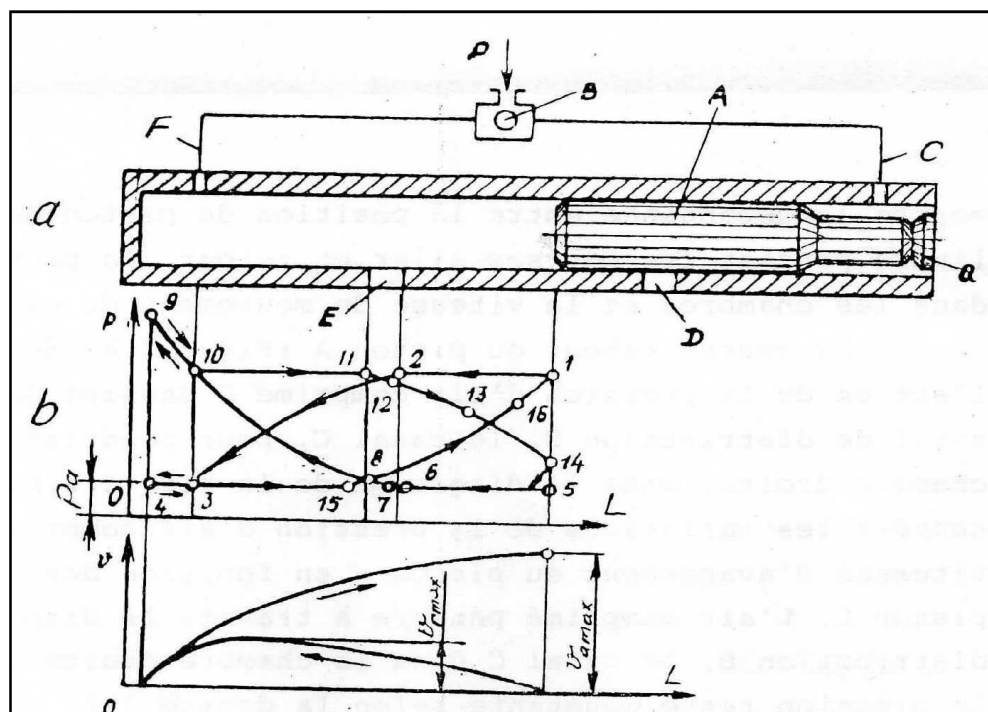


Figure I.3: Principe de fonctionnement du perforateur pneumatique

a. Schéma principal.

b) Diagrammes de travail.

Au début de cette course, le piston augmente sa vitesse sous l'action de l'air comprimé selon la courbe **10-11-12**. Avant la fin de son trajet allé, le piston ouvre l'orifice d'échappement **E** et ferme l'orifice **D**. La vitesse du piston continue à augmenter jusqu'à la valeur maximale ($V_{a \max}$), pendant que la pression dans chambre gauche diminue selon la courbe **12-13-14**, en l'évaluant à celle de l'atmosphère. la pression d'air dans la chambre droite reliée avec l'atmosphère reste constante comme l'indique la droite **4-3-15**.

Vers la fin du trajet aller commence de nouveau la compression selon la courbe **15-8-16-1**. sous l'action de la différence des pressions dans les chambres, la bille se déplace de nouveau à sa position gauche et ouvre le canal **C**.

Au même instant, le piston donne un coup sur l'emmanchement **Q** de l'outil de forage et le cycle recommence.

I.6. Dispositifs de distribution d'air comprimé :

Les dispositifs de distribution d'air comprimé des perforateurs sont destinés à la répartition automatique successive de l'air dans les chambres du cylindre. Cette distribution permet d'assurer le déplacement du piston dans les deux sens à savoir, le trajet allé (course de travail) et le trajet retour (Course à vide).

La structure et la qualité de la construction du dispositif de distribution influent sur les paramètres de fonctionnement du perforateur, tels que : la consommation de l'air comprimé, la productivité, la puissance, l'énergie d'un coup, etc.

Cela prouve l'intérêt porté à la construction des dispositifs de distribution d'air comprimé des perforateurs contemporains.

Actuellement, on rencontre généralement deux types de constructions des dispositifs :

- dispositif de distribution par soupape
- dispositif de distribution par tiroir

a) Dispositif de distribution d'air comprimé par soupape :

Les dispositifs de distribution par soupapes sont très répandus dans la construction des perforateurs contemporains à cause de la simplicité de leur fabrication, du poids assez réduit de la masse à déplacer, des petites surfaces frictionnelles et de la faible sensibilité aux impuretés causées par l'air, ce qui assurent une grande fiabilité dans leurs fonctionnement. L'inconvénient de ce type de dispositif c'est la grande consommation d'air comprimé.

La particularité de cette distribution, c'est que le fonctionnement et le déplacement de la soupape s'effectuent sous l'action de la différence de pression entre les deux chambres (gauche et droite) du cylindre.

Selon, la structure de la soupape, on distingue quatre types de dispositifs de distribution :

- Avec soupape annulaire.
- Avec soupape à bille.
- Avec soupape à bride
- Avec soupape à bascule

b) Dispositif de distribution par soupape annulaire :

Il est composé de la soupape annulaire 1, du corps de la boîte à soupape 9, du couvercle antérieur 10 avec son orifice 3 et du couvercle 4 avec la douille de guidage.

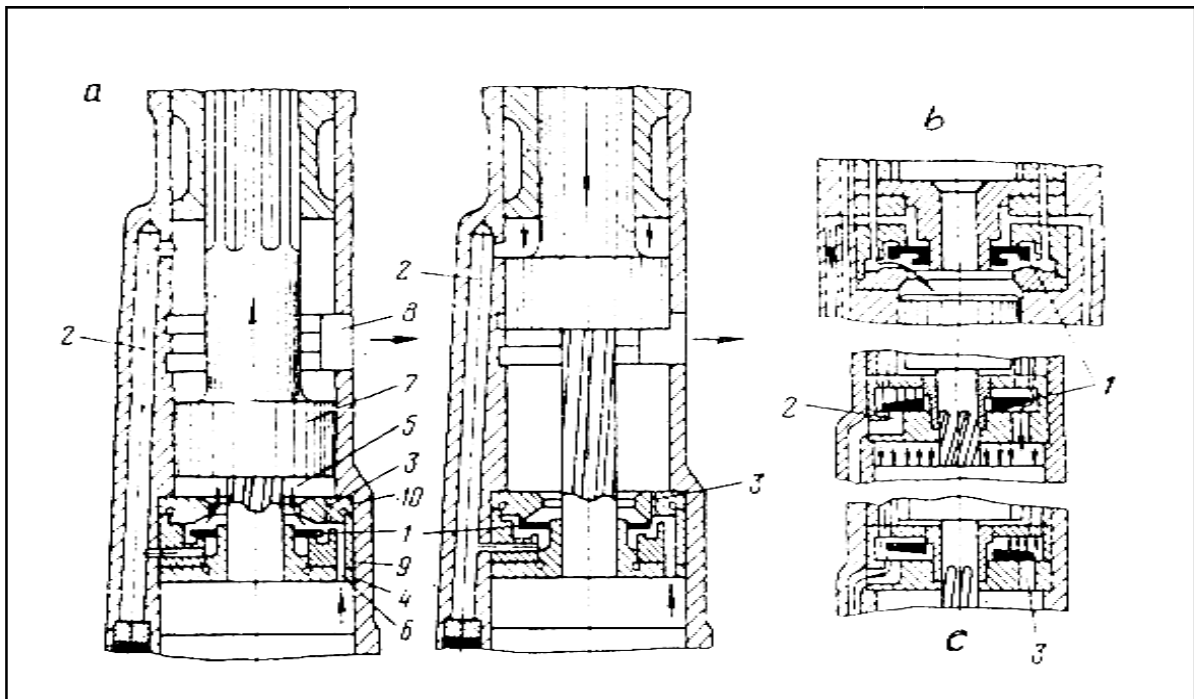


Figure. I.4:Dispositifs de distribution d'air comprimé par soupape. [39]

L'air comprimé traverse la soupape d'admission et le canal 6 ensuite le jeu annulaire de la boîte à soupape 9 et enfin le jeu annulaire situé entre la soupape et le couvercle 10 pour aboutir à la chambre gauche 5 du cylindre. Sous l'action de la pression d'air comprimé, le piston 7 se déplace en avant et effectue sa course de travail. Pendant le même instant l'air dans la chambre droite s'échappe dans l'atmosphère par l'orifice 8. Le piston en se déplaçant ferme l'orifice d'échappement du cylindre, ainsi l'air dans

la chambre droite commence à se comprimer et passe par le canal 2 pour pénétrer par l'arrière de la boîte à soupape ou la pression augmente. Une fois le piston traverse l'orifice d'échappement pour l'ouvrir du côté de la chambre gauche, où la pression est réduite brusquement. Sous l'action de la différence de pressions, la soupape se déplace vers l'avant tandis que le piston continue son mouvement en donnant un coup sur la queue du fleuret.

La soupape se trouvant dans sa position antérieure permet à l'air comprimé de pénétrer à travers l'arrière de la boîte à soupape et le canal 2, dans la chambre droite du cylindre. L'air en passant par le jeu annulaire agit sur la soupape. Une fois l'orifice d'échappement ouvert par le piston du côté de la chambre droite, la pression diminue brusquement. C'est ainsi que sous la différence de pression, la soupape reprend de nouveau sa position initiale, et le cycle recommence.

Dans le cas, où le perforateur est mis en marche au moment où le piston se trouve dans la position avancée, l'air passe dans la chambre gauche du cylindre à travers, l'orifice 3 et déplace la soupape dans la position arrière. Ainsi le piston commence à effectuer sa course de travail. La grande surface et la petite course de la soupape (0.4 à 1mm) assure au dispositif une grande fiabilité.

I.7. Mécanisme de rotation :

Le mécanisme de rotation a pour but de faire tourner l'outil de forage d'un certain angle (5-15°) pour la destruction successive de la taille du trou de mine sur toute sa surface. Selon la course du piston, il y a le mécanisme de rotation dépendant.

Le mécanisme de rotation dépendant effectue la rotation de l'outil pendant le trajet retour du piston. Il est représenté soit par une tige hélicoïdale ou un piston avec une queue munie d'un filetage hélicoïdale.

Dans le premier cas figure (I.4), la bague à rochets 1 est fixée au cylindre 2, elle est munie de plusieurs orifices pour permettre la pénétration de l'air comprimé dans la boîte de distribution 10.

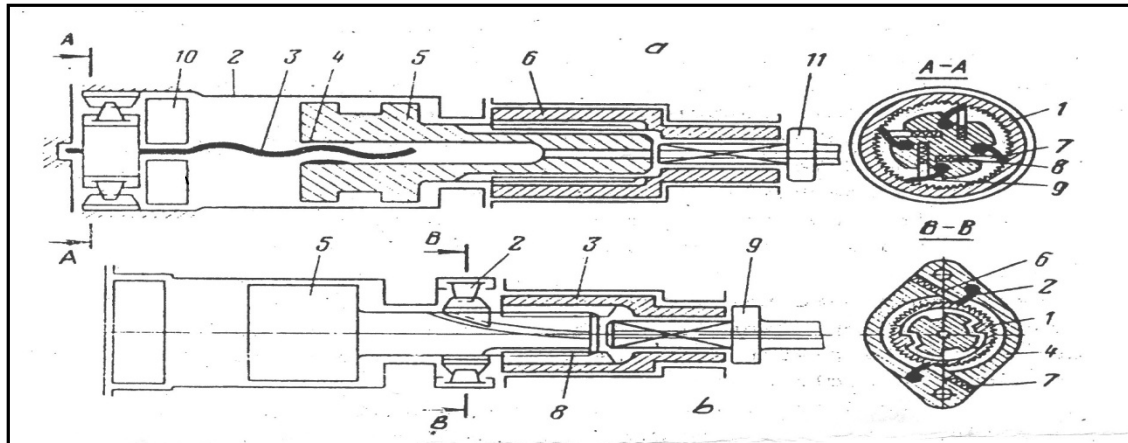


Figure I.5 : Mécanisme de rotation dépendant.[41]

A l'intérieur de la bague à rochet, s'installe la tête de la tige hélicoïdale 3 avec les cliquets 9. Les cliquets sont pressés par des ressorts 8 introduits dans les aubes 7 et se trouvent en contacts permanents avec les dents de la bague 1. La rotation de la tige hélicoïdale dont le filtrage à un grand pas, n'est possible que dans un seul sens ; c'est à dire lors de la course de travail. La tige à travers l'écrou 4 pénètre dans le piston 5 relie à la douille tournante 6 par des rainures. Lors de la course de travail, les cliquets n'empêchent pas la tige de tourner, c'est pourquoi le piston se déplace sans rotation et rainures longitudinales du piston s'associent à la douille. Lors de la course à vide la tige hélicoïdale est bloquée par les cliquets, ce qui le piston à glisser dans les rainures de la tige hélicoïdale et de tourner d'un certain angle. La rotation du piston entraîne obligatoirement la rotation de la douille ainsi que celle du fleuret 11.

I.8.Exigences d'exploitation des perforateurs :

La grande productivité des perforateurs est assurée uniquement lors d'une exploitation rationnelle et un entretien planifié. Les règles fondamentales d'exploitation sont les suivantes:

- Le perforateur doit travailler au régime optimal
- L'air comprimé ne doit pas contenir des particules mécaniques et de l'eau. C'est la raison pour laquelle avant le raccordement du perforateur avec les flexibles il est nécessaire de souffler ce dernier
- L'emmanchement du fleuret doit être bien fabriqué et ses dimensions doivent correspondre aux dimensions de la douille tournante du perforateur.son traitement thermique doit être effectué selon les exigences prévues
- Assurer un fonctionnement progressif au perforateur et éviter le démarrage à vide

- Le taillant (couronne) doit correspondre en forme et en dimensions au caractère de la roche
- Les perforateurs doivent être complétés de béquilles ; de graisseurs automatiques et de chariots antivibratoire (pour les perforateurs à main)
- L'eau doit être propre et à quantité suffisante
- Les boulons doivent être serrés avec le même effort
- Les perforateurs en réserve doivent être bien conservés. Avant leur mise en fonctionnement, ils doivent être nettoyés au gas-oil et contrôler [42].

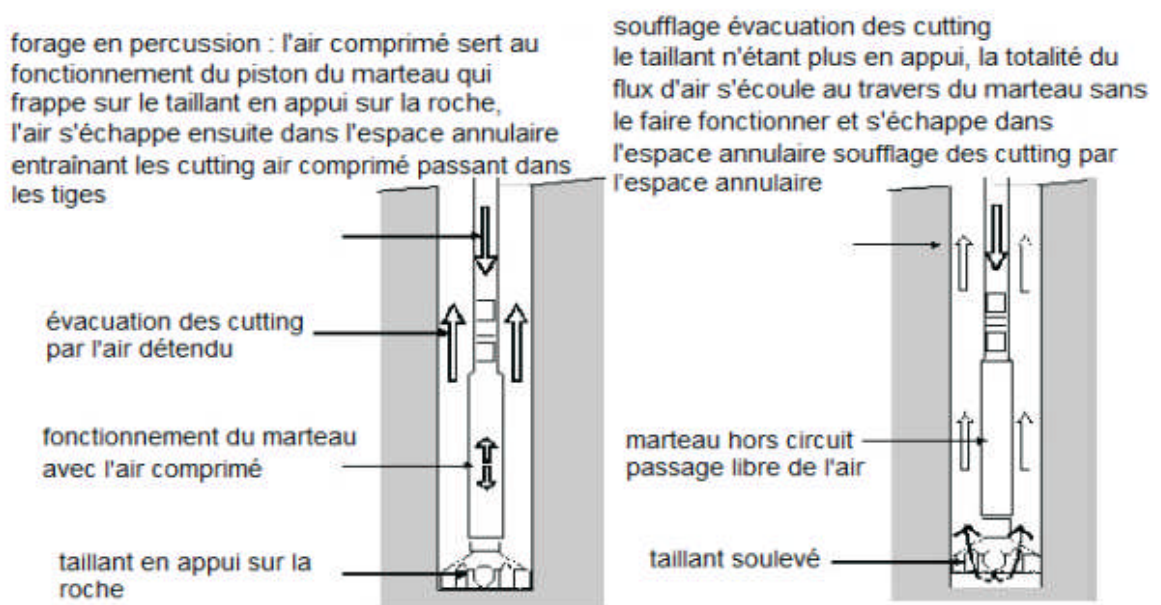


Figure I.6: Schéma simplifié le principe de fonctionnement du Marteau perforateur.

[43]

I.9. Conclusion :

Il existe trois modes de forage : rotatif, roto-percutant et percutant, ce dernier est important concernant de notre étude.

Le forage percutant est très répandu lors de l'exploitation du gisement de minerais, et le forage est réalisé par les marteaux perforateurs.

Les marteaux perforateurs sont destinés au forage des trous de mines dans les formations très dures, dures et moyennes. On les utilise souvent dans les mines souterraines, dans les exploitations à ciel ouvert et dans le domaine de la construction. Et on peut classer les perforateurs selon les indices suivants : le poids, l'énergie utilisée et la destination.

CHAPITRE II

**Les propriétés physicomécaniques de la
roche et choix de l'outil**

EII.1.Introduction :

La partie extérieure de l'écorce terrestre renferme des roches qui se composent des minéraux utiles et de stériles.

On appelle minéral, un corps pur naturel de composition chimique définie pouvant comporter un ou plusieurs éléments utiles.les roches qui sont une association naturelle de plusieurs minéraux jugés non valorisables constituent les stériles.

Ainsi, Dans le chapitre II nous avons déterminé les propriétés physico-mécaniques (l'abrasivité. Solidité ; la résistance a la compressionet la résistance à l'empreinte) d'un échantillon de calcaire Hdjar-Soud en laboratoire; ainsi que nous avons étudié les facteurs qui influent sur l'amélioration de la productivité d'un marteaux perforateur.

II.2.Analyse des propriétés physico-mécaniques des roches influant sur le processus de forage :

II.2.1.Situation du gisement :

La carrière de calcaire de Hdjar-Soud est située à 59 km d'Annaba et à 114 km de Constantine. Le gisement de calcaire en question fait partie d'une structure anticlinale, le pendage du calcaire varié de 40° à 80°, et les coordonnées Lambert du centre du gisement.

Sont : $x = 907$ à 908 , $y = 897$ à 398 [44].



Figure II.1 : Extrait de la carte région azzaba.[45]

Un forage des trous a été effectué avec un marteau perforateur, après les travaux de tirs, nous avons prélevé un nombre d'échantillons des quatre coins de lieu de travail. Au cours de la collecte des échantillons, chaque bloc a été inspecté à la recherche de défauts macroscopiques afin de fournir des éprouvettes exemptes de fractures. Pour chaque analyse effectuée cinq échantillons de roches différents ont été traités au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction « (L.H.C) de Skikda », la taille des blocs de roche était d'environ 16 cm × 32 cm.

II.2.2. Géologie du gisement :

Le mont Safia (Djebel Safia) est constitué par des formations géologiques plissées du jurassique et créacé qui sont affectées par un bombement anticlinal. Elles se distinguent comme suit [45] :

II.2.2.A. Lias :

Ces roches constituent tout le flanc sud-ouest du Djebel Safia. La composition est variable, les teneurs en $MgCO_3$ peuvent varier de 6 à 40 %.

II.2.2.A.1. La dolomie du lias :

Les dolomies affleurent à partir de la côte plus de 240 m et constituent une bande longue de 2 km et une largeur qui varie de 50 à 200 m. La puissance de la couche dolomitique varie de 60 à 80 m. Les dolomies sont compactes, présentent un aspect massif à grains fins et une couleur grise à nuance brune.

II.2.2.A.2. Calcaire du lias :

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

II.2.2. B. Jurassique :

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

Elle est constitué de :

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

II.2.2.C. Crétacé :

1. Calcaires marneux (puissance 200 m) et les marnes (puissance 100 m) du crétacé inférieur : cette formation est disposée au pied de Djebel Safia.
2. Grés, schistes flysch crétacé supérieur (puissance 20 m) : les formations du jurassique et du crétacé sont situées dans la partie nord du gisement .La couverture est représentée par la couche végétale et par les blocs de calcaires de puissance variant de 0 à 0.5 m [46].

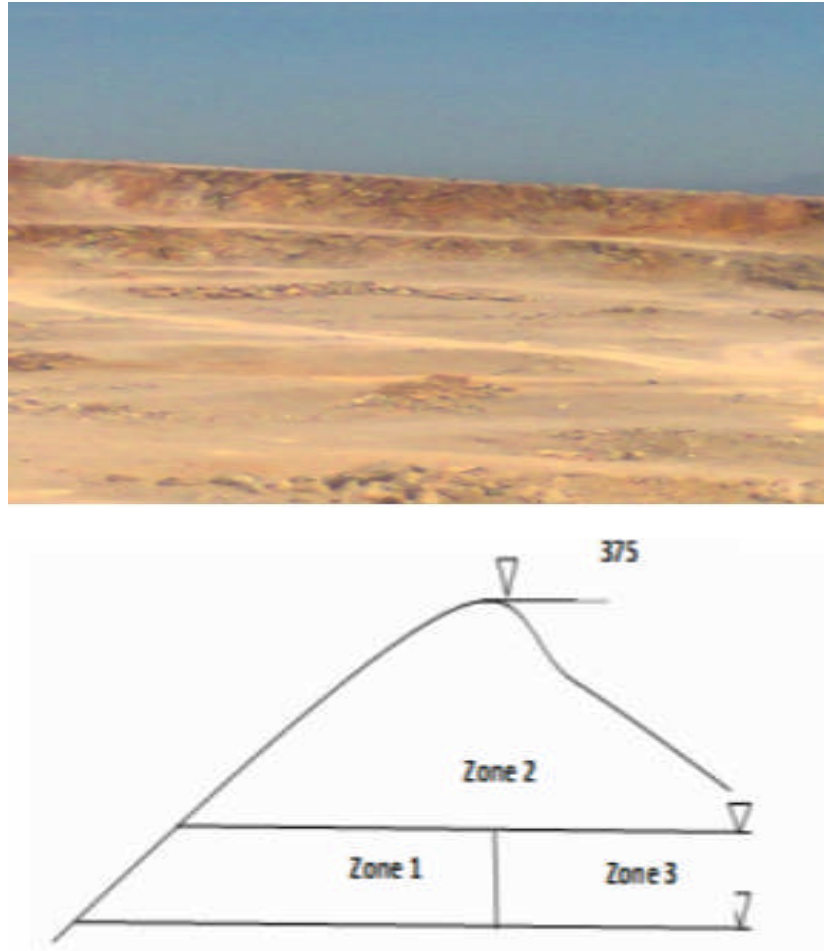


Figure. II.2: Les différentes formations rocheuses de Hadja-soud de lieu de travail.

II.3. Les principales propriétés physico-mécaniques des roches :

II.3.1. Détermination de la dureté, de l'abrasivité de la solidité et de la résistance l'empreinte :

A. Indice de Solidité des roches ou dureté :

Elle représente, l'une des propriétés essentielles. C'est la capacité de la roche de résister à la pénétration d'un autre corps.

Nous pouvons la déterminer selon le professeur PROTODIAKONOV par la formule :

$$f = \frac{\sigma_c}{100}$$

Tableau. II.1 :Résultats de l'indice de solidité ; kgf/cm².

Nature de l'échantillon de calcaire	Nombre d'échantillons à l'essai	N°	Forces appliquées ; Kgf	Moyenne
Gris	I	1	750	516,6
		2	300	
		3	500	
Rougeâtre	II	1	1500	1733,3
		2	2000	
		3	1700	
Marron-gris	III	1	2200	2033,3
		2	2400	
		3	1500	

B.Indice de l'abrasivité :

C'est la propriété d'user les organes de travail des machines minières en contact avec la roche. L'abrasivité de la roche dépend en général de son état et de sa composition minéralogique. L'indice d'abrasivité, c'est la perte du poids de l'outil en milligramme en contact avec la roche pendant le travail.

L'essai des roches sur l'abrasivité a été réalisé d'après la méthodologie proposée par L. Baron et A. Kouznotsov [47]. L'essence de celle-ci consiste à frotter une tige d'acier sur une des facettes de l'échantillon de la roche et à déterminer la perte du poids de la tige lors de l'expérience. Ce qui revient à dire que le critère de l'abrasivité est une perte sommaire de poids d'une tige en acier (mg) durant 10 minutes de frottement. L'expérience a été faite avec une force axiale de 15 kgf et une vitesse de rotation de 400 tr/min créant le frottement de la tige. La tige de mesure est fabriquée en acier non trempé. Avant l'essai, la tige est pesée à l'aide d'une balance analytique avec la précision de 0.1 mg. Après avoir effectué les essais durant 10 minutes nous déplaçons la tige de manière à ce qu'elle soit retournée de l'autre bout, puis nous refaisons l'opération pendant 10 minutes. L'indice de l'abrasivité est calculé d'après la formule:

$$a = \sum_{i=1}^n (P_{1i} - P_{2i}) / 2 \cdot N \quad ; (\text{mg}) \quad (\text{II. 3})$$

Ou; N : Nombre d'essai de chaque échantillon.

P_{1i} : Poids initial de l'échantillon.

P_{2i} : Poids final de l'échantillon.

En comparant les résultats obtenus avec les recommandations de la classification proposée par BARON [48].

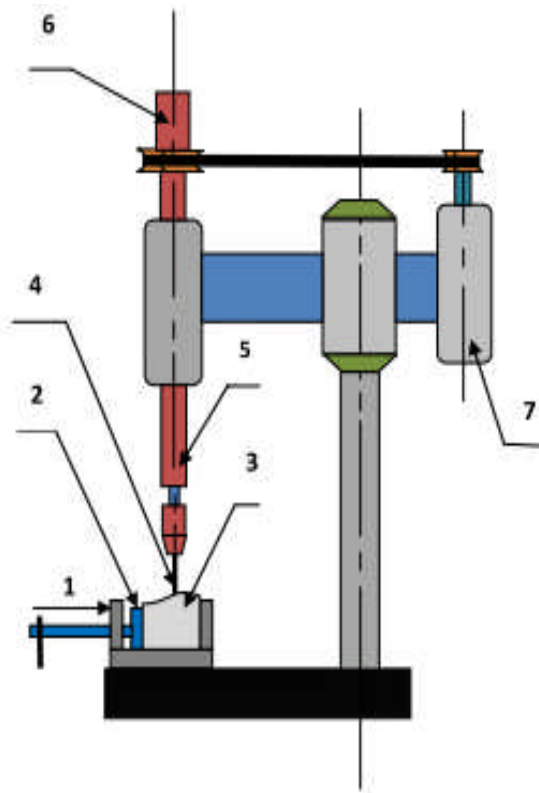


Figure. II.3 :Stand de la détermination de l'abrasivité.[35]

Tableau. II.2 :Résultats de l'indice d'abrasivité (a), mg.

Parties du gisement	Résultats d'essais, mg
1	3
2	2,5
3	2,7

C. Indice de la résistance à l'empreinte :

La détermination de l'indice de résistance à l'empreinte a été effectuée au moyen d'une presse mécanique la presse en question se compose d'une base ou on installe tout l'équipement nécessaire de deux glissières le long des ,quelles se déplace un plongeur (3) sur la table supérieure de celui-ci on met un échantillon (4) qui est chargé par un étampe (5) fixe dans un dispositif de serrage (6) l'étampe (figure II.4) est fabriqué en acier trempé ; lors des essais on augmente la charge sur l'étampe jusqu'au moment de formation d'un poquet dans l'échantillon.

L'indice de la résistance à l'empreinte est calculé par la formule suivante :

$$P_k = \sum F_i / N.S \quad ; \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \text{ (II.4)}$$

Ou : F_i : Charge au moment de formation d'un poquet.

S : Aire de la section transversale de l'étampe.

N : Nombre d'essai de chaque échantillon.

Les roches étudiées résistance à l'empreinte moyenne de 105Kgf/mm² d'après la classification de BARON.L et GLTIMAL[49] [50] [51]ces roches rapportent à la classe appelée "dureté moyenne.

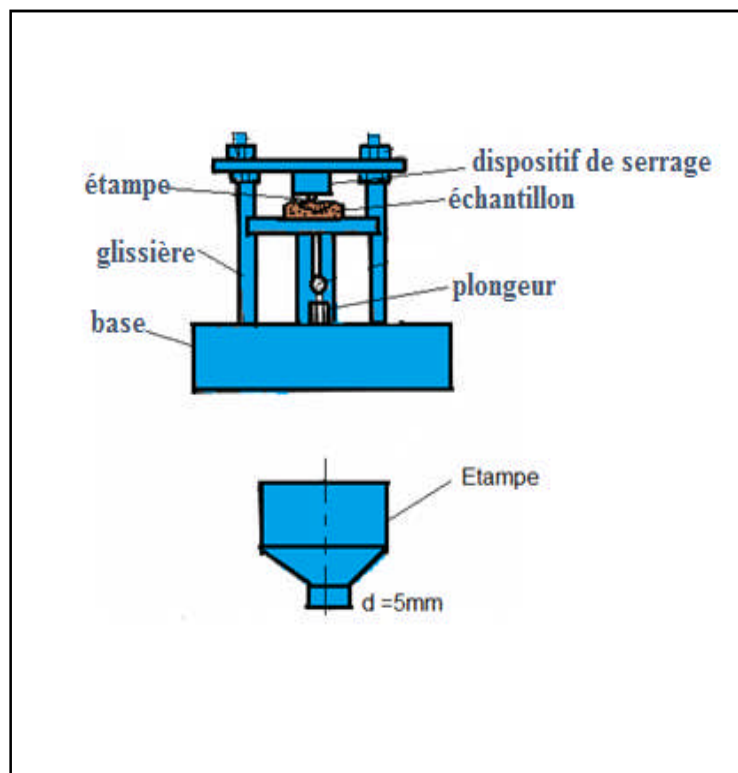


Figure.II.4: Stand pour la détermination de l'indice de la résistance à l'empreinte.[35]

Tableau. II.3 : Résultats de l'indice de la résistance à l'empreinte (P_k);kgf/mm².

Nature de l'échantillon de calcaire	Nombre d'échantillon à l'essais	N°	Résultats d'essais		$\dot{P}_{K\text{moy}}$: kgf/mm ²	$\dot{P}_{Kr\text{ moy}}$
			F Kgf	P_K Kgf/mm ²		
Gris	I	1	2000	100	103	107
		2	2200	110		
		3	2000	100		
	II	1	2500	125	115	
		2	2300	115		
		3	2100	105		
	III	1	2000	100	103	
		2	2200	110		
		3	2000	100		
Rougeâtre	I	1	1500	75	86,6	98,5
		2	2000	100		
		3	1700	85		
	II	1	2500	125	121	
		2	2300	115		
		3	2500	125		
	III	1	1500	75	88	
		2	1800	90		
		3	2000	100		
Marron-gris	I	1	2000	100	105	107,6
		2	2000	100		
		3	2300	150		
	II	1	2300	115	108	
		2	2100	105		
		3	2100	105		
	III	1	2000	100	110	
		2	2400	120		
		3	2200	110		

D. Indice de la résistance à la compression :

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

$$R_c = \sum F_i / N.S \quad ; \text{ (kgf/Cm}^2\text{)} \quad \text{(II.5)Où :}$$

F_i : charge appliquée, [kgf] ;

S : section de la tige de la presse [cm^2] ;

N : nombre d'essais de chaque échantillon.

Tableau. II.4 : Résultats de l'indice de la résistance à la compression [kgf / cm^2].

Parties dugisement de forage traité	Résistance à la compression (R_c) ; [kgf / cm^2]
1	681
2	636
3	732

II.3.2.Résultat et discussion :

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

Les valeurs d'abrasivité des différentes roches testées sont données dans le tableau II.2, l'étude de l'influence de l'abrasivité sur la vitesse de pénétration a été effectuée à une pression d'alimentation d'air de 17 bar, une poussée spécifique d'avance de 50 kgf / cm^2 et une vitesse de rotation de 50 tr/min. Les roches ayant une plus grande abrasivité entraînent une usure accrue de l'outil de forage et une diminution de la vitesse de pénétration. Par conséquent, l'abrasivité de la roche augmente, la vitesse de pénétration décroît de manière non linéaire pour toutes les roches considérées. L'abrasivité était une propriété plus prédominante de la roche qui affecte la vitesse de pénétration dans le forage. Il en résulte une diminution de la vitesse de pénétration provoquée par l'augmentation de l'abrasivité pour les roches de calcaire [52]. Les calcaires de la carrière de Hadjar-Soud a une très faible abrasivité donc une très faible abrasivité n'entraînent aucune diminution de la vitesse de pénétration.

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

Les valeurs de la résistance à la compression et la résistance à l'empreinte de différentes roches testées sont présentées dans le tableau II.4. L'étude de l'influence de la résistance à la compression R_c et la résistante à l'empreinte P_k sur la vitesse de pénétration ont été effectuées à une pression d'alimentation d'air de 17 bar, une poussée spécifique d'avance de 50 kgf /cm² et une vitesse de rotation de 50 tr/min.

II.4.Choix de l'outil de forage :

Le choix s'effectue selon les propriétés physico-mécaniques et l'état de la roche, ainsi que les paramètres des trous forés. Comme il peut être réalisé d'après les recommandations présentées dans le (tableau II.5).

Tableau. II.5 : Valeurs de l'angle d'affûtage du taillant φ (dégre).

Dureté de la roche		
$f < 6$	$6 < f < 12$	$f > 12$
80 -90°	90 -100°	100 -110°

II.4.1.Outil de travail :

Comme outil de travail des perforateurs, on utilise le fleuret (figure II.5) composé d'une tige² ; un emmanchement³, séparé de la tige par une collerette 4, et un taillant¹.

II.4.1.1. Les fleurets :

Les fleurets doivent posséder une charge de rupture assez élevée et une bonne résistance à la flexion. A cet effet, ils sont en acier spécial traité, présenté sous forme de barres plates, rondes ou hexagonales. Ils peuvent être monoblocs (figure. II.5.a) ou à taillant amovibles (figure. II.5.c), assemblés par filetage ou cône.

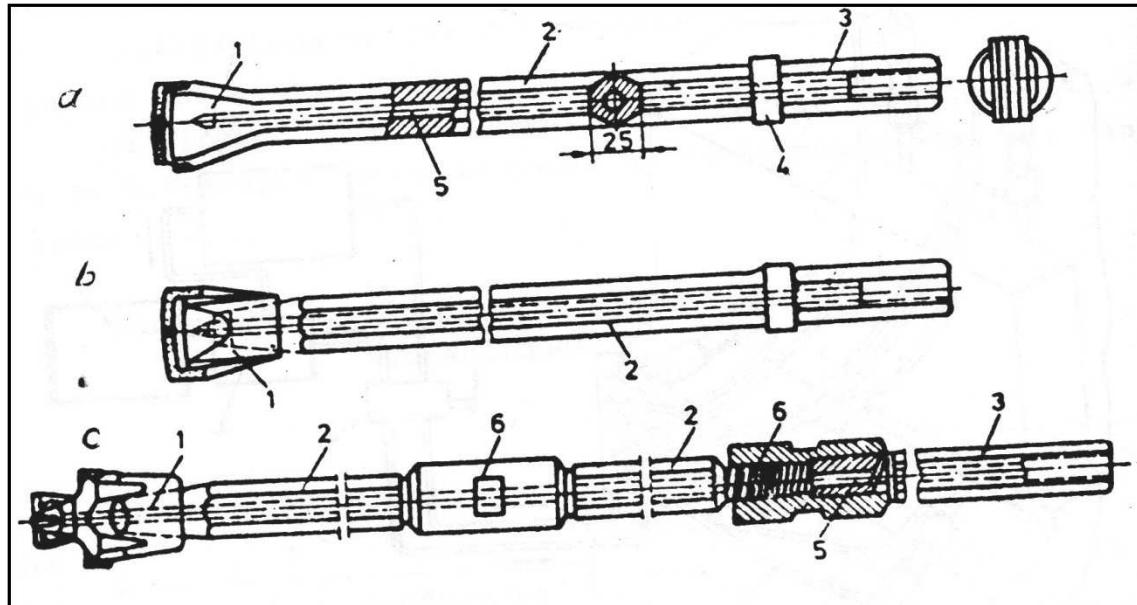


Figure. II.5:Fleurets du marteau perforateur. [41]

a) Fleuret monobloc ; b) fleuret à taillant amovible ; c) fleuret-allongé.

1 ; Taillant ; 2. Tige ; 3. Emmanchement ; 4. Collerette ; 5.canal ; 6. Manchons.

Les fleurets sont généralement percés (canal 5) suivant leur axe longitudinal pour le passage de l'air comprimé ou de l'eau d'évacuation des déblais de forage.

L'emmanchement du fleuret de liaison au marteau à un triple :

- Recevoiret transmettre l'énergie de coup du piston.
- Recevoir et transmettre le mouvement de rotation.
- Fixer la position du fleuret par rapport au piston.

Les emmanchements les plus répandus (figure .II.6) sont :

- L'emmanchement à collerette transmet la rotation par une partie à section hexagonale.
- L'emmanchement cylindrique Leyne transmet la rotation par deux oreilles.

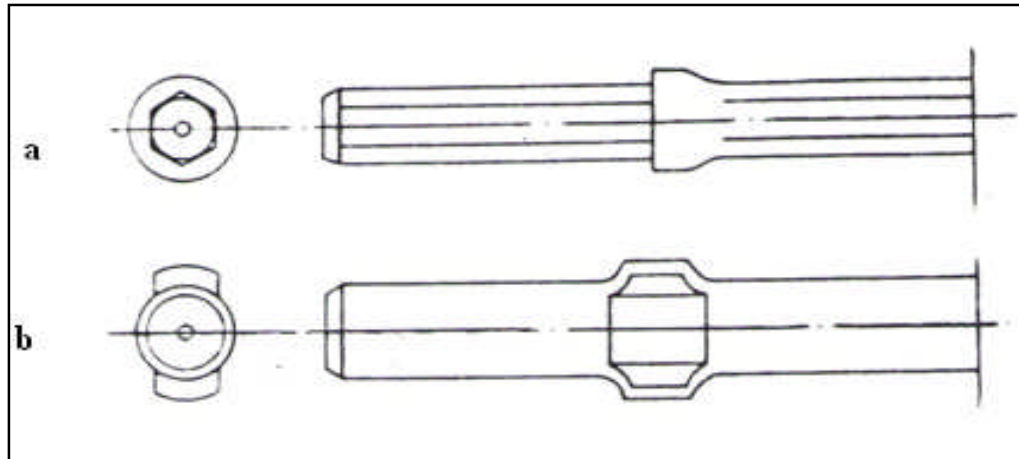


Figure. II.6 : Emmanchement de fleurets. [41]

a) Emmanchement à collerette ; b) emmanchement cylindrique Leyne.

Les tiges allongées pour le forage profond comportent un taillant amovible 1, vissé à l'extrémité d'une tige 2. Ce filetage est en général la même que celui des manchons 6, servant à l'assemblage des diverses allonges, dont l'ensemble constitue le train de tige permettant d'atteindre la profondeur désirée. Les tiges allonges sont percées (canal 5) pour le passage de l'air comprimé ou de l'eau servant à l'évacuation des déblais de forage.

II.4.1.2. Lestype de taillants :

Lors du forage des roches ayant un coefficient de la dureté $f < 8$, on utilise des taillants amovibles, renforcés par des alliages durs de WK-6, W-8, W-11 et W-15 comportant du carbure de tungstène et de cobalt.

Habituellement, on recommande l'alliage WK-15 pour des roches ayant $f > 12$, WK-8 pour des roches de dureté $f = 10$ à 12 et WK-6 et WK-8 pour des duretés $f < 10$.

Quelques types de taillants sont montrés sur la (figure II.8).

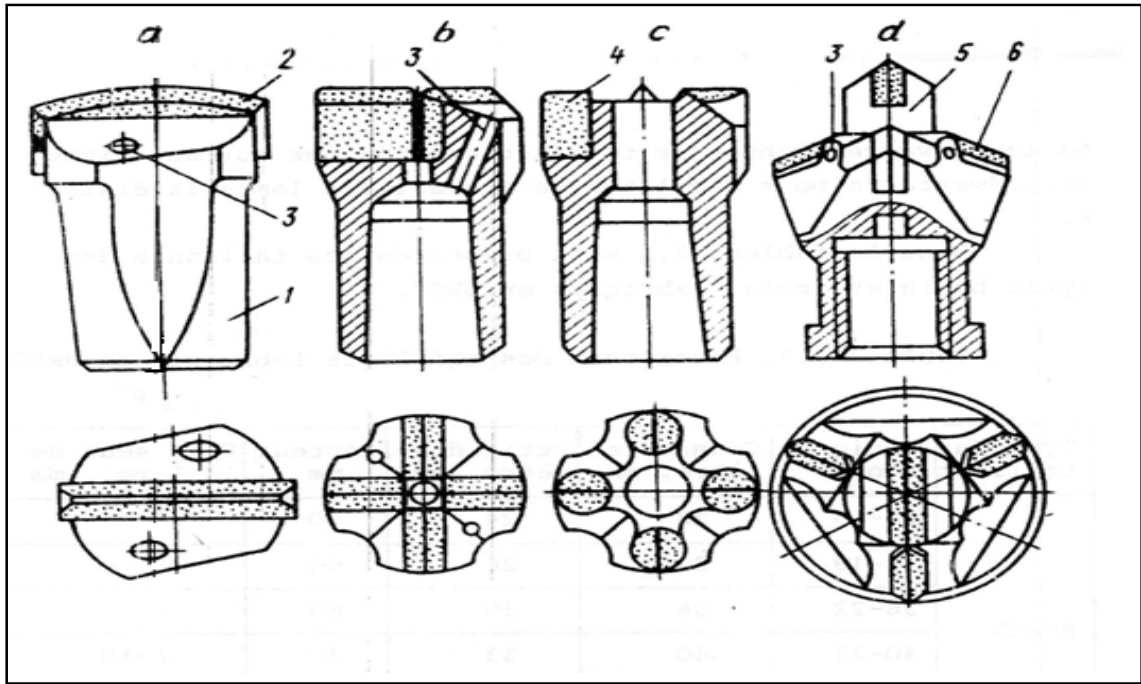


Figure. II.7 : Types de taillants du perforateur. [41]

a) Burin ; b) croix à lames ; c) croix à boutons ; d) taillants bi étages.

1. Corps ; 2. Lame ; 3. Orifice ; 4. Boutons ; 5. Lame avancée ; 6. Lames latérales.

Le renforcement du corps 1 (figure. II.7.a) du taillant par lame 2 d'alliage dur ou bouton 4 (figure.II.7.c) augmente sa durée de vie à l'usure de 15 à 20 fois. On affute la lame sous un angle de 90° à 120° en fonction de la dureté de la roche et très souvent elle est arrondie. Le taillant peut être affuté à 15 fois et à chaque fois son diamètre diminue de 1,2 à 1,5 mm.

Les taillants ont des formes diverses : burin (figureII.7.a), croix (figureII.7.c), rosace à six ailes, en X, en Z, etc. les plus répandus sont des types burin et croix destinés aux roches monolithes et fissurées.

Les taillants bis- étagés (figure.II.7.d) sont destinés aux perforateurs lourds à colonne et aux marteaux plongés. La lame avancée entre le taillant et crée une surface libre supplémentaire pour faciliter le travail des lames latérales6.

II.5. Les essais des perforateurs :

Lors des essais d'exploitation réalisés sur le site, on détermine le régime de fonctionnement, la consommation d'air comprimé, le niveau de bruit et de vibrations, la vitesse de forage en fonction de la pression d'air comprimé, de la vitesse de rotation et de l'effort axial. Lors de la détermination du régime de fonctionnement, on effectue les dépendances suivantes (fig. II.9) : $V_f=f(P)$; $V_f=f(F)$; $V_f=f(\beta)$ et $V_f=f(C_{air})$.

On apprécie aussi lors du travail de la machine la durée de vie du perforateur et de l'outil de forage, l'usure et la consommation des pièces de rechange et d'autres facteurs liés à l'exploitation.

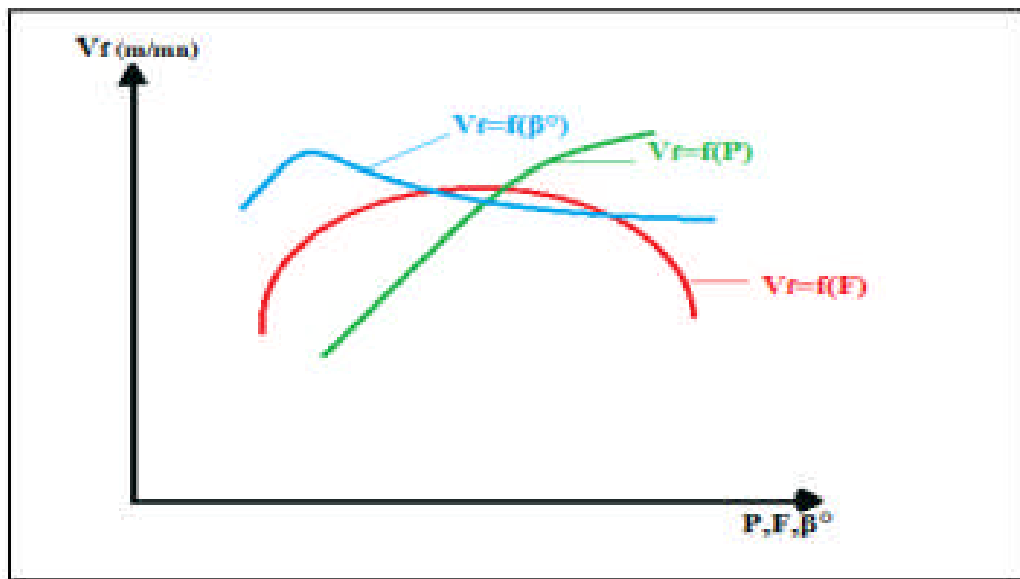


Figure.II.8 : Dépendances de la vitesse de forage (V_f) de la pression d'air comprimé (P), de l'effort axial (F) et de l'angle de rotation du fleuret par coup (β).

Les essais au laboratoire pour la détermination du régime de fonctionnement sont réalisés à partir des mêmes paramètres du perforateur que lors de l'exploitation en chantier avec la seule différence qu'on travaille sur un bloc de roche avec les dimensions limitées. Comme les essais se font dans les conditions de laboratoire, ils peuvent être mieux préparés, utilisés des appareils plus précis et enregistrés plus de paramètres. Le forage sur le bloc n'influe pas pratiquement sur le régime de fonctionnement. Les essais de laboratoire donnent beaucoup plus de possibilités pour l'étude et l'analyse de fonctionnement.

A la figure (II.10) est montré le schéma principal du stand de l'institut supérieur des mines et de géologie appliquée (Bulgarie) pour la détermination du régime de fonctionnement dans les conditions de laboratoire. Le perforateur 1 est fixé sur le chariot mobile 2, mouvant sur le châssis 3.

Sur ce châssis est lié un vérin pneumatique 4 pour la création de l'effort axial. L'air comprimé arrive au vérin 4 et au perforateur à examiner par les robinets 5, le pot de condensat 6, les régulateurs de pression 7 les stabilisateurs de pression 8 et le graisseur automatique 10. La consommation d'air comprimé est mesurée par le débitmètre 9 et la pression par les manomètres 11. Le forage s'effectue dans le bloc de roche 12.



Figure. II.9 : Stand expérimental[53].

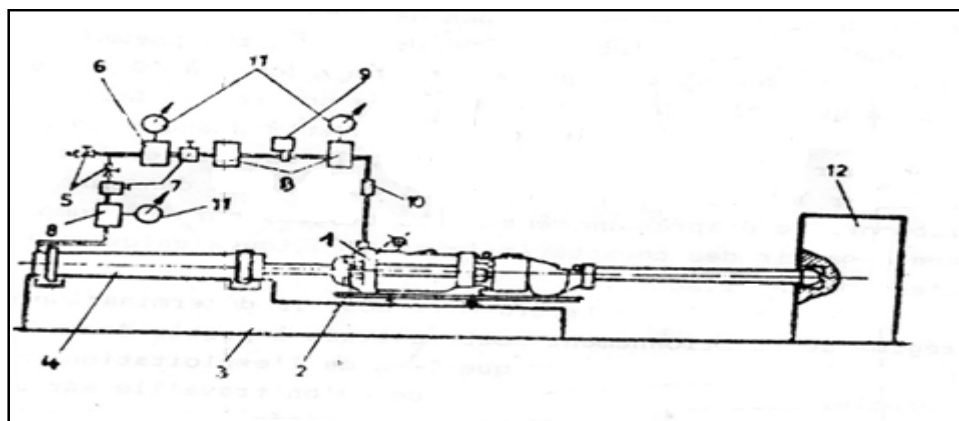


Figure. II.10 : Schéma principal du stand d'essai du perforateur (IMGA, Bulgarie).

1. perforateur ; 2. chariot ; 3. châssis ; 4. vérin pneumatique ; 5. Robinet ; 6. Pot de condensat ; 7. régulateur de pression ; 8. Stabilisateurs de pression ; 9. débitmètre ; 10. graisseur ; 11. manomètres ; 12. bloc de roche.

Les essais de laboratoire pour l'enregistrement des processus de fonctionnement du perforateur se compose de la détermination : du déplacement, de la vitesse et de l'accélération du piston ; le déplacement du corps de la machine et de la soupape de distribution ; le mouvement alternatif et le mouvement de rotation de l'outil de forage ; la variation de la pression et de la température de l'air comprimé dans les deux chambres du cylindre et avant la pénétration de l'air dans le dispositif de distribution. Il est nécessaire d'enregistrer un grand nombre de processus rapides dont les paramètres sont liés mutuellement. Ces processus se déroulent pendant les coups forts et les vibrations. Cela perturbe l'exécution des essais.

II.6. Conclusion :

Prédire le taux de pénétration est très important dans le forage dans la roche. Le taux de pénétration est une valeur nécessaire pour l'estimation des coûts et la planification du projet.

Des études complémentaires sont nécessaires pour vérifier la validité de l'équation dérivée pour les types de roches.

Le calcaire comme nous avons cité dans cette partie est une rochedure ; qui exige une diversité des méthodes d'extraction, résulte de la propriété physico mécanique de la roche et la configuration du gisement.

L'expérience a prouvé que la dureté peut de manière significative affecter des taux d'usure, en plus de son effet sur les forces exigées pour causer la fragmentation de certains matériaux de roche.

CHAPITRE III

**Les méthodes de la détermination des
paramètres d'un marteau
perforateur**

III.1.Introduction :

L'analyse des formules empiriques de la détermination des régimes de forage percutant recommandés par divers chercheurs nous montre qu'elles ne sont pas toute minutieusement valables pour notre recherche.

Voilà pourquoi il est nécessaire de faire une recherche expérimentale sur les régimes de forage percutant 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 Hdjar- Soud

III.2.Les paramètres de base du perforateur pneumatique :

La figure 1 montre le marteau perforateur (RH658 L) conçu pour les travaux lourds tels que le perçage de face. Les deuxièmes forages sont des forages et des forages pour les coups de dynamitage. Pour travailler dans la roche dure, le marteau perforateur (RH658 L) était équipé d'un mécanisme de rotation à rainures hélicoïdales et d'une énergie de percussion élevée.

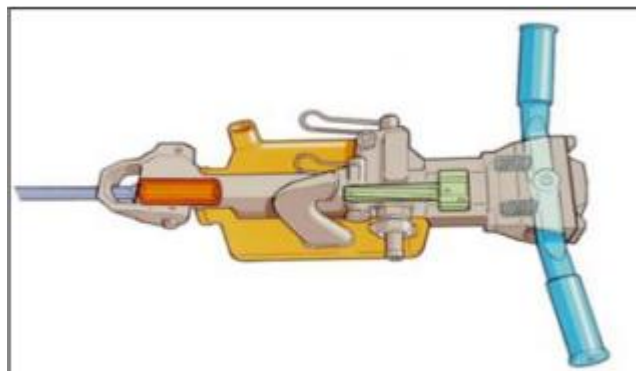


Figure.III.1: Marteau perforateur (RH658 L)

Il est supposé que la pression d'air comprimé dans les chambres du cylindre à l'entrée et pendant son échappement est constante.

Les paramètres de base du perforateur sont les suivants :

- Nombre de coups du piston par minute, n_c , (coups/mn) ;
- Nombre de tours du fleuret par minute, n_t , (tr/mn) ;
- Energie d'un coup du piston, E_c , (kgf .m) ;
- Consommation spécifique de l'air comprimé, C_{air} , (m^3/m)

Tableau.III.1: Caractéristiques techniques du perforateur pneumatique type Atlas Copco (RH658L) [54]

paramètres	Indices	Valeurs
Diamètres du piston	D,mm	65
Diamètre de la tige du piston	d_1 ,mm	40
Diamètre de la tige hélicoïdale	d_2 ,mm	30
Poids du piston	G,kgf	2,4
Courses du piston	L,mm	36
Masse du perforateur	M,kg	23

III. 2.1. Détermination des forces appliquées au piston :

Les paramètres géométriques du perforateur sont indiqués sur la figure (III.2).

- La surface utile du piston pour réaliser le trajet aller est :

$$S_a = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_2^2), \text{ cm}^2 \quad (\text{III.1})$$

Et pour le trajet retour :

$$S_r = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_1^2), \text{ cm}^2 \quad (\text{III.2})$$

Où : D : Diamètre du piston, cm

d_1 : Diamètre de la tige du piston, cm

d_2 : Diamètre de la tige hélicoïdale, cm

- La force appliquée au piston pendant le trajet aller est égale à :

$$F_a = (S_a \cdot P_a - S_r \cdot P_e) \cdot K_1; (\text{ kgf }) \quad (\text{III.3})$$

Et pendant le trajet retour :

$$F_r = (S_r \cdot P_a - S_a \cdot P_e) \cdot K_2; (\text{ kgf }) \quad (\text{III.4})$$

Où : P_a pression d'air comprimé dans la chambre d'admission du cylindre. Elle est égale à la pression dans le réseau d'alimentation kgf/cm^2 ,

P_e : pression d'air comprimé dans la chambre d'échappement on prend ($P_e=0,08\text{ à }0,12\text{cm}^2$)

k_1 : coefficient tenant compte des pertes par frottement entre le piston et le cylindre

($k_1=0,85\text{ à }0,95$)

k_2 : Coefficient tenant compte des pertes par frottement et par rotation du fleuret ($k_2=0,5\text{à}0,7$)

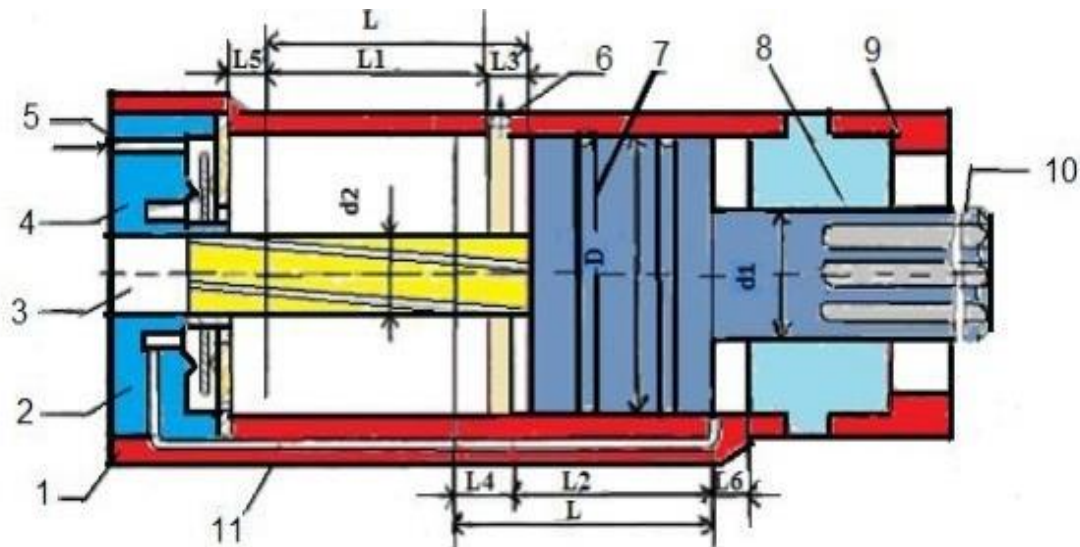


Figure.III.2 : Schéma de détermination des paramètres de base des perforateurs. [32]

1. cylindre ; 2.boite à soupape ; 3. Tige hélicoïdale ; 4.soupape ; 5. Orifice d'admission ; 6. Orifice d'échappement ; 7. Piston ; 8. Corps intermédiaire ; 9. Mandrin ; 10.tige du piston ; 11. Canal d'admission de la chambre droite.

III.2.2. Détermination des vitesses maximales du piston :

Pour simplifier la détermination des vitesses nous admettons que le mouvement du piston jusqu'à l'ouverture de l'orifice d'échappement (sous l'action de la force F_a) est uniformément accéléré. C'est pourquoi la vitesse maximale du piston sur la distance L_1 est déterminée par :

$$V_a = \sqrt{2a_a \cdot L_1} \text{ , (m/s)} \quad (\text{III.5})$$

Et celle, sur la distance L_2 pendant le trajet retour :

$$V_r = \sqrt{2a_r \cdot L_2} \text{ , (m/s)} \quad (\text{III.6})$$

Où : a_a - accélération du piston sur la distance, ($L_a=30\text{mm}$) m/S^2

a_r - accélération du piston sur la distance, ($L_r=28\text{mm}$) m/S^2

Comme d'après la deuxième loi de la mécanique, on sait que :

$$a_a = \frac{F_a}{m} \quad \text{et} \quad m = \frac{G}{g} \text{ ,} \quad (\text{III.7})$$

Où : m - masse du piston, Kg ;

G - poids du piston, N ;

g - accélération de la pesanteur, $g = 9.81 \text{ m/S}^2$.

Selon les formules (III.5) et (III.7), la vitesse du piston pendant le trajet aller sera égale à :

$$V_a = \sqrt{\frac{2F_a \cdot L_1 \cdot g}{G}} \text{ , (m/s)} \quad (\text{III.8})$$

Et pour le trajet retour :

$$V_r = \sqrt{\frac{2F_r \cdot L_2 \cdot g}{G}} \text{ , (m/s)} \quad (\text{III.9})$$

III.2.3. Détermination du nombre de coups du piston :

➤ La durée du cycle :

$$T_c = t_a + t_r \text{ , (s)} \quad (\text{III.10})$$

Où : t_a - durée du trajet aller, s

t_r - durée du trajet retour, s

Mais:

$$t_a = t'_a + t''_a \text{ , (s)} \quad (\text{III.11})$$

$$t_r = t'_r + t''_r \text{ ,} \quad (\text{III.12})$$

Où : t'_a , t'_r - durée du déplacement du piston sous l'action des force F_a et F_r respectivement sur les distances l_1 et l_2 , s ;

t''_a , t''_r - durée du déplacement du piston par inertie respectivement sur les distances l_3 et l_4 , (s)

Pour déterminer les composantes t'_a et t'_r on utilise la loi d'impulsion de la force et de la quantité de mouvement de la masse :

$$F_a \cdot t'_a = m \cdot v \quad (\text{III.13})$$

Alors, selon les formules (III.13) et (III.7) nous pouvons avoir :

$$t'_a = \frac{G.V_a}{g.F_a} , (s) \quad (III.14)$$

Sur la distance l_3 le piston se déplace par inertie, c'est pourquoi :

$$t''_a = \frac{l_3}{V_a} , (s) \quad (III.15)$$

Selon le schéma (figure III.8) :

$$l_3 = L - l_1 ; \quad (III.16)$$

$$l_4 = L - l_2 ; \quad (III.17)$$

D'après les formules (III.11), (III.14), (III.15) et (III.16) la durée du trajet allé sera :

$$t_a = \frac{G.V_a}{g.F_a} + \frac{L-l_1}{V_a} , (s) \quad (III.18)$$

Et celle du trajet retour :

$$t_r = \frac{G.V_r}{g.F_r} + \frac{L-l_2}{V_r} , (s) \quad (III.19)$$

III.2.4. Détermination du nombre de coups du piston :

$$n_c = \frac{60}{T_c} , (coups/mn) \quad (III.20)$$

- Le nombre de tours du fleuret par minute est :

$$n_t = \frac{L}{h} \cdot n_c , (tr/mn) \quad (III.21)$$

Où h est le pas du filetage de la tige hélicoïdale, $h = 0.8$ à 1.0 m.

- Le nombre de coups du piston par un tour du fleuret :

$$n'_c = \frac{n_c}{n_t} , (coups/tr) \quad (III.22)$$

III.2.5. Détermination de l'énergie d'un coup du piston du perforateur :

L'énergie d'un coup du piston est égale à son énergie cinétique du piston :

$$E_{OU} = F_a \cdot L_a ; (kgf.m) \quad (III.23)$$

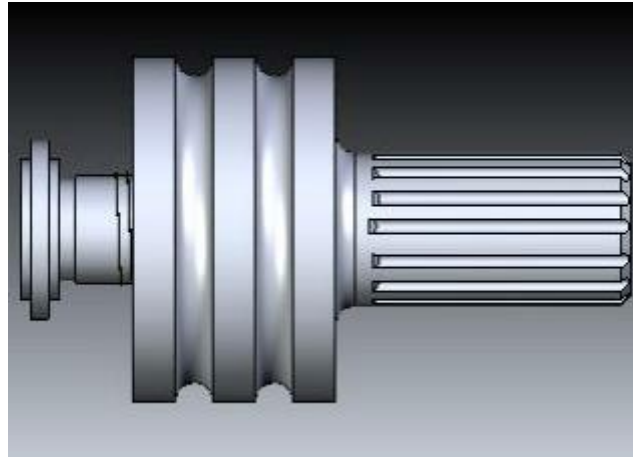


Figure. III.3 : Le piston du perforateur.

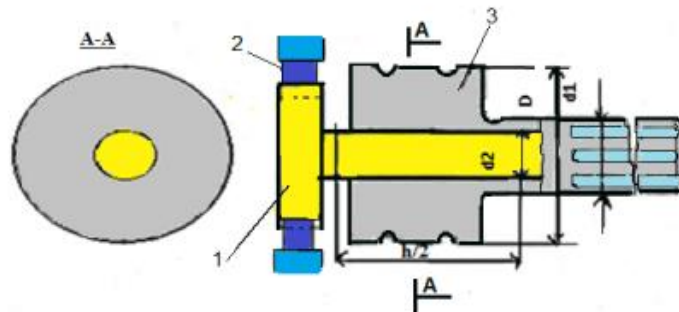


Figure.III .4 : Schéma de la section longitudinal du piston du perforateur.

III.2.6. déterminer l'angle de rotation du fleuret par un coup:

Le couple de rotation du fleuret est créé par le piston pendant le trajet retour grâce à la tige hélicoïdale et l'écrou fixé sur le piston .au cours du trajet retour ; la tête de la tige hélicoïdale est bloquée par les cliquets ; c'est pourquoi le piston tourne en se vissant sur la tige hélicoïdale .la rotation du piston est transmise à l'emmanchement du fleuret par l'intermédiaire de la douille tournant.

- Le nombre de tours du fleuret par minute est :

$$n_t = \frac{L}{h} \cdot n_c \text{ , (tr/mn) } \quad (\text{III.24})$$

Où h est le pas du filetage de la tige hélicoïdale, $h = 0.8 \text{ à } 1.0 \text{ m}$.

- L'angle de rotation du fleuret par un coup

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n'_c} \text{ , (degré) } \quad (\text{III.25})$$

III.2.7. Détermination de la consommation de l'air comprimé :

La consommation de l'air comprimé par minute est :

$$C_{\text{air}} = (S_a + S_r) \cdot L \cdot n_c \cdot \frac{P_a}{P_e} \cdot 10^{-6} ; (\text{m}^3/\text{mn}) \quad (\text{III.26})$$

Le tableau suivant montre les résultats obtenus après le calcul des paramètres de travail d'un marteau perforateur avec un changement continu de la pression d'air comprimé, avec les conditions de la carrière de Hdjar-Soud.

Tableau. III.2: Résultat de calcul des paramètres de travail d'un marteau perforateur utilisé dans les conditions de la carrière de Hdjar-Soud.

P_a (Kgf/cm ²)	F_a (cm ²)	F_r (cm ²)	V_a (m/s)	V_r (m/s)	t_a (s)	t_r (s)	t_c (s)	n_c (c/mn)	n_t (tr/mn)	n'_c (c/mn)	α (Degré)	E_{ou} (Kgf.m)	C_{air} (m ³ /mn)
2	28,44	9,06	2,68	1,463	0,024	0,0434	0,0674	890	32	27,81	12,75	0,85	0,299 2
2,5	40,185	15,24	3,18	1,897	0,019	0,0332	0,0522	1149	41	28,35	12,69	1,20	0,4829
3	51,93	21,42	3,62	2,24	0,0016	0,0285	0,0445	1348	49	28,13	12,79	1,55	0,6798
3,5	63,67	27,6	4,01	2,55	0,0165	0,0251	0,0416	1442	52	28,23	12,75	1,91	0,8485
4	75,42	33,78	4,36	2,82	0,0143	0,0228	0,0371	1617	54	27,98	12,86	2,26	1,0874
4,5	87,165	39,96	4,69	3,07	0,0132	0,0206	0,0338	1775	64	27,77	12,96	2,61	1,3428
5	98,91	46,14	5,00	3,30	0,0133	0,0194	0,0332	1807	65	27,94	12,88	2,96	1,5189
5,5	110,65	52,32	5,29	3,51	0,0125	0,0182	0,0327	1835	66	28,12	12,80	3,31	1,6967
6	122,4	58,5	5,56	3,71	0,0119	0,0171	0,029	2069	74	27,90	12,90	3,67	2,0870
6,5	134,14	64,68	5,82	3,90	0,0114	0,017	0,0284	2113	76	28,04	12,83	4,02	2,3090
7	145,89	70,86	6,07	4,09	0,0108	0,0149	0,0257	2346	84	28,00	12,85	4,37	2,7608

III.3. Choix de régime de fonctionnement de la machine de forage percutant (la vitesse de forage) :

Lors des essais au laboratoire, on détermine le régime de fonctionnement, les caractéristiques techniques et on enregistre le processus de fonctionnement. On détermine l'énergie d'un coup, le nombre de coups par minute (cadence), la vitesse et le couple de rotation, la consommation d'air comprimé et l'effet de recul. Les essais seront effectués sur un stand d'essai spécial.

Tous les stands d'essais peuvent varier le régime de fonctionnement du perforateur. Il est nécessaire de réaliser les essais sur des blocs de roches afin d'obtenir des résultats réels, (à ressorts, pneumatiques et hydrauliques) n'assurent pas de résultats exacts. Par exemple : lors de l'utilisation de l'appareil pneumatique la cadence des coups mesurée est d'environ 7 à 10% plus grande que celle lors du forage dans une roche. Lors des essais d'une même machine dans différents stands permettent d'obtenir des résultats différents. Il est préférable de vérifier les données par un essai comparatif dans un même laboratoire d'après une même méthodologie, car une comparaison à partir des caractéristiques techniques uniquement n'est pas suffisante.

La meilleure sélection des perforateurs dépend principalement des conditions d'exploitation. Aussi, sur les propriétés de la roche et la qualité des outils et les performances de la machine. De nombreux chercheurs ont étudié (théoriquement ou expérimentalement) le forage à percussion, les chercheurs ont réalisé des tests d'exploitation et des tests en laboratoire dans le but de déterminer les indices d'exploitation et les caractéristiques de conception, Parmi les chercheurs KARBATCHEV et SEMENOV ont étudié le fonctionnement des machines minières [55].

III.3 .1. La vitesse de forage par la méthode de V. SEMENOV:

Calcul de la vitesse de forage selon la première théorie

$$V_f = \frac{1,3 \cdot E_{OU} \cdot n_c}{d_f^2 \cdot \delta d} \cdot \zeta_e \quad (\text{m/mn}) ; \quad (\text{III.27})$$

E_{OU} : L'énergie d'un coup du piston ;

n_c : Nombre de cops du piston ;

ζ_e : Rendement de la transmission d'énergie du fleuret à la roche on prend

$\zeta_e = 0,4 \text{ à } 0,7$;

d_f : Diamètre de forage (44mm)

σ_d : La résistance spécifique de la roche forée d'après l'échelle du Prof. PROTODIAKONOV

$$\sigma_d = 300(5 + f - \sqrt{25 + 10f}) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{III.28})$$

f : La dureté de la roche ; $f = 7$

III.3 .2. La vitesse de forage par la méthode de KARBATCHEV :

Calcul de la vitesse de forage par la deuxième théorie

$$V_f = \frac{4 \cdot E_{ou} \cdot n \cdot c}{\pi \cdot d^2 \cdot \sigma_s \cdot (\text{tg}^{\frac{\alpha}{2}} + U_1) \cdot C_e} \quad \text{m/min} \quad (\text{III.29})$$

σ_s : La solidité de la roche

$$\sigma_s = f \cdot 100 \quad (\text{III.30})$$

E_{ou} : Énergie d'un coup du piston, kgf.m

d : diamètre du trépan, m

μ_1 : Coefficient de frottement entre le taillant et la roche, $\mu_1 = 0.3 - 0.5$

C_e : Coefficient d'émoussement, $C_e = 1.2 - 1.3$

α : Angle d'affûtage, degré

z : Nombre de tranchants, $z = 1 - 3$

Tableau .III.3: La variation de la vitesse de forage en fonction de la pression d'air comprimé par les deux méthodes (A.KARBATCHEV, V.SEMENOV).

Test nr	$P_a(\text{Kgf/cm}^2)$	$V_{fs}(\text{m/min})$	$V_{fk}(\text{m/min})$
Test 1	2	0,093	0.17
Test 2	2,5	0,132	0.24
Test 3	3	0,170	0.31
Test 4	3,5	0,210	0.39
Test 5	4	0,248	0.46
Test 6	4,5	0,287	0.53
Test 7	5	0,325	0.60
Test 8	5,5	0,364	0.68
Test 9	6	0,403	0.75
Test 10	6,5	0,442	0.82
Test 11	7	0,480	0.89

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(III.4) sont interprétées par le graphe de la (figure III.5)

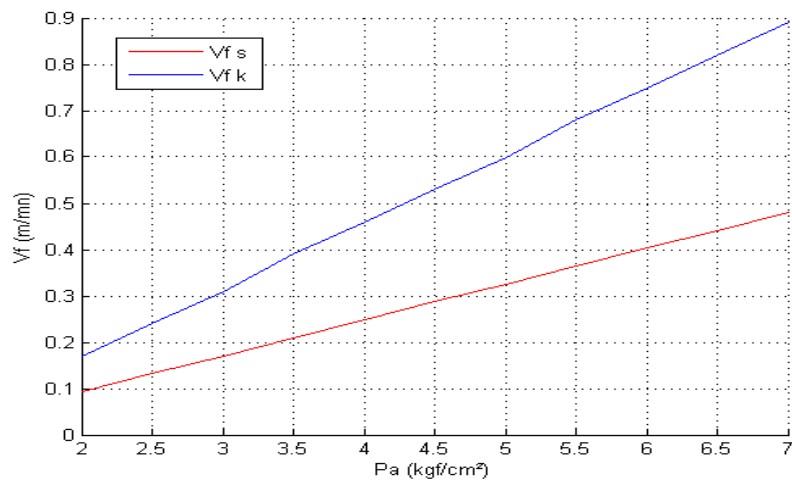


Figure III.5 : La variation de la vitesse de forage en fonction de la pression d'air comprimé par les deux méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV)

La courbe montre le changement de vitesse de forage et son augmentation avec l'augmentation de la puissance d'air comprimé

III.3.3. La vitesse de forage expérimentale :

Au cours des expériences la force axiale varie, le temps et la longueur sont mesurés ; la vitesse de forage est calculée par la formule suivante :

$$V_{f \text{ exp}} = \frac{L}{T_f} \quad (\text{III.31})$$

$V_{f \text{ exp}}$: vitesse de forgeage expérimentale (m/min)

L : métrage du trou foré, (m)

Tableau. III.4 : Résultat de l'étude expérimentale d'un marteau perforateur travaillant dans les conditions de la carrière (Hdjar-Soud) (Algérie).

Test nr	Pa(Kgf /cm ²)	V _{f exp} (m /min)
Test 1	2	0,10
Test 2	2,5	0,13
Test 3	3	0,56
Test 4	3,5	0,28
Test 5	4	0,24
Test 6	4,5	0,38
Test 7	5	0,62
Test 8	5,5	0,40
Test 9	6	0, 32
Test 10	6,5	0,36
Test 11	7	0,44

Les résultats obtenus théoriquement par les méthodes de calcul en question portent le caractère qualitatif et peuvent être considérés comme approximatif, c'est pourquoi il est nécessaire de prolonger la recherche en question en se basant sur l'étude expérimentale de processus de forage vu sa complexité.

Afin de simplifier le processus de calcul et obtenir rapidement les résultats, nous avons effectué les calculs statistiquement à l'aide de la méthode de moindre carré, en calculant les coefficients des corrélations du système afin de déterminer les paramètres rationnels du régime de fonctionnement des machines.

III.3.3.1. La méthode de moindre carré :

Pour le traitement des résultats, on utilise l'analyse de régression en supposant que la relation entre la vitesse de forage et la pression d'air comprimée est représentée par une ligne droite dont la fonction est de la forme :

$$V_f = C_1 + C_2 \cdot P_a \quad (\text{III.32})$$

Où C_1 et C_2 sont les inconnus de l'équation, qui doivent être déterminés par les résultats expérimentaux.

En utilisant la méthode des moindres carrés, qui a pour principe que la droite la mieux ajustée aux données est celle pour laquelle des carrés des résidus sont minimaux, ces paramètres sont déterminés par les formules suivantes :

$$C_1 = \frac{\sum \text{Pai}^2 \cdot \sum \text{vfi} - \sum \text{Pai} \cdot \sum \text{Pai} \cdot \text{vfi}}{N \sum \text{Pai}^2 - (\sum \text{Pai})^2} \quad (\text{III.33})$$

$$C_2 = \frac{N \sum \text{Pai} \cdot \text{vfi} - \sum \text{Pa} \cdot \sum \text{vfi}}{N \sum \text{Pai}^2 - (\sum \text{Pai})^2} \quad (\text{III.34})$$

N: nombre d'observations dans l'expérience.

Pai; Vfi; la pression d'aire comprimé et vitesse de forage

Pour déterminer les deux inconnus (C1 et C2) du système d'équations. On calcule d'abord le déterminant

$$\Delta = N \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad X_i = \text{Pa} \quad , \quad Y_i = \text{Vf}$$

En utilisant la méthode des moindres carrés, qui a pour principe que la droite la mieux ajustée aux données est celle pour laquelle des carrés des résidus sont minimaux.

Tableau.III. 5: Résultat de détermination de la méthode de Moindres carrés

N ^{er} Test	x _i	Y _i	x _i ²	Y _i ²	X _i .y _i
Test 1	2	0,10	4	0,01	0,2
Test 2	2,5	0,13	6,25	0,016	0,32
Test 3	3	0,56	9	0,31	1,68
Test 4	3,5	0,28	12,25	0,087	0,98
Test 5	4	0,24	16	0,57	0,96
Test 6	4,5	0,38	20,25	0,14	1,71
Test 7	5	0,62	25	0,38	3,1
Test 8	5,5	0,40	30,25	0,16	2,2
Test 9	6	0,32	36	0,10	1,92
Test 10	6,5	0,36	42,25	0,12	2,34
Test 11	7	0,44	49	0,19	3,08
Σ	49,5	3,83	250,25	2,07	18,49

III.3.3.2. le coefficient de corrélation :

Pour établir l'existence d'un lien entre x et y et l'intensité de ce lien on à utiliser le coefficient de corrélation

$$\bar{X} = \frac{\sum x}{N} \quad \bar{X} = 4,5 \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} \quad \bar{Y} = 0,342$$

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{N} \sum [(x - \bar{x})(y - \bar{y})]$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x^2 - \bar{x}^2)} \quad \sigma_x = 1,581$$

$$r = 0,92$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y^2 - \bar{Y}^2)} \quad \sigma_y = 0,087$$

Tableau.III.6: Résultat de détermination le Coefficient de Corrélation.

N ^{er} Test	xi	Yi	xi ²	Yi ²
Test 1	2	0,23	2	0,052
Test 2	2,5	0,252	6,25	0,063
Test 3	3	0,275	9	0,075
Test 4	3,5	0,297	12,25	0,088
Test 5	4	0,32	16	0,102
Test 6	4,5	0,342	20,25	0,116
Test 7	5	0,365	25	0,133
Test 8	5,5	0,387	30,25	0,149
Test 9	6	0,41	36	0,168
Test 10	6,5	0,432	42,25	0,186
Test 11	7	0,455	49	0,207
Σ	49,5	3,765	248,25	1,312

Pour traiter les résultats, nous avons utilisé la méthode des moindres carrés et des vérifications avec le coefficient de corrélation (voir figure. III.4)

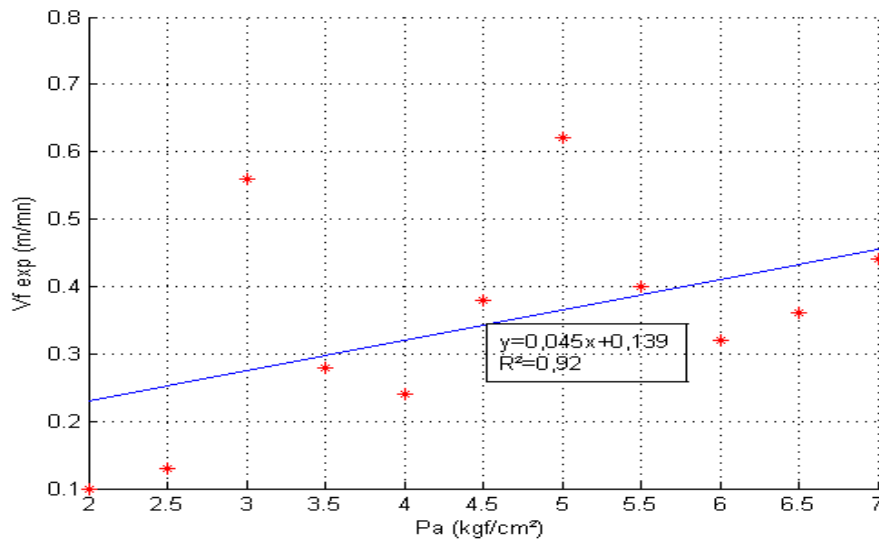


Figure. III.6 : La variation de la vitesse de forgeage expérimentale en fonction de la pression d'air comprimé

III.4.Conclusion :

L'objectif principal du présent travail est de souligner l'importance des paramètres de fonctionnement des machines de forage et le choix de leur qualité. Nous avons donc calculé la vitesse de forage avec deux méthodes.

Et nous avons couru une recherche expérimentale pour préciser les résultats théoriques Parce qu'ils ne sont pas tous valables pour la recherche selon les paramètres de base du perforateur pneumatique.

D'après les résultats obtenus à partir du modèle de régression proposé, on peut conclure qu'il existe une forte corrélation linéaire entre la vitesse de forage et la pression d'air ($R = 0,92$). Un bon accord entre théorie et expérience est clairement exprimé

CHAPITRE IV

**Critère de choix du régime rationnel de
fonctionnement de la machine**

IV.1. Introduction :

Les résultats obtenus par les méthodes de calcul en question portent le caractère qualitatif et peuvent être considérés comme approximatifs, c'est pourquoi il est nécessaire de prolonger la recherche en question en se basant sur l'étude du processus de forage vu sa complexité.

Ces derniers ont fait ressortir l'information suivante: en variant les paramètres de réglage de la machine, nous pouvons déterminer ou calculer les productivités techniques, d'exploitation, et le prix de revient en fonction de la vitesse de forage et du métrage foré.

L'indice permettant de limiter les paramètres de réglage de la machine est un indice technico-économique.

Ce dernier vérifie exactement la rationalité du régime de fonctionnement des machines de forage.

IV.2. Détermination de la productivité des machines de forage percutant :

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. Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs qui pour les marteaux perforateurs, 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, type de l'outil de forage).
- Les régimes de destruction des roches (vitesse de rotation de l'outil, énergie d'un choc).

Jusqu'à présent de nombreuses recherches ont été faites et ont permis d'aboutir à quelques méthodes la détermination de la productivité d'un marteau perforateur y compris celles percutant. La plus répandue 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 :

$$Q_{\text{tech}} = \frac{T - T_{\text{pr}}}{\left(\frac{1}{V_f} + t_{\text{aux}} \right) \cdot K_{\text{rep}}} \quad , \text{ m/poste ;} \quad (\text{IV.1})$$

Où T_{aux} - durée des opérations auxiliaires réduites pour un mètre du trou foré, (min) ;

T_{aux} : 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 d'un marteau perforateur).

La productivité d'exploitation est exprimée par la formule :

$$Q_{\text{exp}} = Q_{\text{tech}} \cdot K_u \quad , \text{ m/poste ;} \quad (\text{IV.2})$$

Où K_u – coefficient d'utilisation d'un marteau perforateur durant un poste.

L'analyse de la méthode exposée de détermination de la productivité montre que celle-ci d'un marteau perforateur 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.
- Cette méthode ne permet pas d'apprécier séparément le degré de l'influence de la construction d'un perforateur, 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 abattues chargeuses pour déterminer la productivité d'un marteau perforateur.

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 :

$$Q_{\text{théo}} = V_f, \text{m/min} ; \quad (\text{IV.3})$$

La productivité technique doit tenir compte de l'influence de l'imperfection technique d'un marteau perforateur envisagée sur sa productivité et s'exprime par la formule suivante :

$$Q_{\text{tech}} = 60 \cdot Q_{\text{théo}} \cdot K_{\text{tech}}, \text{m/h} ; \quad (\text{IV.4})$$

Où K_{tech} : coefficient de l'imperfection technique d'un marteau perforateur.

$$K_{\text{tech}} = \frac{T_f}{T_f + T_{\text{aux}}} ; \quad (\text{IV.5})$$

Où T_f : temps de travail productif d'un marteau perforateur pendant un cycle, (min) ;

$$T_f = \frac{L}{V_f} ; \quad (\text{IV.6})$$

L : métrage du trou foré, (m) ;

T_{aux} : pertes sommaires de temps à la réalisation des travaux auxiliaires aux temps d'arrêt d'un marteau perforateur à cause de son imperfection.

$$T_{\text{aux}} = T_{\text{man}} + T_{\text{al}} + T_{\text{dép}} + T_{\text{rep}} + T_{\text{remp}} ; \quad (\text{IV.7})$$

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.

$T_{\text{dép}}$: temps de déplacement d'un marteau perforateur au nouveau trou, (min).

T_{rep} : temps de réparation d'un marteau perforateur au nouveau trou, (min).

T_{remp} : temps de remplacement de l'outil de forage, (min).

$$K_{\text{tech}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{aux}}}{T_f}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{man}} + T_{\text{al}} + T_{\text{dép}} + T_{\text{rep}} + T_{\text{remp}}}{L} \cdot V_f} ; \quad (\text{IV.8})$$

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

$$K_{man} = \frac{T_f}{T_f + T_{man}} ; \quad (IV.9)$$

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

$$K_{al} = \frac{T_f}{T_f + T_{al}} ; \quad (IV.10)$$

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

$$K_{dép} = \frac{T_f}{T_f + T_{dép}} ; \quad (IV.11)$$

S'il n'existe que des opérations de déplacement d'un marteau perforateur au nouveau trou.

$$K_{rep} = \frac{T_f}{T_f + T_{rep}} ; \quad (IV.12)$$

S'il n'existe que des opérations de réparation d'un marteau perforateur.

$$K_{remp} = \frac{T_f}{T_f + T_{remp}} ; \quad (IV.13)$$

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

Après transformation on reçoit :

$$K_{tech} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{K_{man}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{al}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{dép}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{rp}} - 1 \right) + \left(\frac{1}{K_{rem}} - 1 \right)} ; \quad (IV.14)$$

L'expression obtenue de mettre en évidence les possibilités techniques des machines examinées en comparant les résultats des essais effectués.

La productivité d'exploitation dépend du degré d'utilisation des possibilités techniques d'un marteau perforateur dans les conditions concrètes de l'exploitation.

$$Q_{exp} = 60 \cdot Q_{théo} \cdot K_{exp} ; \quad (IV.15)$$

K_{exp} : coefficient tenant compte du travail continu d'un marteau perforateur pendant son exploitation.

$$K_{\text{exp}} = \frac{T_f}{T_f + T_{\text{aux}} + T_{\text{org}}} ; \quad (\text{IV.16})$$

Où T_{org} - perte de temps à cause de l'organisation du travail.

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 :

$$K_{\text{exp}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{aux}} + T_{\text{org}}}{T_f}} ; \quad (\text{IV.17})$$

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.

Tableau. IV.1: Productivité par la méthode de (V.SEMENOV).

Test nr	P_a (kgf/cm ²)	V_{fs} (m/min)	h(m)	Q_{theo} (m/post)	K_{exp}	Q_{exp} (m/post)
Test 1	2	0,093	300	39,06	0,95	37,107
Test 2	2,5	0,13	250	54,6	0,93	50,77
Test 3	3	0,17	230	71,4	0,90	64,26
Test 4	3,5	0,21	200	88,2	0,87	76,73
Test 5	4	0,24	180	100,8	0,84	84,67
Test 6	4,5	0,28	170	117,6	0,81	95,25
Test 7	5	0,32	160	134,4	0,78	104,83
Test 8	5,5	0,36	150	151,2	0,75	113,4
Test 9	6	0,40	140	168	0,72	120,96
Test 10	6,5	0,44	130	184,8	0,68	125,664
Test 11	7	0,48	100	2016	0,60	120,96

Nous remarquons dans le tableau ci-dessus que plus la pression d'air est élevée, plus la vitesse de forage est élevée et plus la production est élevée, atteignant ($P_{a6.5} - Q_{\text{exp}} 125.664$) où la machine est à sa production maximale, pour revenir et diminuer à nouveau si nous continuons à augmenter la pression.

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.1) sont intrpétées par le graphe de la (figure IV.1)

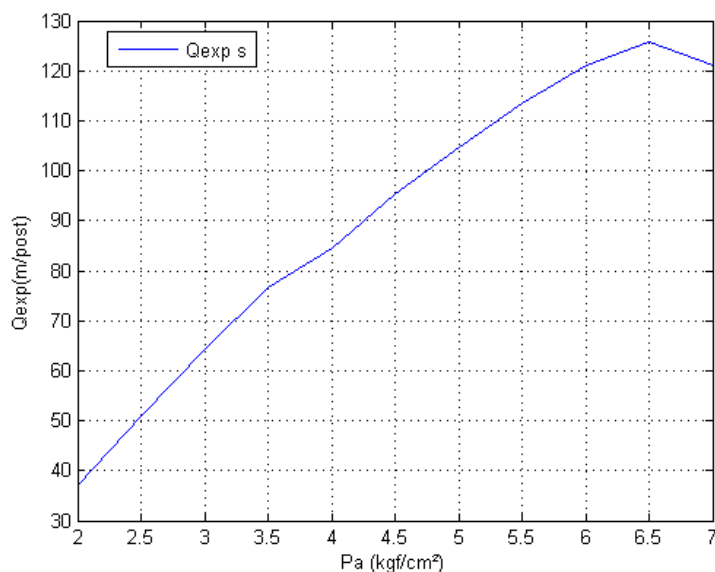


Figure .IV.1: Productivité d'exploitation en fonction de la pression d'air comprimé par la méthode de (V.SEMENOV).

Tableau. IV.2: Productivité par la méthode de (A.KARBATCHV).

Test nr	P_a (kgf /cm ²)	V_{fk} (m /min)	h (m)	Q_{theo} (m /post)	K_{exp}	Q_{exp} (m/post)
Test 1	2	0.17	300	39,06	0,92	65,68
Test 2	2 ,5	0.24	250	54,6	0,88	88,70
Test 3	3	0.31	230	71,4	0,84	109,36
Test 4	3,5	0.39	200	88,2	0,79	129,40
Test 5	4	0.46	180	100,8	0,74	142,96
Test 6	4,5	0.53	170	117,6	0,70	155,82
Test 7	5	0.60	160	134,4	0,66	166,32
Test 8	5,5	0.68	150	151,2	0,62	177,92
Test 9	6	0.75	140	168	0,58	182,7
Test 10	6,5	0.82	130	184,8	0,54	185,97
Test 11	7	0.89	100	201,6	0,45	168,21

On remarque, comme dans le tableau précédent (Tableau. IV.1), lors de l'utilisation de la théorie (Semenov), que le marteau perforateur est toujours à sa puissance maximale à pression d'air (P_a 6,5kgf /cm²), de sorte que seule la quantité de production change avec le changement de théorie pour devenir(A.KARBATCHV).

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.2) sont intrpétées par le graphe de la (figure IV.2).

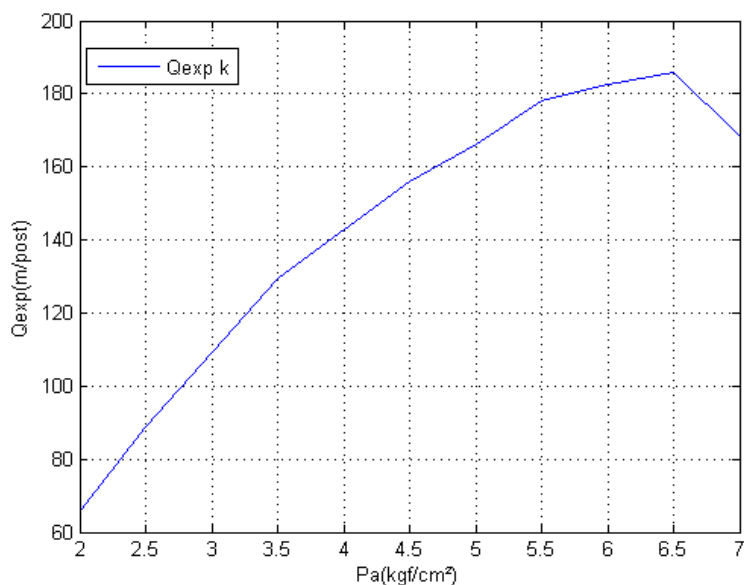


Figure .IV.2: Productivité d'exploitation en fonction de la pression d'air comprimé par la méthode de(A.KARBATCHV).

Tableau. IV.3: Productivité par la méthode expérimentale.

Test nr	Pa (kgf /cm ²)	V _{fex} (m /min)	h(m)	Q _{theo} (m /post)	K _{exp}	Q _{exp} (m/ post)
Test 1	2	0,23	300	96,6	0,90	86,94
Test 2	2,5	0,252	250	10,5	0,88	92,4
Test 3	3	0,275	230	113,4	0,86	97,52
Test 4	3,5	0,297	200	121,8	0,83	101,09
Test 5	4	0,32	180	134,4	0,80	107,52
Test 6	4,5	0,342	170	142,8	0,78	111,38
Test 7	5	0,365	160	151,2	0,76	114,91
Test 8	5,5	0,387	150	159,6	0,74	118,10
Test 9	6	0,41	140	172,2	0,71	122,26
Test 10	6,5	0,432	130	180,6	0,96	124,61
Test 11	7	0,455	100	189	0,62	117,18

Après avoir mené des opérations expérimentales, les meilleurs résultats étaient toujours à une pression d'air de 6,5 kgf /cm² pour revenir à une diminution si la pression d'air augmentait davantage.

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.3) sont intrpétées par le graphe de la (figure IV.3).

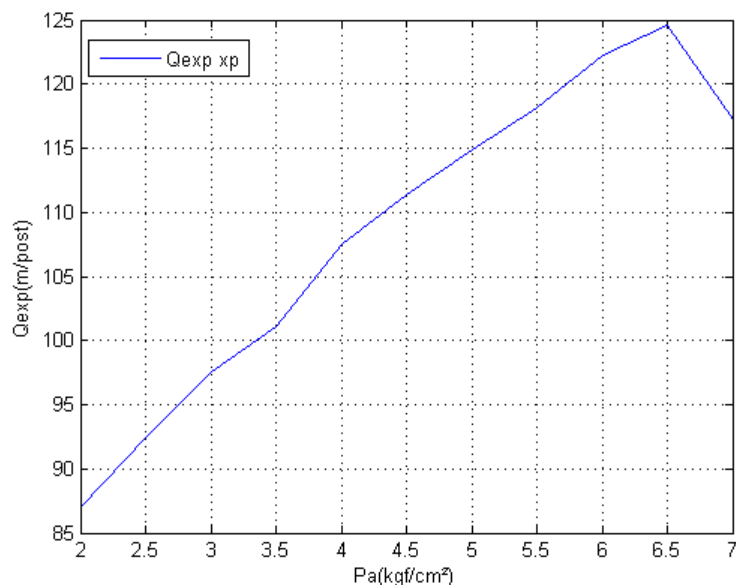


Figure .IV.3: Productivité d'exploitation en fonction de la pression d'air comprimé par expérimentale.

IV.3. Critères et modes du choix du régime de fonctionnement rationnel des machines de forage :

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

Il consiste en présence pour chaque variété de la roche un type d'outil qui est capable de la détruire le plus efficacement avec le régime de forage rationnel.

La diversité des roches leur composition pétrographique différente, les propriétés mécaniques etc. Obligent de résoudre ce problème pour les groupes des roches possédant des propriétés variantes dans les limites assez étroites.

En qualité de l'appréciation de l'efficacité du choix du type de l'outil et des régimes de fonctionnement, quelques chercheurs [33] [56] prennent en considération la vitesse de forage et le métrage de l'outil.

Les chercheurs du travail des outils dans les branches de l'industrie minière, et d'autres [34] ont recommandé en qualité de ce critère deux indices, vitesse maximale de forage, et prix de revient d'un mètre du trou foré.

La pratique montre que la présence de deux critères provoque parfois le non détermination de la résolution du problème. La structure du prix de revient d'un mètre du trou foré se compose de deux parties, dépenses dépendantes du temps liés à la productivité des travaux de forage ainsi qu'au métrage pour l'outil. 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 en qualité du critère généralisé de l'efficacité de n'importe quelle méthode de forage, on peut 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 de la sortie de la masse rocheuse.

Dans ce cas on tient compte de l'organisation des travaux de tir, du diamètre de forage, et de la maille de disposition des trous de mine, ainsi que de la granulométrie de la roche abattue etc. Cela permet de recommander ce critère lors de la projection des travaux de tir et au cours du choix des machines de forage.

S'il s'agit de l'exploitation des machines de forage choisies permettant de forer des trous de diamètre déterminé, le plus complet de la détermination des paramètres du régime de forage rationnel sera la prix de revient d'un mètre du trou foré.

Ce dernier est déterminé d'après la formule suivante

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

C_p : Dépense se rapportant à l'exploitation du marteau perforateur par poste ;(DA/poste)

Q_{exp} : Productivité d'exploitation par poste du perforateur ; (m/poste).

C_{ou} : Prix de l'outil ; (DA). ;($C_{ou}=28000DA$).

H : Métrage des trous forés se rapportant à un outil ; (m).

Ici découle que dans la formule, Q_{exp} est fonction de la vitesse de forage et par conséquence de la vitesse de rotation (n_r) et de la pression axiale (P_{ax}) le problème posé consiste à déterminer les valeurs des paramètres les valeurs des paramètres de réglage ou le prix de revient minimale d'un mètre du trou foré.

$$C_p = C_s + C_e + C_a + C_{rép} + C_{ma} ; \quad (IV.19)$$

C_s : Salaire de l'ouvrier par poste ; DA/poste ; ($C_s=800DA$).

C_e : Le coût de l'énergie par post ; DA/poste ; ($C_e=1100DA$).

C_a : Le coût amorti de la machine ; DA/poste.

$C_{rép}$: le coût de réparation ; DA/poste ; ($C_{rép}=600DA$).

C_{ma} : le coût de la matière (graisse), DA/poste ;($C_{ma}=550DA/poste$)

$$C_a=C_{mach}/(N_j \cdot N_p \cdot N_a); (DA/post); \quad (IV.20)$$

C_{mach} : Coût de la machine ; DA ; ($C_{mach}=78500000DA$)

N_j : Nombre de jour ouvrable par an ; ($N_j=274$ jours)

N_p : Nombre de postes par jour ; ($N_p=2$ postes)

N_a : Nombre d'année se rapportant à l'usure total de l'outil. ($1/N_a=0.2$).

C_p : $1100+800+ 721507,35 +600+ 550 = 724557,35DA$.

Tableau. IV.4 : Résultat de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (V.SEMENOV).

Pa(kgf /cm ²)	H(m)	Q _{exp} (m /p)	C(DA)
2	300	37,107	19539.18
2,5	250	50,77	14282.57
3	230	64,26	1128757
3,5	200	76,73	9456.95
4	180	84,67	8572.98
4,5	170	95,25	7623.37
5	160	104,83	6929.24
5,5	150	113,4	6408.05
6	140	120,96	6010.06
6,5	130	125,664	5787.36
7	100	120,96	6018.06

Comme nous l'avons vu précédemment, la pression d'air a un impact significatif sur la vitesse de forage et la quantité de production, car elle affecte également le prix de revient

Après avoir appliqué la théorie de Semenov, nous avons constaté que la meilleure pression pour que la machine fonctionne est de 6,5, et cela a été prouvé en calculant le prix de revient, pour constater que le coût le plus bas 5787.36 m/post était enregistré à cette pression.

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.4) sont intrpétées par le graphe de la (figure IV.4).

Comme nous l'avons vu précédemment, la quantité de production est affectée par la pression d'air comprimé,car elle contrôle la vitesse de forage, et donc la quantité de production, et le prix de revient .

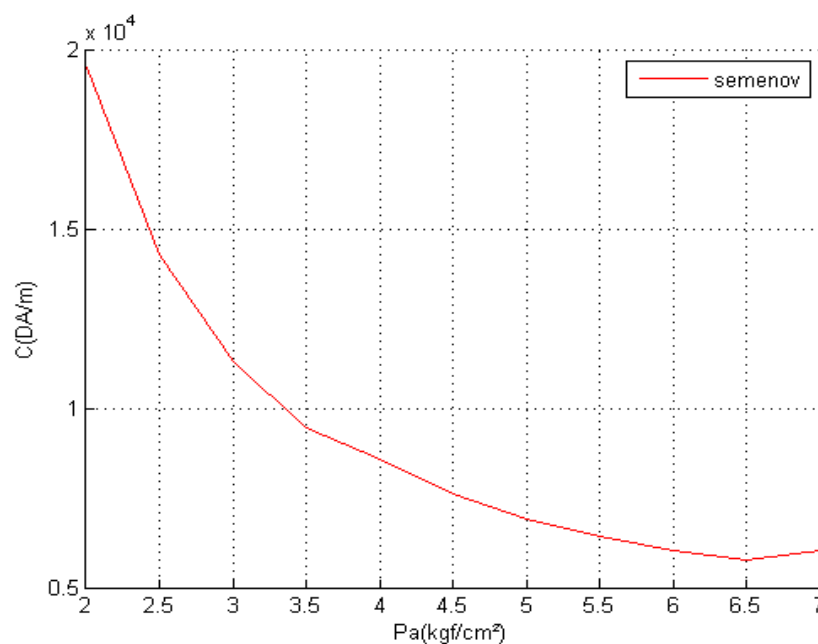


Figure. IV.4: Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air comprimé (V.SEMENOV).

Tableau. IV.5 : Résultats de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (KARBATCHEV).

Pa(kgf /cm²)	H(m)	Q_{exp}(m/p)	C(DA /m)
2	300	65,68	11040.96
2,5	250	88,70	8179.83
3	230	109,36	6637.60
3,5	200	129,40	5613.36
4	180	142,96	5083.8
4,5	170	155,82	4666.43
5	160	166,32	4373.91
5,5	150	177,92	4091.04
6	140	182,7	3985.83
6,5	130	185,97	3917.62
7	100	168,21	4335.46

On note dans le tableau (IV.2) que plus la puissance de l'air comprimé est élevée, plus la production est importante, et le coût diminue progressivement pour atteindre son niveau le plus bas de 3917,62 m/post à une pression d'air de 6,5 kgf/cm². C'est ce que nous avons trouvé après avoir utilisé la théorie de karbatchv

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.2) sont intrpétées par le graphe de la (figureIV .2).

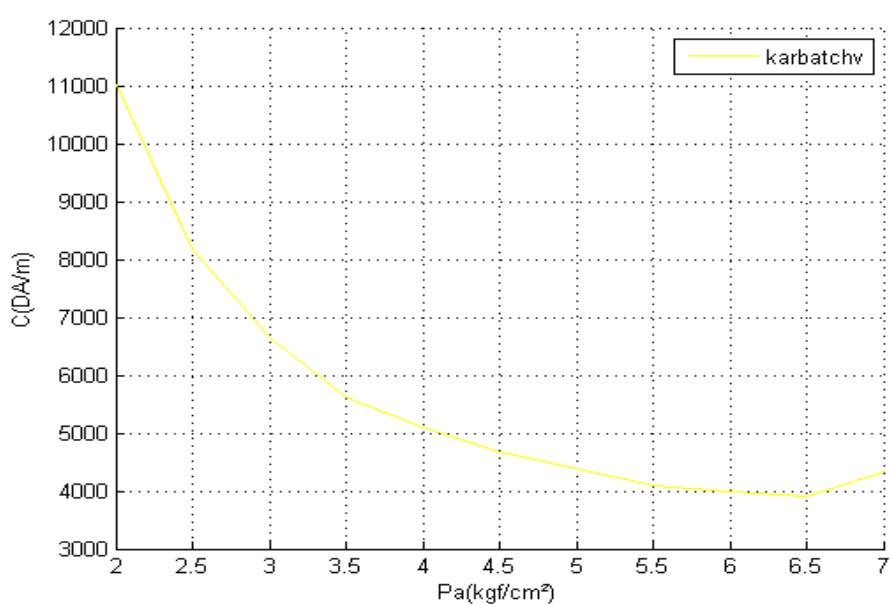


Figure. IV.5 : Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air Comprimé (KARBATCHEV).

Tableau. IV.6 : Résultats de calcul du Prix de Revient d'un mètre de trou foré par la méthode (expérimentale).

Pa(kgf/cm ²)	H(m)	Q _{exp} (m/p)	C(DA /m)
2	300	86,94	834332
2,5	250	92,4	785273
3	230	97,52	7442003
3,5	200	101,09	718145
4	180	107,52	675436
4,5	170	111,38	652174
5	160	114,91	632293
5,5	150	118,10	615378
6	140	122,26	592993
6,5	130	124,61	583613
7	100	117,18	621128

Les valeurs des résultats présentés dans le tableau(IV.6) sont intrpétées par le graphe de la (figureIV.6).

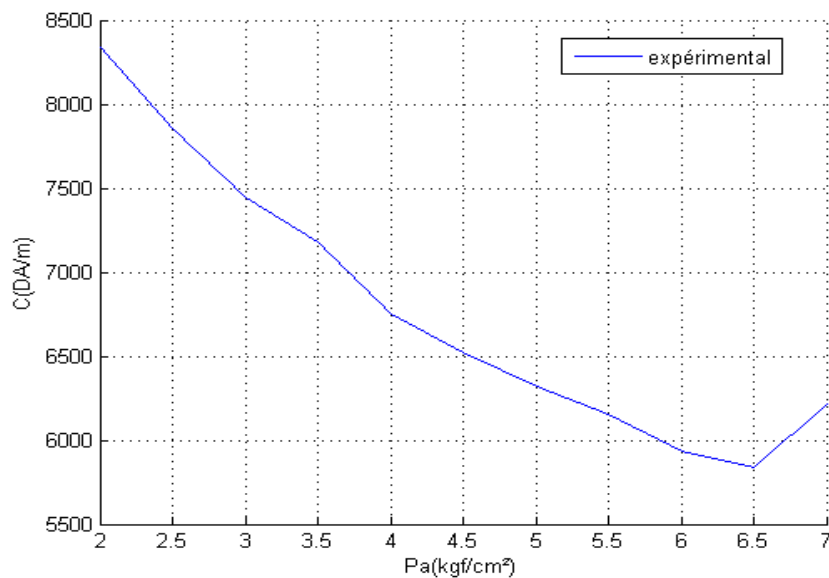


Figure. IV.6 : Le prix de revient d'un mètre du trou foré en fonction de la pression d'air Comprimé (expérimentale).

III.4. Comparaison des résultats de calcul obtenus théoriquement avec les résultats expérimentale :

A présent, deux méthodes de la détermination des paramètres en question, La méthode expérimentale assurant une grande précision est assez compliquée, nécessite l'utilisation d'appareillages spéciaux, en outre elle est assez compliquée, c'est pourquoi il est préférable d'utiliser les méthodes théoriques, Les équations prises en considération pour établir les paramètres de forage sont vérifiées par la comparaison graphique.

La comparaison graphique des résultats de calcul de la productivité obtenu théoriquement est expérimentalement est intrprété par le graphe suivant :

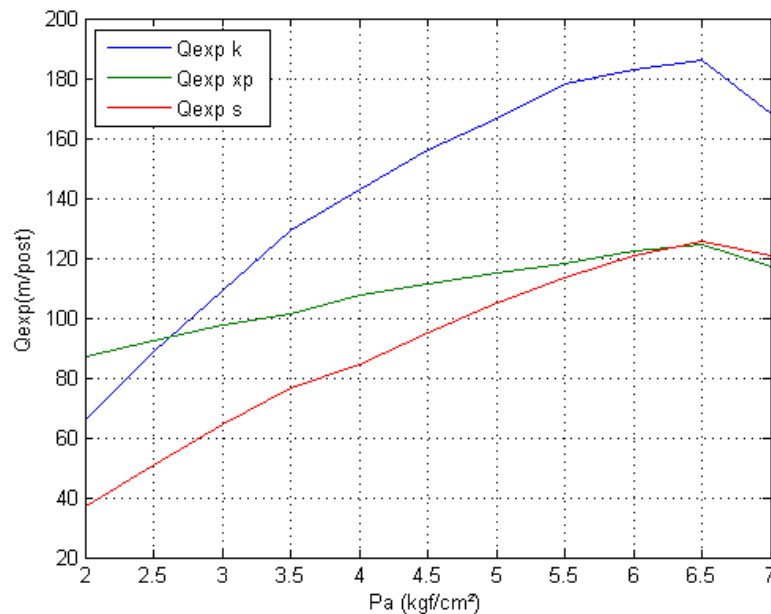


Figure. IV.7 : Comparaison graphique des résultats de calcul de la productivité d'exploitation par les trois méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV, expérimental).

Après les études et les résultats obtenus, qui ont montré que la méthode de V.SEMENOV est la plus proche de la méthode expérimentale, mais la méthode de A.KARBATCHV C'était le meilleur en termes de rentabilité, les recherches se sont poursuivies pour prouver que c'est la meilleure méthode dans la Carrière de Hdjar soud, en calculant le prix de revient car le profit est aussi important que la production.

La comparaison graphique des résultats de calcul du prix de revient obtenu théoriquement expérimentalement est interprété par le graphe suivant :

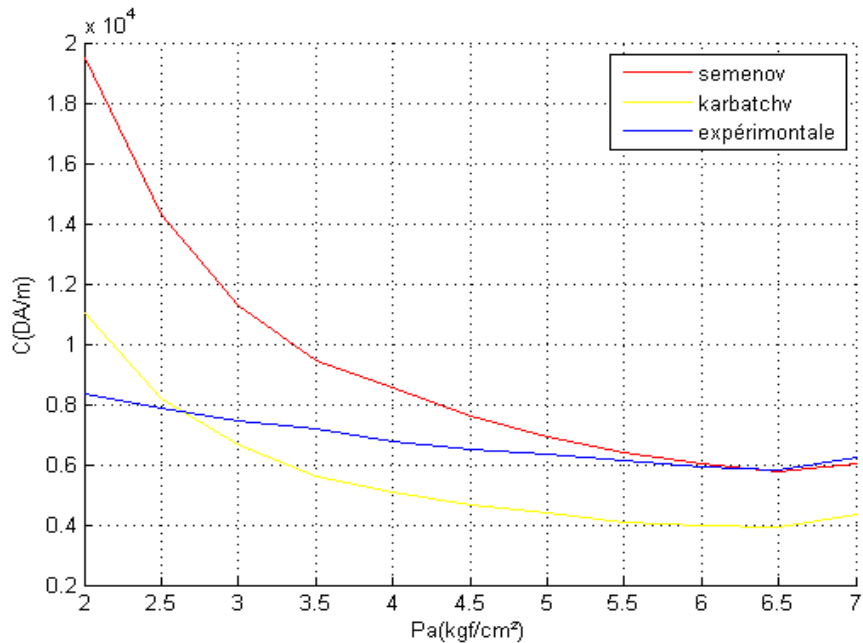


Figure. IV.8: comparaison graphique des Résultats de calcul du prix de revient d'un mètre du trou foré par les trois méthodes (A.KARBATCHV, V.SEMENOV, expérimental).

Comme nous l'avons vu dans les résultats précédents, la théorie de Semenov est la plus proche des résultats expérimentaux, nous avons complété le travail en calculant le prix de référence pour prouver que les résultats entre la théorie de Semenov et l'expérimental sont proches, comme le montre la figure IV.8

IV.5.Détermination du régime rationnel de fonctionnement des machines de forage percutant :

Les paramètres rationnels du régime de fonctionnement des machines de forage percutant dans les conditions de la carrière citée si dessus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau. IV.7: Paramètres optimaux du marteau perforateur.

Pa Kgf /cm ²	E _{ou} (kgf.m)	Vf, (m/min)	productivité		C DA/m
			Q _{thé} (m/p)	Q _{exp} (m/p)	
6,5	4.02	0,82	344,4	185,97	3917.62

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre explique comment calculer le prix de revient en fonction de la vitesse de forage et , la puissance de l'air comprimé en tenant compte des propriétés physiques et mécaniques des roches, diamètre et l'épaisseur de l'outil pour choisir le système de fonctionnement rationnel de la carrière de Hdjar -soud et ce après avoir comparé les résultats théoriques

**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale :

L'objectif de mes travaux de recherche est d'améliorer la vitesse de pénétration et l'énergie d'impact lors du forage par percussion pour une évaluation économique et une augmentation de la production.

L'influence des paramètres clés tels que les paramètres de réglage et le diamètre de l'outil de forage sur l'efficacité de fonctionnement des machines de forage. La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour de bonnes conditions de travail, avance de l'outil de coupe, évacuation régulière des débris, stabilisation des parois des trous...etc.

La réglementation de toutes ces conditions pour une performance de forage efficace mérite d'être améliorée. Pour ce faire, il est nécessaire de choisir la méthode d'optimisation d'atteindre cet objectif. Notre étude a porté en particulier sur le forage percutant au niveau de la carrière de Hdjar-soud par marteau perforateur.

L'étude est réalisée en considérant les résultats de recherche théorique qui portent sur l'influence de quelques paramètres contrôlables et non contrôlables de forage sur la vitesse de pénétration et l'énergie d'un coup ainsi que les principales propriétés physico mécanique et les procédés de détermination des propriétés mécanique de la roche, et on a fait des applications de ces procédés sur la roche choisies (calcaire) qui exige une diversité des méthodes d'extraction, résulte de la propriété physicomécanique de la roche et la configuration du gisement.

Le choix de l'outil de forage s'effectue selon les propriétés physicomécaniques et l'état de la roche et les paramètres des trous forés. La détermination des indices d'exploitation et les caractéristiques techniques ont été élaborées par les essais d'exploitation et des essais de laboratoire.

L'analyse de cette méthode montre qu'elles sont basées sur les connaissances des particularités de l'interaction de l'outil contre la roche, on a vérifié les méthodes de calcul d'après les recherches expérimental et on a étudié l'influence du métrage des trous forés sur la vitesse de forage.

Sachant que les paramètres de réglage influent considérablement sur les paramètres de sortie et la productivité du perforateur dépendent des paramètres du régime de forage.

L'étude est réalisée en considérant les résultats de recherche théorique qui portent sur l'influence de quelques paramètres contrôlables et non contrôlables de forage sur la vitesse de pénétration et l'énergie d'un coup; ainsi que les principales propriétés physico mécanique et les procédés de détermination des propriétés mécanique de la roche, et on a fait des applications de ces procédés sur la roche choisies (calcaire) qui exige une diversité des méthodes d'extraction, résulte de la propriété physico mécanique de la roche et la configuration du gisement.

Le choix de l'outil de forage s'effectue selon les propriétés physicomécaniques et l'état de la roche et les paramètres des trous forés. La détermination des indices d'exploitation et les caractéristiques techniques ont été élaborées par les essais d'exploitation et des essais de laboratoire.

L'analyse de cette méthode montre qu'elles sont basées sur les connaissances des particularités de l'interaction de l'outil contre la roche, on a vérifié les méthodes de calcul d'après les recherches expérimental et on a étudié l'influence du métrage des trous forés sur la vitesse de forage.

Sachant que les paramètres de réglage influent considérablement sur les paramètres de sortie et la productivité du perforateur dépendent des paramètres du régime de forage.

Lors de l'utilisation de la théorie de Semenov et à une pression d'air de $6,5 \text{ kgf/cm}^2$ la vitesse de forage était de $0,44 \text{ m/min}$ et la quantité de production était de $125,664 \text{ m/post}$ tandis que lors de l'utilisation de la théorie de Karbatchv, la vitesse de forage était de $0,82 \text{ m/min}$ et la quantité de production était de $185,97 \text{ m/poste}$

Bien que ces calculs théoriques aient été faits à partir des données de la carrière de Hdjar-Soud, ils restent purs et ne peuvent pas être confirmés avec certitude .Nous avons donc mené des expériences sur le terrain pour voir laquelle des deux espèces avait de meilleurs résultats, de sorte que les résultats sont venus comme suit La quantité de production est de $124,61 \text{ m/poste}$ tandis que le prix, le prix de revient était de 583613 DA/m

Après les résultats obtenus à partir de l'étude expérimentale, nous avons pu déterminer laquelle des deux théories est la meilleure pour travailler dans la carrièr de Hdjar-soud . Après la comparaison, nous avons constaté que la théorie de SEMENOV était plus proche

des résultats expérimentaux, mais la théorie de KARBATVHV a donné de meilleurs résultats parce qu'il a donné la valeur la plus élevée au produit et le prix de revient le plus bas

- [1] **Z.Q.Yue, C.F.Lee, K.T.Law, L.G.Tham**, Automatic monitoring of rotary percussive drilling for ground characterization – illustrated by a case example in Hong Kong, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 41(2004)573-612.
- [2] **G.R. Samuel**, Percussion drilling. Is it a lost technique? A review, SPE 35240, The Permian Basin Oil & Gas Recovery Conf., Midland, TX, 27–29 March 1996.
- [3] **Khochman.L and Hadjadj.A.E**, New Méthodologie Sélection of Shilling Machines, *J.Arian Journal of Information Technologie* 5 (12): 1310-1312, 2006
- [4] **Mehennaoui.S Khochemane .L**, Optimization of Setting Parameters of a Rotary Drilling Rig Using SIMHYDRAULICS Toolbox ,*J. Contemporary Engineering Sciences*, Vol.8,no.3,115-120,2015.
- [5] **Derdour F.Z, Kezzar.M, Bannis.O, Khochman.L.**, The optimization of the operation parameters of a rotary percussion shilling machine using the Taguchi methods, *J. World Journal of Engineering* ,vol.15 Issue :1,pp.62-69, 2017 .
- [6] **C.L. Jimeno, E.L. Jimeno,F.J.A. Carcedo**, *Drilling and blasting rocks*,Rotterdam:Balkema,1995.
- [7] **I.Onederra**, Development of an empirical model for fragmentation ring underground blasting confidential applications AMIRA / JKMRC P447, BART project report, August 2001.
- [8] **Hoseinie S.H, Aghababaei H, Pourrahimian.Y**, Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RD_i), *J. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 45 2008 1–10,
- [9] **T.N. Singh, A. Jain, K. Sarkar**, Petrophysical parameters affecting the microbit drillability of rock, *Int. J. Mining and Mineral Engineering*.1(3) (2009) 261 277.
- [10] **F.Marta, K.Riihioja, G.Chitombo**, Drilling composite carbon materials using a drill bit. Part I: Five-step drilling representation and factors affecting maximum force and torque. (2005) 70 – 75.

- [11] **M.S. Sazidy, D.G. Rideout, S.D. Butt, F. Arvani**, Modeling percussive drilling performance using simulated visco-elastic-plastic rock medium, 44th US Rock mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock mechanics Symposium, USA ,(2010) 434–443.
- [12] **N.Souilah ,Z. Zahzouh** Optimum energy calculation for a drill hammer-blow rh571- 4w , journal of fundamental and applied sciences, ISSN 1112-9867 - 2021
- [13] **N.Bilgin, S.Kahraman**, Drillability prediction in rotary blast hole drilling" 1a" International Mining Congress and Exhibition ot Turkey-IMCET, ISBN 975 395-605-3(2003).
- [14] **S.Kahraman**, Rotary and percussive drilling prediction using regression analysis ,Int. J. Rock Mech. Min. Sci.36(1999) 981-989.
- [15] **S.Kahraman**, Performance analysis of drilling machines using rock modulus ratio ,J S Afr I Min Metall . 103(5) (2003)15–22.
- [16] **S.Kahraman, N.Bilgin, C. Feridunoglu**, Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills, Int. J. Rock Mech. Min. Sci.40(2003)711 723.
- [17] **Olgay Yarali, Sair Kahraman**, The drillability assessment of rocks using the different brittleness values,J. Tunnelling and Underground Space Technology 26 2011 406–414
- [18] **Yaşar . E, Ranjith P.G, Viete D.R**, An experimental investigation into the drilling and physico-mechanical properties of a rock-like brittle material , J. Journal of Petroleum Science and Engineering 76 2011 185–193.
- [19] **Thomas Richard, Christophe Germai, Emmanuel Detournay**, A simplified model to explore the robot cause of stick–slip vibrations in shilling system within drag bits, J. Journal of Sound and Vibration 305 2007 432–456.
- [20] **AFENI Thomas Busuyi**, Optimization of drilling and blasting operations in an open pit mine—the SOMAIR experience, J.Mining Science and Technology 19 2009 0736–0739.
- [21] **Z.Q. Yue, C.F. Lee, K.T. Law, L.G. Tham**, Automatic monitoring of rotary-percussive drilling for ground characterization—illustrated by a

- case example in Hong Kong, J. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 2004 573–612.
- [22] **Bo-Wun Huang, Jao-Hwa Kuang**, Pudding Yu Affect of crack on Trilling vibration, J.Journal of Sound and Vibration 322 2009 1100–1116
- [23] **Sunghoon Ryu, Jung-Woo Cho, Jin-Young Park', Jae-Wook Lee', Myeong-Sik Jeong', Chang-Heon Song', Jung-Gyu Kim, and Jae-Joon Song** , Optimum Operating Conditions of a Multi-Hammer Drilling Machine Assessed using a Linear Percussion Test , J. International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 16, No. 7, pp. 1415-1422 ,2015
- [24] **J.Goupy**, Introduction to Experimental Plans, Dunod , Paris,2001.
- [25] **SERDANI A., MEDROUA A.** Etude de la mécanisation de transport avec fixation de l'organisation des camions. Mémoire d'ingéniera. Université de Badji Mokhtar. Annaba. **1992**
- [26] **R. TEALE.** Le concept d'énergie spécifique dans le forage de roche. Int J Rock Mech Min Sci; 2: 57-73. **1965.**
- [27] **M. MILLER.** Normalisation de l'énergie spécifique. Int J Rock Mech Min Sci; 9: 661-3 [Note technique]. **1972**
- [28] **AG. PATHINKAR, GB. MISRA.** Une évaluation critique de l'indice Protodyakonov. Int J Rock Mech Min Sci;13:249-51. **1976**
- [29] **H. RAIBA** L'énergie spécifique comme critère pour la prédiction de la performance des forets. Int J Rock MechMinSci et Geomech Abstr; 19: 39-42. **1982**
- [30] **B.LUNDBERG, P.COLLET** Onde optimale en ce qui concerne l'efficacité du forage percussif avec l'acier de forage intégré.Int J Impact Eng 37 ; 901-906. **2010**
- [31] **Wikipinia Éncyclopédie**, Fr. (2014), Le Forage Rotatif.
- [32] **VINOGRADO V.VC.** Equipement sur la mécanisation de production dans les carrières sous la rédaction générale de VINOGRADOV Moscou édition Nedra 1974.
- [33] **ALIMOV G.DVORNIKOV L. T.** Machine de forage Moscou édition Machinostoene année 1976.

- [34] **CIMKINE B. A.** Aide mémoire de forage dans les carrières sous la rédaction de CIMKINE B. A. Moscou Nedra 1981
- [35] **KHOCHEMANE L.** Optimisation des paramètres de forage à molette. Thèse de doctorat. Edition université Badji Mokhtar. Annaba. **2006**
- [36] **KOVALENKO V., ANBRATSOUNIAN N., LAHMAR K.** Exploitation des carrières. Editions place centrale de Ben Aknoun. **1981.**
- [37] **G.MALEEV, V.GFALIAEV & N.BOAMO.** Élaboration des projets et construction des machines minières et complexes. Édition NEDRA, Moscou 1988.
- [38] **Revue Séminaire sur l'étude des propriétés physico mécaniques des roches** Meliana N°1 année 1987.
- [39] **KABOUCHE Abdallah** , étude et élaboration du régime de forage à molette.1992
- [40] **Document autorisé par l'entreprise ENAMARBRE.** Plan d'exploitation de la carrière de fil fila. 2000
- [41] **M.OUADI ; I. ASSENOV.** Machine Minière (Machine de forage) office d'application universitaire mars 1993.
- [42] **R. LAZAYRES** ; les outils de forage revue art de mine N°4 1975.
- [43] **RAYMOND R.** a drilling for water, a practical Manuel; Edition Avebury/Cranfield University Ray. 1998.
- [44] **A.L.Hadjadj**, Prédiction et analyse de la fragmentation des roches dans les conditions algériennes', thèse de doctorat en électromécanique, Annaba, 2002.
- [45] **Sociétés des Ciments de Hadjar -Soud (SCHS),** Plan d'exploitation annuel, gisement de calcaire « Djebel Safia », Skikda, CETIM/Boumerdes, 2014
- [46] **Sh. Hoseinie, H. Aghababaei, Y.Pourrahimian,** Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RD_i). Int J Rock Mech Min Sci, (2008)45-110.
- [47] Abrasivité des roches lors de l'abattage, Moscou, Edition des sciences URSS ,1961.

- [48] **BARON .L.** Etat contemporain des études sur les propriétés physico-mécaniques des roches et des découpages Moscou édition SKOTCHINKI A. A. année 1967.
- [49] **L.BARON & L.KFAZNITSOV.** Appareils et moyens de contraires des processus de forage. Édition NEDRA, Moscou 1989
- [50] **L.BARON & L. ALARMANT.** Outils de forage, Édition NEDRA, Moscou 1985
- [51] **N.S.M.BERRY & J.M.S.BROSN,** Performances des facteurs complets sur les tunnels et les tunnels à gouvernail, 9(4) 35-39, 1977
- [52] **S. B. Kivade, Ch. S. N.Murthy, H. Vardhan,** Experimental Investigations on Penetration Rate of Percussive Dril, Global Challenges, Policy Framework & Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF2015), Procedia Earth and Planetary Science 11 (2015) 89 – 99.
- [53] **M. Ouadi, A. Benretem and A.E. Hadjadj** Optimal Experimental Parametrage of Rotary Drilling , Asian Journal of Information Technology 6 (4): 520-523, 2007 Medwell Journals, 2007
- [54] <https://www.atlascopco.com>< handheld< rok-drills<pneumatic-rok-drills
- [55] **Rabbouche.Z, Khochemane .L, Bennis.O,** Study of the determination of the rational operating regime of percussion drilling machines ,J. International Journal of Engineering and Technology (IJET). Vol 9 No 2 Apr-May 2017
- [56] **KRAPIVINE M.G. RAKOV I.A. MIKHAILOV B.G.** Etude de l'influence des paramètres géométriques de l'outil à taillant coupant à la charge et à l'usure de l'outil édition: journal des mines N°01 année 1970.