RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Kasdi Merbah - Ouargla
Faculté de sciences appliquées
Département de Génie Mécanique

Mémoire Master

Domaine : Sciences techniques

Filière : électromécanique

Spécialité : Maintenance industriel

Présenté par : BEDAA Abderrahmane/ MADANI Faissal

Thème

Optimisation des paramètres mécaniques de forage pétrolier : cas d'un outil PDC

Soutenu devant le jury composé de : 22/09/2020

Mme BENADDI Hadda	Présidente	UKM Ouargla
Mr KAREK Rabie	Examinateur	UKM Ouargla
Mlle KHETTABI Rym	Encadreur	UKM Ouargla

2019/2020 Année Université

Remerciement

Nous tenons, tous d'abord à remercier en premier lieu et avant tous le grâce au BON DIEU le tous puissant, qui nous donne la force, la patience de mener à bien ce modeste tra vail.

Nous remercions chaleureusement ***Mlle KHETTABI Rym*** *pour sa disponibilité, ses précieux conseils et motivations qui nous ont gardés sur le droit chemin afin de réaliser ce modeste travail.*

Tous les membres de jurys, à ***Mme.BENADDI Hadda*** *pour sa présidence* ***Mr KAREK Rabie*** *pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

Toute la promotion MASTER II Maintenance industriel 2019/2020.

Tous les personnes qui nous ont aidés de prés ou de loin a réalisé se travail.

Dédicace

Je dédis ce mémoire de fin d'étude à :

A Ma très chère Mére.

A Mon très chèr Père.

A tous mes frères et mes sœurs

A tout la famille.

BEDAA Abderrahmane

Dédicace

Je tiens à dédier mon travail en premier lieu, à mes très chers parents,

Pour leurs sacrifices et encouragements, durant toute la période de mes études.

Je dédie mon travail à mes frères et mes sœurs, pour leurs soutiens qu'ils

M'ont apportés et leurs contributions a ma formation.

A toute ma famille petite et grande.

A tous mes amis.

En fin à ceux qui me sont très chers.

MADANI Faissel

Résumé

L'optimisation de forage vise à améliorer les paramètres de forage telles que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, les propriétés de la boue et la nature de formation, pour réduire les coûts d'exploitation et augmenter l'efficacité de l'opération. L'étude actuelle concerne la configuration expérimentale des paramètres mécaniques du forage. Dans ce contexte, un modèle mathématique pour caractériser la vitesse de pénétration de l'outil de forage PDC (diamant polycristallin compact) a été développé. L'analyse expérimentale s'intéresse à l'analyse de l'influence de paramètres mécaniques tels que le poids sur le bit (WOB), la vitesse de rotation du bit (RPM) et la nature de la formation (Rc), ainsi l'angle de coupe, sur le taux de pénétration. Les résultats obtenus en utilisant la méthode de réponse de surface montrent la bonne corrélation entre les données prédites et expérimentales.

Mots clés : Forage, paramètres mécaniques, optimisation, outil PDC, le taux d'avancement

Abstract

Drilling optimization aims to improve drilling parameters such as weight on tool, rotational speed, mud properties and nature of formation, to reduce operating costs and increase the efficiency of the operation. The current study concerns the experimental configuration of the mechanical parameters of the borehole. In this context, a mathematical model to characterize the penetration rate of the PDC (compact polycrystalline diamond) drilling tool has been developed. The experimental analysis is concerned with the analysis of the influence of mechanical parameters such as the weight on the bit (WOB), the speed of rotation of the bit (RPM) and the nature of the formation (Rc), thus l 'cutting angle, on the penetration rate. The results obtained using the surface response method show the good correlation between the predicted and experimental data.

Key-words: Drilling, mechanical parameters, optimization, PDC tool, rate of progress

ملخص

يهدف تحسين الحفر إلى تحسين معلمات الحفر مثل الوزن على الأداة وسرعة الدوران وخصائص الطين وطبيعة الصخور لتقليل تكاليف التشغيل وزيادة كفاءة العملية. تتعلق الدراسة الحالية بالتكوين التجريبي للمعلمات الميكانيكية لحفر البئر. في هذا السياق، تم تطوير نموذج رياضي لوصف معدل اختراق أداة الحفر PDC (الماس متعدد البلورات المضغوط). يهتم التحليل التجريبي بتحليل تأثير المعلمات الميكانيكية مثل الوزن على الأداة (WOB)، وسرعة دوران الأداة (RPM) وطبيعة الصخور (Rc) ، وبالتالي زاوية القطع على معدل الاختراق. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة الاستجابة السطحية وجود علاقة ارتباط جيدة بين البيانات المتوقعة والبيانات التجريبية.

الكلمات المفتاحية: الحفر، المعلمات الميكانيكية، التحسين، رأس الحفر PDC، معدل التقدم.

Table des métiers

Remerciement ..... **I**
Dédicace ..... **II**
Dédicace ..... **III**
Résumé ..... **IV**
Abstract ..... **VI**
ملخص ..... **VII**
Table des métiers ..... **XI**
Liste des figure ..... **XIV**
Liste des tableaux ..... **XII**
Liste des symbols ..... **XIV**
Introduction **1**
Chapitre I Généralités sur le processus de forage pétrolier **3**
.I Introduction 4
.II Aperçusur le forage 4
.II.1 Le forage percutant 4
.II.2 Forage rotatif 4
.II.3 Le forage roto- percutant 5
.III Description d'un appareil de forage pétrolier 5
.III.1 Système de Puissance (Power system) 7
.III.2 Système de Circulation 7
.III.3 Système de rotation (Rotating System) 8
.III.4 Système de lavage 10
.III.5 Le système des obturateurs (Blowout Prévention (B.O.P) System) 14
.IV La garniture de forage 15
.IV.1 Les tiges 16
.IV.2 Les tiges lourdes 16
.IV.3 Les masse – tiges 16
.V Les paramètres de forage 17
.V.1 Les paramètres hydrauliques 17
.V.2 Les paramètres mécaniques 19
.V.3 L'effet du type de roche sur les performances de l'outil de forage 22
.V.4 Mécanisme de rupture des roches par les outils 22

.V.1 Principe du choix des outils……..22
.VI Choix de outil de forage..... 23
.VI.1 Les outils à molettes……..23
.VI.2 Outils diamant naturel.....26
.VI.3 Outils hybrides…….....28
.VI.4 Outil (TSP) 29
.VI.5 Classification IADC.....30
.VI.6 Les PDC (Poly-cristalline diamant compact) 30
Conclusion 37
Chapitre II Méthodes d'optimisation des paramètres de forage..... 38
.I Introduction..... 39
.II Modèles d'optimisation dans la littérature (état de l'art) 39
.III Améliorez de la vitesse d'avancement (ROP) 42
.III.1 Optimisation par l'énergie mécanique sélectionné E_S (MSE) 42
.III.2 Amélioration de la vitesse d'avancement d'un outil PDC par l'utilisation du modèle d'Eckel.....44
.III.3 Méthode d'arthur lubinski.....45
.III.4 Méthode d'I.G. Falconer…….....46
.IV Autres méthodes mathématiques d' amélioration (optimisation par Plan d'Experiences) 46
.IV.1 Facteurs et niveaux…….....46
.IV.2 Contexte et le but des plans.....47
.IV.3 Principaux avantages des plans d'expériences..... 48
.IV.4 Plans factoriels complets à deux niveaux 2k..... 49
Conclusion 56
Chapitre III Analyse expérimentale du comportement dynamique d'un outil PDC 57
.I Introduction..... 58
.II Equipements utilisés..... 58
.III Effets des différents paramètres sur le taux de pénétration 58
.III.1 Effet de du poids sur l'outil. 59
.III.2 Effet de la vitesse de rotation…….....61
.III.3 Effet de forabilité (dureté) de la roche : 62
.III.4 Effet de l'angle de coupe de l'outil..... 64
.IV Application de la méthode RMS..... 65
.IV.1 Traitement des données.....66

.IV.2 Analyse statistique des données..... 67
.IV.3 Modélisation mathématique..... 68
.IV.4 Effets des différents facteurs sur le taux d'avancement..... 69
.IV.5 Les figures suivantes présentent les effets des différents facteurs sur le taux d'avancement..... 70
.IV.6 Analyses graphiques..... 72
.V Interprétation des résultats obtenus..... 75
.VI Optimisation des paramètres..... 76
Conclusion 78
Conclusion et recommendation 80
Conclusion 81
Recommandation 81
Référence 82
Annexe 85
.I Effet WOB 86
.II Effet RPM..... 87
.III Effet Rc 88
.IV Effet β 89

Liste des figure

Chapitre III

Figure I. 1: Destruction de la roche lors du forage. 5
Figure I. 2 : Description d'un appareil de forage pétrolier. 6
Figure I. 3: Système de Puissance 7
Figure I. 4 : Pompes de forage 8
Figure I. 5: Table de rotation 9
Figure I. 6: La tête d'injection. 9
Figure I. 7:Top drive 10
Figure I. 8 : Système de lavage. 11
Figure I. 9: Moufle fixe 12
Figure I. 10: Le Moufle mobile. 12
Figure I. 11 : Le système des obturateurs. 14
Figure I. 12 : Les manifold 15
Figure I. 13 : Les tiges 16
Figure I. 14 : Les masse – tiges 17
Figure I. 15 : Les outils à molettes 24
Figure I. 16 : Principe de construction des molettes des tricônes 24
Figure I. 17 : Palier à roulements à billes et à rouleaux 25
Figure I. 18 : Système de lubrification des paliers 26
Figure I. 19 : Nomenclature des outils diamants naturels 27
Figure I. 20 : Outils hybrides 29
Figure I. 21 : l outil PDC 31
Figure I. 22 : Les element de l'outil PDC 31
Figure I. 23 : mode de travail d'un PDC 32
Figure I. 24 : Corps en acier 35
Figure I. 25 : Corps en matrice 36

Chapitre II

Figure II. 1: graphe de poids et de la vitesse de rotation optimaux d'après Mitchell . .. 42
Figure II. 2: Le founder point. 43
Figure II. 3: méthode traductionnelle d'expérimentatio. 47
Figure II. 5: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs. 54

Chapitre III

Figure III. 1 : le taux de pénétration en fonction du poids sur l'outil 59
Figure III. 2 : le taux de pénétration en fonction du poids sur l'outil. 60
Figure III. 3 : le taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation. 61
Figure III. 4 : le taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation. 62
Figure III. 5 : le taux de pénétration en fonction de forabilité de la roche. 62
Figure III. 6 : le taux de pénétration en fonction de forabilité de la roche. 63
Figure III. 7 : le taux de pénétration en fonction de l'angle de coupe de l'outil. 64
Figure III. 8 : Le taux de pénétration en fonction de l'angle de coupe de l'outil. 64

Figure III. 9: L'effet du poids sur le taux d'avancement...... 70
Figure III. 10 : L'effet du vitesse de rotation sur le taux d'avancement 71
Figure III. 11: L'effet de forabilité de la roche sur le taux d'avancement 71
Figure III. 12 : L'effet de l'angle de coupe de l'outil sur le taux d'avancement 72
Figure III. 13 : Surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de vitesse de rotation...... 72
Figure III. 14 : Surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de forabilité du roche 73
Figure III. 15 : la surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de l'angle de coupe 73
Figure III. 16 : la surface de réponse du taux d'avancement en fonction de la vitesse de rotation et de la forabilité de roche...... 74
Figure III. 17 : La surface de réponse du taux d'avancement en fonction du vitesse de rotation et de l'angle de coupe 74
Figure III. 18 : La surface de réponse du taux d'avancement en fonction de la forabilité de roche et de l'angle de coupe...... 75
Figure III. 19 : Estimation de corrélation de modèle expérimental et de modèle prévu. 76

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I .1 : Débit de la boue en fonction de diamètre de puits. 18

Chapitre II

Tableau II. 1: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs 54
Tableau II. 2: Principaux logiciels de plans d'expériences 55

Chapitre III

Tableau III. 1: Caractéristiques de la foreuse...... 58
Tableau III. 2: Caractéristiques des roches. 58
Tableau III. 3 : valeurs des paramètres...... 58
Tableau III. 4 : facteurs d'étude...... 65
Tableau III. 5 : Résultats des essais 66
Tableau III. 6 : Analyse de la variance. 67
Tableau III. 7 : Statistiques d'ajustement 68
Tableau III. 8 : Valeurs optimales...... 77

Annexe

Tableau 1. Build Information 90
Tableau 2. les Factors 90

Liste des symbols

BOP: **Blow Out Prevention.**

ROP: **Taux de pénétration [mm/s].**

WOP: **poids sur l'outil [kgf].**

RPM: **Rotation Per Minute [tr/min].**

TSP: **polycristallin stable est thermiquement**.

RMS **méthodologie de surface de réponse.**

PDC **(Poly-cristalline diamant compact).**

NDB **Outils imprégnés de diamant naturel.**

IADC : **Association internationale des entrepreneurs en forage.**

ES : **énergie spécifique**

y : **la réponse qui doit être optimisée**

f : **l'inconnu fonction de réponse**

$x_1, x_2, \ldots, x_k$: **désignent les paramètres ou variables indépendants**

K : **le nombre de variables indépendantes**

Ɛ : l'erreur statistique qui représente d'autres sources de variabilité non prises en compte par f

F: **la distance foré par outil,**

V: **le volume de roche enlevée**

d_b: **le diametre du trépan.**

C_{fd} : **le coefficient de forabilité de la formation,**

p : **la dent de type auto-affûtage**

x_i : **les niveaux codés .**

k: **variables quantitatives.**

bii : **les coefficients sont les termes quadratiques.**

b_{ij} : **les coefficients sont les termes d'interaction.**

n^P : **Le nombre d'expériences**

N : **niveaux apporte noté.**

μ :	**Coefficient de frottement.**
E :	**module de Young en psi.**
L :	**longueur des tiges en [ft].**
A :	**section des tiges.**
T :	**temps d'enregistrement.**
y :	**est la réponse qui doit être optimisée.**
R_C :	**forabilité (dureté) [Kg/cm^2].**
β :	**l'angle de coupe de l'outil [Degré].**
a_0:	**est la valeur de la réponse.**
a_i:	**est l'effet du facteur i.**
a_{ij}:	**est l'interaction entre les facteurs i et j.**

Introduction

Introduction

Le domaine du forage est en pleine concurrence entre les sociétés pétrolières qui cherchent à appliquer des technologies afin d'améliorer la qualité et réduire le temps et le coût en améliorant les facteurs mécaniques de forage à l'image :la vitesse de rotation et le poids appliqué ,que le type d'outil utilisé ,sa conception et les facteurs hydrauliques, la vitesse de pénétration , la liaison entre ces facteurs et le taux de pénétration qui agit le plus sur l'efficacité de l'opération.

L'objectif de ce travail est l'amélioration des facteurs mécaniques de forage pétrolier en utilisant un outil PDC en se basant sur les différents études et lois expérimentales.

Ce travail englobe trois chapitres.

Au premier chapitre on a exposé les différents équipements, types d'outils, facteurs de forage.

Au cours du deuxième chapitre on a montré les méthodes et les expériences antérieures liées à l'amélioration des facteurs de forage en éclaircissant l'approche RMS.

Sur le troisième chapitre on a analysé le comportement mécanique d'un outil PDC pour savoir l'effet des différents facteurs mécaniques sur le taux d'avancement.

Enfin on a déterminé les valeurs optimales des facteurs mécaniques de forage qui rendent le taux d'avancement plus haut.

Chapitre I
Généralités sur le processus de forage pétrolier

.I Introduction

Le choix de l'outil est toujours indispensable pour un forage efficace, dans ce chapitre on citera les types et techniques de forage ainsi que les différents équipements utilisés pour avoir une haute qualité avec un coût réduit en respectant les mesures de sécurité.

.II Aperçusur le forage

Un système de forage est composé de deux parties : l'installation de forage et de garniture, comme le montre le schéma simplifié de la figure 1.1 :

- L'installation de forage est la partie située à la surface du sol. Elle comprend une tour, appelée derrick ou mât, sur laquelle sont situés les équipements de levage et de plancher qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil (trépan).
- La garniture désigne la partie souterraine du système de forage. Elle est constituée, de deux parties principales :
- la partie haute formée du train des tiges (drillstrings),
- la partie basse formée de l'assemblage de fond que l'on a coutume de désigner par BHA (« BottomHoleAssembly ») [12] .

Il existe trois procédés de forage :

- Le forage percutant.
- Le forage rotatif.
- Le forage roto- percutant

.II.1 Le forage percutant

Le forage au battage est la technique la plus ancienne, simple de conception, elles présentent un intérêt surtout dans les terrains sédimentaires [13].

L'air comprimé sert au fonctionnement du piston du marteau qui frappe sur le taillant en appui sur la roche, l'air s'échappe ensuite dans l'espace annulaire entraînant les cutting vers la surface. Le taillant n'étant plus en appui, la totalité du flux d'air s'écoule au travers du marteau sans le faire fonctionner et s'échappe dans l'espace annulaire.

.II.2 Forage rotatif

Les premiers essais de cette technique semblent avoir été faits sur le champ de Corsicana (Texas) ; elle se développa rapidement à la suite de la découverte, en 1901, du champ de spindletop près de Beaumont (Texas) où fut employé un appareil de forage rotary. La méthode consiste à utiliser des trépans à molettes dentées ou des trépans diamantés, sur lesquels on appuie et que l'on fait tourner. L'action combinée du poids et de la rotation permet aux dents des trépans à molettes d'écailler la roche ou aux trépans diamantés de strier et de détruire celle-ci.

La rotation du trépan est obtenue en faisant tourner l'ensemble des tiges de forage qui relient le trépan à la surface.

Pour éliminer les déblais de roches détachés du fond par le trépan, on emploie la technique de la circulation des fluides, inventée par fauvelle en 1845. Elle consiste en l'injection d'une boue (mélange d'eau et d'argile) à l'intérieur des tiges de forage. Celle-ci, passant par les

orifices du trépan, remonte dans l'espace annulaire en entraînant les déblais jusqu'à la surface [12].

.II.3 Le forage roto- percutant

Le forage roto-percutante consiste à appliquer à l'outil de forage, ou taillant, un couple de rotation et une énergie de frappe, cette dernière à cadence élevée (1 200 à 1 500 coups/min, par exemple).

Jusqu'à un passé récent (vers 1970) cette méthode, particulièrement adaptée aux roches dures, était principalement utilisée pour la reconnaissance et l'abattage, en carrières et en tunnels au rocher. Depuis plusieurs années, l'apparition de matériels nouveaux et de plus en plus performants permet l'ouverture du champ d'action de la méthode à la reconnaissance des sols [14].

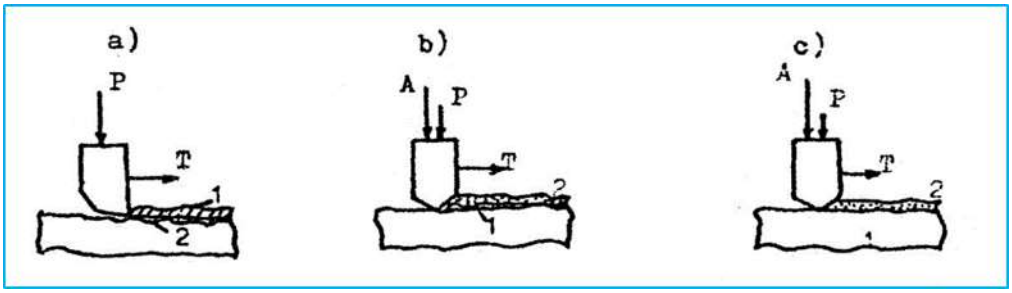

Figure I. 1: Destruction de la roche lors du forage.[10]

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 ; coup.

2 : Destruction de la roche par choc.

.III Description d'un appareil de forage pétrolier

On peut regrouper les équipements de forage en 5 fonctions suivantes :

- Système de Puissance (Power system).
- Système de Levage (Hoisting System).
- Système de Circulation (Circulating System).
- Système de Rotation (Rotating System).
- Système des obturateurs (BOP system).

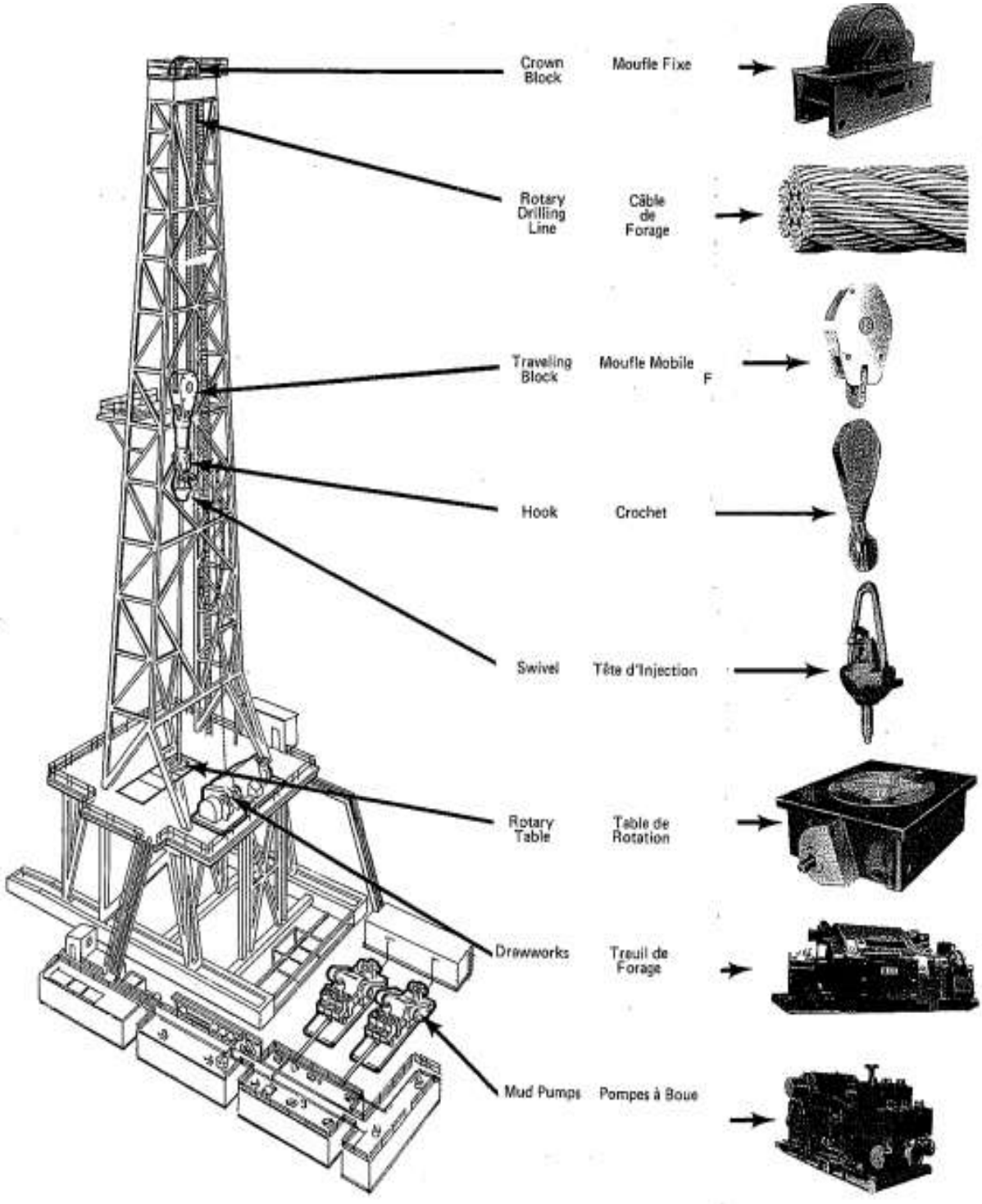

Figure I. 2 : Description d'un appareil de forage pétrolier.[4]

.III.1 Système de Puissance (Power system)

L'énergie est produite par des moteurs diesels, puis elle est acheminée sous forme électrique ou mécanique vers les différents systèmes de l'installation : pompe à boue, treuil et table de rotation. Le coût énergétique est un facteur essentiel dans l'évaluation du coût global de forage ; il s'avère donc impératif de bien l'estimer et de le réduire au maximum tout en garantissant le succès de l'opération de forage. Notre étude qui se base sur la bonne prédiction des couples et des efforts en surface rentre dans ce cadre d'optimisation [15].

Figure I. 3: Système de Puissance .[1]

.III.2 Système de Circulation

Circulation est assurée à l'aide d'un ensemble comprenant essentiellement des :

- Bacs à boue
- Pompes de forage (Duplex ou triplex)**.**

Afin d'assurer la circulation de la boue, les Installations de forage sont équipées d'un système de circulation qui est destiné à amener le liquide de forage sous pression à partir des pompes vers la tête d'injection se déplaçant de haut en bas et vice versa, a renvoyer le liquide de tété de puits dans les réservoirs de recueil des pompes, à éliminer les déblais du liquide et à préparer un nouveau liquide de forage **[1].**

.III.2.1 Bacs à boue

- **Les bacs de circulation**

Ce sont des bassins métalliques dans lesquels la boue peut être fabriquée, maintenue enagitation, aspirée par la pompe de forage et peut y revenir par la goulotte. Leurs volumesvarient de 15 à 50 m^3 selon installation.

- **Les bacs de reserve**

Ils permettent soit de maintenir une boue neuve en attente, soit de stocker une boue déjàutilisée. Leur volume est généralement supérieur à celui de bacs de circulation (50 à 60 m^3).

- **Les bacs de decantation**

Leur volume est voisin de celui des bacs de circulation.

.III.2.2 Pompes de forage (Duplex ou triplex).

Ce sont des pompes alternatives, le mouvement alternatif des pistons et des tiges étant produit par le système classique de la bielle et d'un vilebrequin. Ces pompes de principe volumétrique fournissent un débit qui est directement fonction de la cylindrée de la pompe et du régime de rotation du vilebrequin. Elles doivent être souples, robustes et faciles à entretenir. Elles sont entrainées par des moteurs électriques.

Les pompes de forage peuvent être de type duplex à double effet ou triplex à simple effet.

Ells sont composées de trios parties:

- Amortisseur de pulsation.
- Partie mécanique.
- Partie hydraulique.

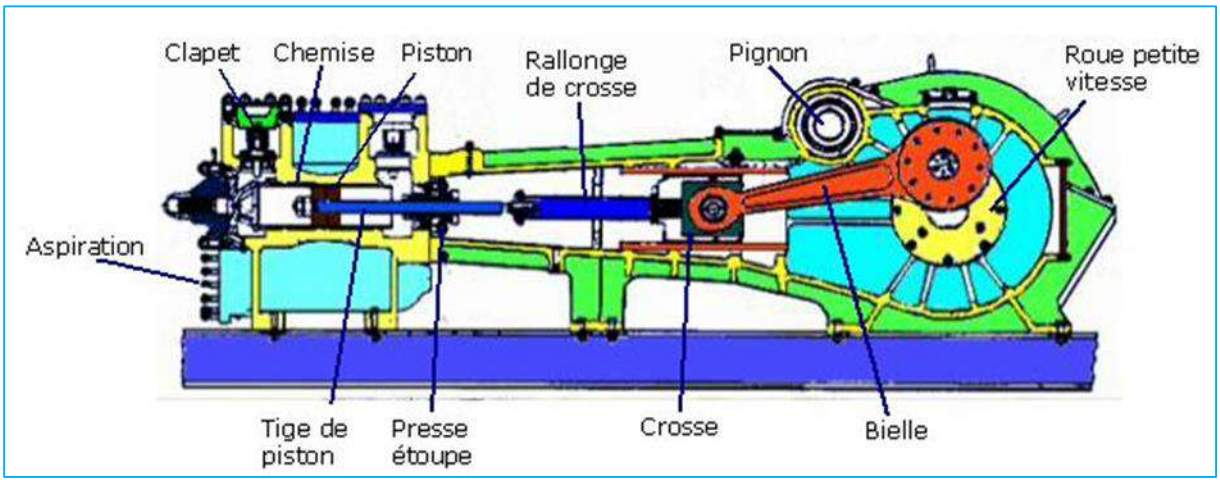

Figure I. 4 : Pompes de forage .[6]

.III.3 Système de rotation (Rotating System)

.III.3.1 Table de rotation

Cet organe mécanique est très simple et ne nécessite que très peu de maintenance,ce qui le rend très attrayant pour les conditions de travail en forage. Le roulement principal doit supporter la charge maximale en statique ou à vitesse de rotation lente,en effet, en forage (au-dessus de 50 tr/min), le poids de la garniture est suspendue au crochet. L'entretien d'une table de rotation consiste à la vérification du niveau et de la qualité de l'huile du système de lubrification. La dimension nominale est caractérisé par le diamètre de passage dans lequel est installé le master bushingdont les rôles sont la suspension de la garniture par l'intermédiaire des cales (slips)et l'entraînement du carré d'entraînement (kellydrive bushing) en forage. Ces dimensions peuvent être 17 1/2, 20 1/2, 27 1/2, 37 1/2 et 49 1/2 (in) [4] .

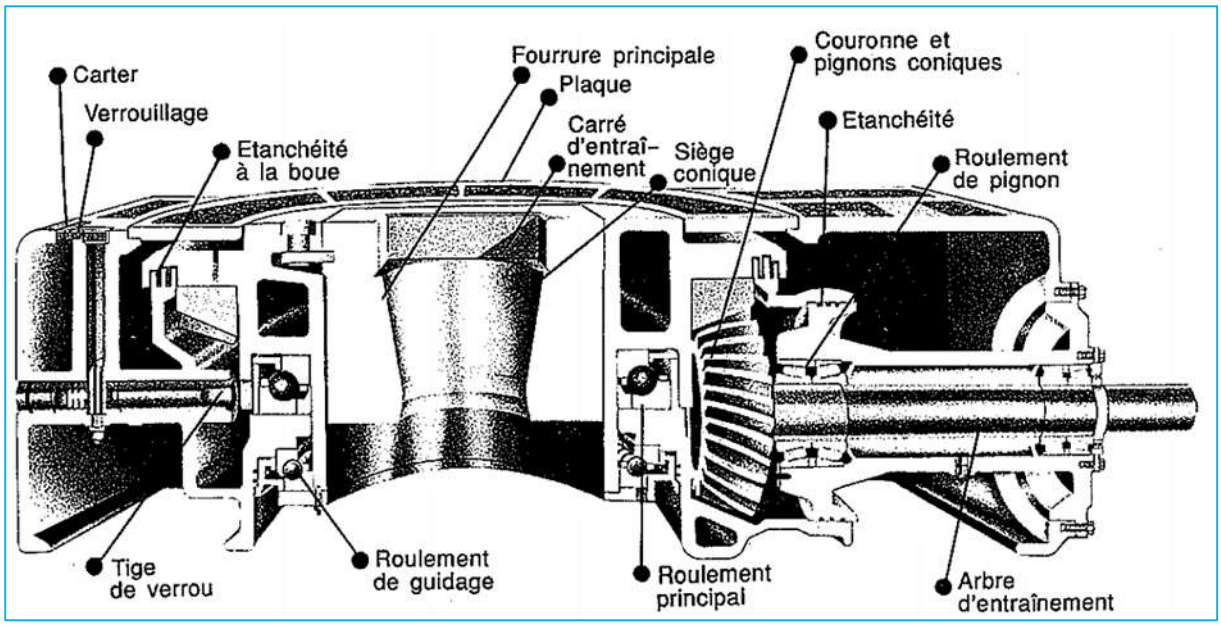

Figure I. 5: Table de rotation . [4]

La motorisation de la table de rotation se fait par l'intermédiaire d'une roue dentée et chaîne soit à partir du treuil soit, sur les appareils lourds, par moteur électrique indépendant de la transmission du treuil.

.III.3.2 La tige-d 'entraînement

De section carrée, hexagonale ou triangulaire, elle est entraînée en rotation parla table et par l'intermédiaire du carré (kelly drive bushing) monté autour de sa longueur courante. Ce carré est constitué de quatre rouleaux à axe horizontal de forme approprié pour transmettre le couple à la tige et par conséquent à la garniture de forage 'vissée sous le raccord inférieur.L'ensemble peut coulisser longitudinalement. De longueur totale 40 ft ou 54 ft, elle dispose respectivement d'une longueur utile de 37 ft ou 51 ft.

.III.3.3 La tête d'injection

C'est le composant qui est suspendu par son anse au crochet de levage. Il doit être conçu à la fois pour la charge maximale de garniture et pour la vitesse de rotation maximale. D'autre part, un joint d'étanchéité rotatif permet l'injection sous pression du fluide de forage par le flexible de forage relié au col de cygne de la tête d'injection.(figure I: 6).

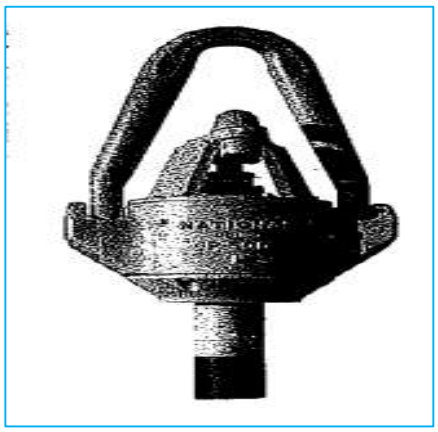

Figure I. 6: La tête d'injection. [4]

.III.3.4 Top drive:

Le top drive est une tête d'injection motorisée qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage.

Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge. En plus, pendant le forage, au lieu de faire les ajouts simples par simple, on peut les faire longueur par longueur.

Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élévateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et il possède une clé automatique et même une coulisse intégrées.

Des rails placés tout le long du mât le guident dans ses déplacements [16].

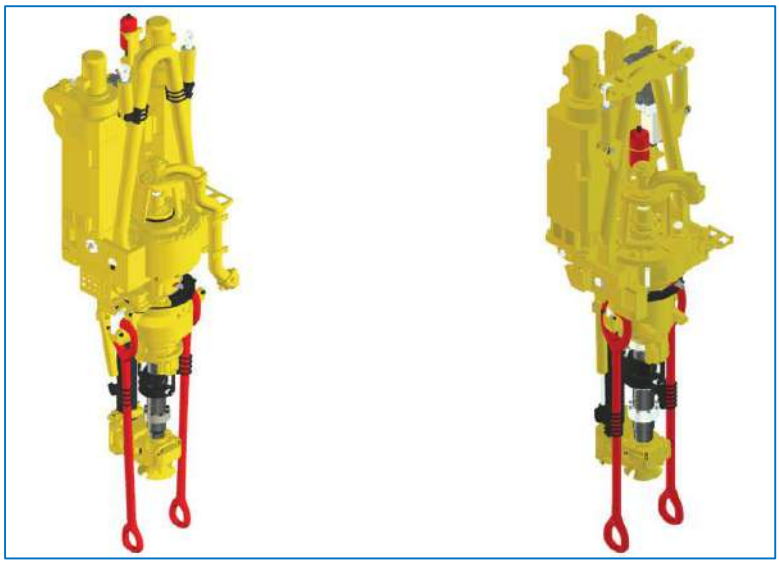

Figure I. 7:Top drive .[3]

.III.4 Système de lavage

.III.4.1 Mât de forage

Le mât est une structure en forme de A très pointu. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de relevage spécial. Cette tour de forage est parfaitement adaptée aux appareils de forage terres tr nécessitant une grande mobilité. La passerelle d'accrochage est en porte-à-faux et le gerbage se fait sur un plancher indépendant (set back) de la structure du mât.

Les spécifications techniques sont identiques à celles des derricks :

- Charge au crochet maximale compte tenu du mouflage.
- Hauteur libre dans le mât.
- Largeur à la base.
- Résistance au vent avec et sans garniture gerbée.

- Les capacités sont comparables à celles des derricks.

Il existe d'autres types de mâts, moins répandus, mais qui répondent aux contingences de mise en place sur une plate-forme de développement offshore où la miseen position horizontale d'un mât.

Conventionnel ne peut se faire à cause de son emprise. Les solutions sont le mât repliable (foldingmast) (Fig. 1.8) et le mât télescopique en deux tronçons qui s'emboîtent l'un dans l'autre puis qui sont couchés àl'horizontal avec un encombrement réduit de moitié [4].

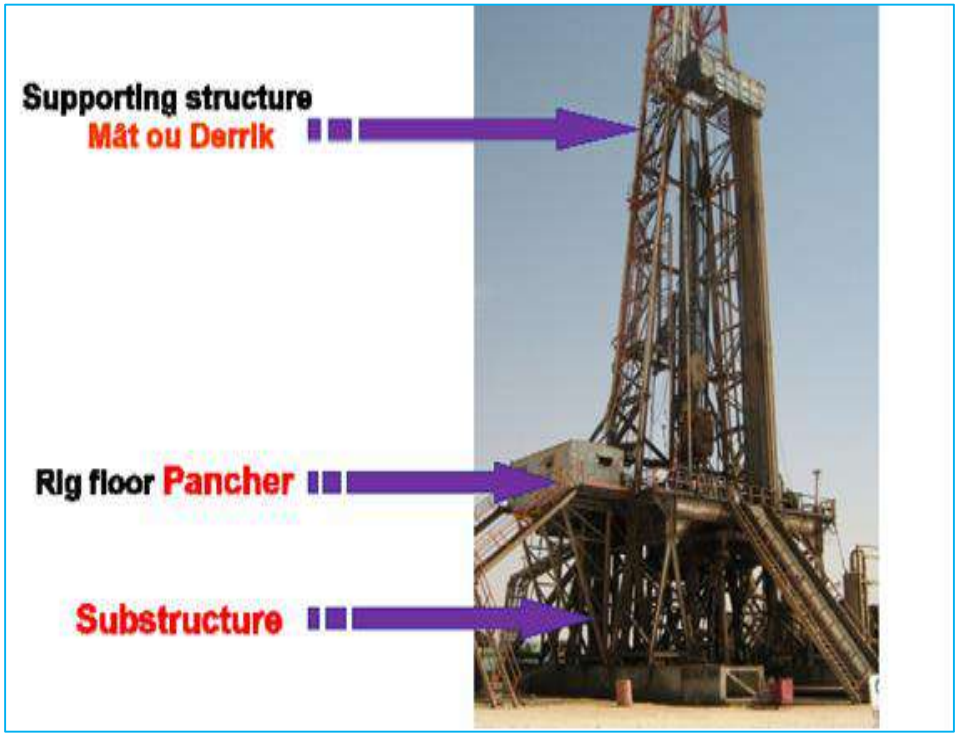

Figure I. 8 : Système de lavage. [1]

.III.4.2 Le moufle

Le système de mouflage est depuis longtemps le moyen de démultiplication des efforts, le plus utilisé et le plus simple pour lever de lourdes charges. Le système de mouflage comprend essentiellement : le moufle fixe, moufle mobile et le câble de forage.

Le système de mouflage comprend un câble qui passe successivement sur les poulies du moufle fixe et du moufle mobile avant de s'enrouler sur le tambour du treuil, l'autre extrémité est fixée sur le réa.

Le nombre de brins (n) varie de 4 à 14.

Le brin actif est la partie du câble comprise entre le moufle fixe et le tambour du treuil.

Le brin mort est la partie de câble comprise entre le moufle fixe et le réa [1].

a) Le moufle fixe

Il est composé d'une série de poulies montées sur le même axe, elles sont montées folles (tournent librement autour de leur axe).

Ce moufle est monté sur un bâti (corps) qui est lui-même posé et fixé sur la plateforme supérieure du derrick.

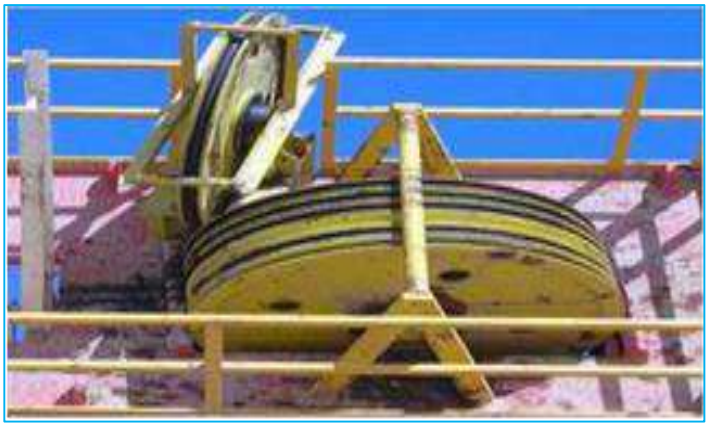

Figure I. 9: Moufle fixe . [1]

b) Le moufle mobile

Il est également composé d'une série de poulies montées sur le même axe, l'ensemble est enfermé dans un carter avec des flasques entre les poulies pour éviter que le câble ne sorte d'une poulie.

Figure I. 10: Le Moufle mobile. [1]

c) Le câble de forage

Le câble de forage représente la pièce d'usure de la fonction levage. L'importance et le rôle du câble nous conduit à insister sur sa technologie.

Les conditions de base que le câble doit satisfaire sont :

- la résistance à la rupture par le choix de la section du câble et de la nuance d'acier.

- la flexibilité : il est obtenu en divisant la section du câble en plusieurs sections distinctes.

Ce sont des câbles d'acier à torons, c'est un ensemble de torons disposés en hélice en une ou plusieurs couches s'appuyant sur un toron central appelé Ame.

Chaque toron est lui-même constitué de files d'aciers disposés en hélice.

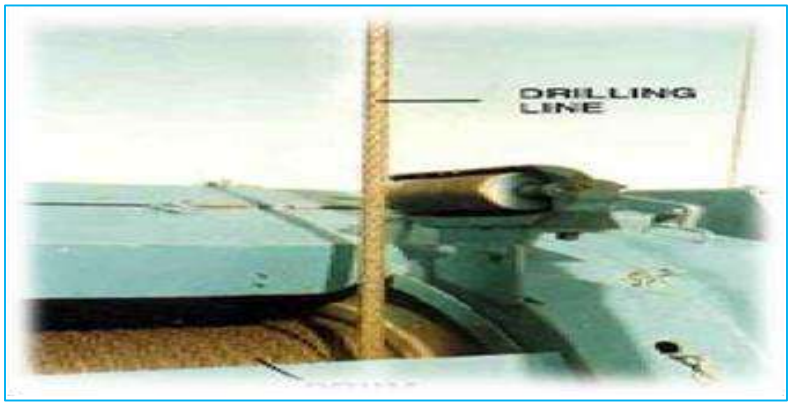

Figure I : 2. Le câble de forage [1]

.III.4.3 Le treuil de forage (Drawworks)

Le treuil de forage est la source de puissance du système de levage, et généralement, il est le cœur de l'appareil de forage. Il est destiné à assurer les manœuvres de remontées et de descentes de train de sonde, ainsi que le train de tubage.

Il assure par fois l'entraînement de la table de rotation, il commande les câbles cabestans et
dispose d'un tambour de curage (entretien).

Les principaux éléments constituant le treuil de forage sont :

- Le châssis du treuil.
- L'arbre tambour.
- L'arbre des cabestans.
- La boite à vitesses.
- Le poste de commande.

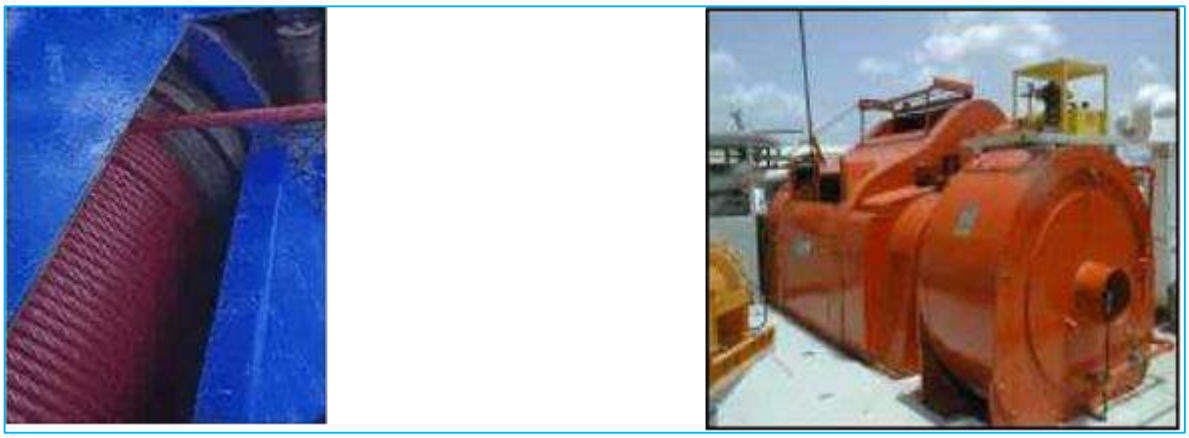

Figure I : 3. Le treuil de forage .[1]

.III.5 Le système des obturateurs (Blowout Prévention (B.O.P) System)

.III.5.1 Généralités

Dès l'établissement du programme de forage du puits et la sélection de l'appareil de forage, la
sécurité des hommes et des équipements est non seulement prise en considération aux niveaux des procédures et équipements, mais elle constitue un souci constant des concepteurs et des différents intervenants.

Le rôle principal garantissant la fonction sécurité d'un appareil de forage est assuré par les obturateurs et leurs accessoires, ou Blow Out Preventer. Notre intérêt se limite dans ce qui suit aux BOP.

Les obturateurs et leurs accessoires ont pour fonctions :

- d'assurer la fermeture du puits en cas de manifestation d'une venue provenant d'une formation renfermant un fluide dont la pression est supérieure à la pression hydrostatique exercée par la boue.
- de permettre le pompage de la boue, sa circulation en vue d'un traitement permettant d'ajuster la densité à la valeur requise en regard de la pression du gisement, et évacuer en toute sécurité et en surface le volume de venue du fluide ayant pénétré dans le puits. Ces opérations étant menées sous pression sont conduites avec la plus haute attention et vigilance de l'ensemble du personnel opérant sur le chantier.

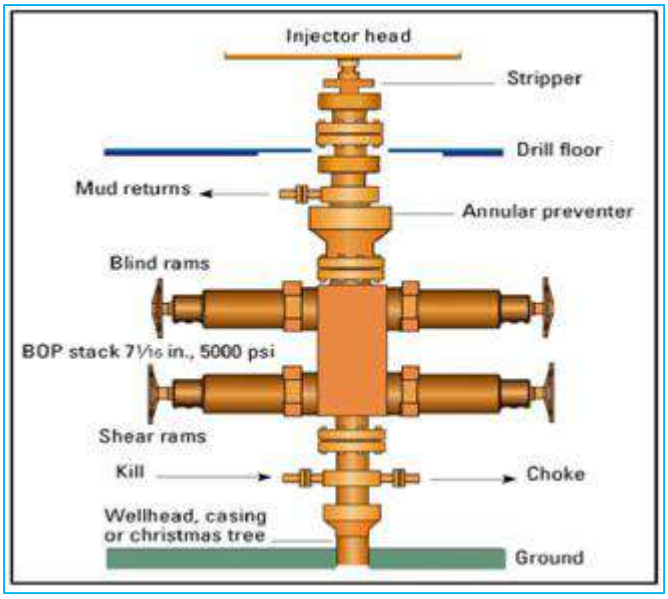

Figure I. 11 : Le système des obturateurs.
[1]

.III.5.2 Les différents types d'obturateurs

1. Obturateurs à mâchoires.
2. Obturateurs à membranes.
3. Obturateurs d'alésage (Inside Blow Out Preventers).
4. Obturateurs rotatifs.

.III.5.3 L'unité hydraulique de commande des BOP

a. Principes des commandes

Tous les BOP et les principales vannes de tête de puits sont à commande hydraulique et fonctionnent suivant le principe de vérins hydrauliques double effet ; chaque fonction nécessite une conduite sur le côté ouverture et une deuxième sur le côté fermeture.

Le principe est le suivant avoir une réserve de fluide sous pression, disponible à chaque instant pour assurer la fermeture ou l'ouverture des obturateurs.

Figure I. 12 : Les manifold .[1]

.IV La garniture de forage

Le forage rotary exige l'utilisation d'un arbre de forage creux appelé garniture, qui a pour principales fonctions :

- entraîner l'outil en rotation.
- appliquer un certain effort.
- apporter l'énergie hydraulique nécessaire à l'évacuation des déblais.

Une garniture de forage est constituée des principaux éléments suivants :

- les tiges [drill pipes].
- les tiges lourdes [heavyweight drill pipes].

les masse-tiges [drill collars] [16].

.IV.1 Les tiges

Les tiges de forage permettent la transmission de la rotation de la table à l'outil et le passage du fluide de forage jusqu'à ce dernier.

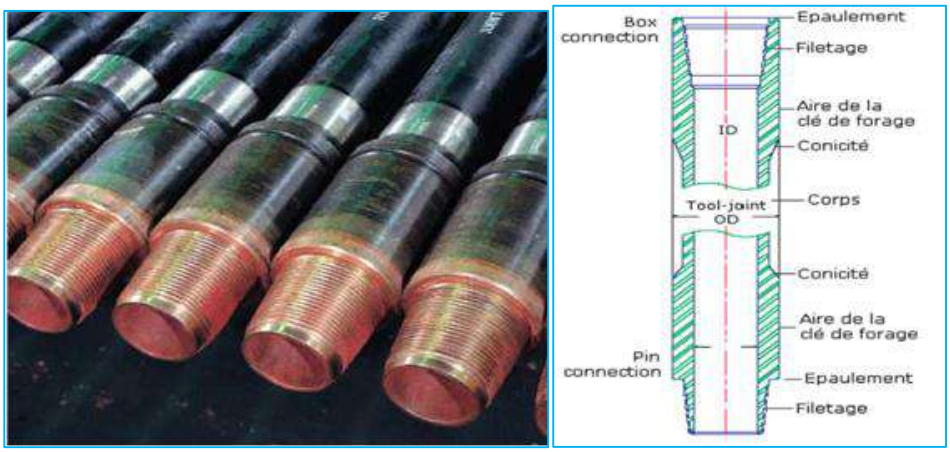

Figure I. 13 : Les tiges .[1]

.IV.2 Les tiges lourdes

Les tiges lourdes ont une flexibilité plus grande que celle des masses tiges et plus petite que celle des tiges normales.

Dans les forages verticaux, les tiges lourdes sont fréquemment utilisées comme intermédiaires entre les masse-tiges et les tiges, il y a à ce niveau une variation desection occasionnant des contraintes plus élevées (flexion plus grande, vibrations), on utilise donc avantageusement une, deux ou trois longueurs de tiges lourdes, entre les masse-tiges et les tiges, chaque fois que les conditions de forage sont difficiles.

Dans les forages dirigés, les tiges lourdes sont utilisées soit au sommet des masse-tiges, soit parfois en le remplaçant totalement, dans ce dernier cas la flexibilité sera suffisante pour que l'outil continue dans la direction donnée par l'amorce de déviation.

Avant les tiges lourdes, on utilisait des tiges de forage normales, malheureusement, ces dernières ont une résistance au flambage insuffisante, comme elles travaillaient en compression, les ruptures étaient fréquentes et nombreuses, l'utilisation des tiges lourdes a grandement amélioré les opérations, surtout en forage dirigé.

.IV.3 Les masse – tiges

Les masse-tiges permettent de :

Mettre du poids sur l'outil pour éviter de faire travailler les tiges de forage en compression, le poids utilisable des masse-tiges ne devra pas excéder 80% de leur poids total dans la boue ; jouer le rôle du plomb du fil à plomb pour forer un trou aussi droit et vertical que possible, elles ne rempliront pleinement ces conditions que si elles sont aussi rigides que possible donc aussi largement dimensionnées que possible.

Figure I. 14 : Les masse – tiges .[1]

.V Les paramètres de forage

Les paramètres de forage sont les différents facteurs mécaniques et hydrauliques pouvant agir sur la vitesse de progression notée ROP (Rate of Penetration) Le ROP correspond à la profondeur (en mètres) forée par heure, l'optimisation du ROP est un aspect très important dans l'analyse du processus de forage car c'est directement lié au temps passé sur une installation onshore ou offshore.

Les principaux paramètres mécaniques sont : le poids appliqué à l'outil, la vitesse de rotation et le couple exercé sur l'outil [17].

En conséquence, il peut être divisé en deux parties :

.V.1 Les paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques sont tous les facteurs liés au fluide de forage, tels que : le débit, la pression, type du fluide de forage, la boue et ses caractéristiques (densité, viscosité…). Ces paramètres jouent le rôle de lubrification, de refroidissement et vont permettre le nettoyage du fond, mais ils affectent la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil.

.V.1.1 Débit

Le bon nettoyage du fond est basé sur le calcul de la vitesse de sédimentation des déblais dans l'annulaire, qui est déterminé en fonction de la forme et du diamètre équivalent des déblais, du régime d'écoulement du fluide et de la quantité de la sédimentation, ainsi que les paramètres rhéologiques du fluide.

Donc le débit a une influence sur l'avancement, mais jusqu'à une certaine valeur limite selon la formation géologique traversée ,au de-là de cette valeur limite, il risque au contraire d'être nuisible par la formation de caves et d'érosion des parois au droit des masses tiges.

.V.1.2 La pression du fond du puits

Étant donné que la pression du fond est la différence entre la pression hydrostatique du fluide de forage et la somme du poids des sédiments sus-jacents exercés à une profondeur avec la pression de pores, plus cette différence est grande, plus l'effort pour vaincre est grand.

Si la différence diminue, la vitesse d'avancement sera élevée et par conséquent le phénomène de poussée d'Archimède sur la garniture de forage apparait.

.V.1.3 Type du fluide de forage

Le choix du type de la boue à utiliser et de ces caractéristiques, joue un rôle très important, car le choix dépend de la formation traversée, de la pression et aussi des problèmes rencontrés et de la durée de forage et donc le prix de revient de celui- ci. C'est-à-dire que si on choisit une boue qui ne convient pas à la couche à foré, on sera exposé à d'énormes problèmes qui résultent soit de sa composition (contamination), soit de ses caractéristiques (pertes et venues)

.V.1.4 Caractéristiques du fluide du forage

.V.1.4.1 Densité

La densité est l'une des facteurs de boue agissant sur le transport des "cuttings" puisqu'elle représente la capacité de soulever les déblais du fond vers la surface, la densité peut se modifier selon les circonstances du forage sans pour autant dépassé une certaine limite afin d'assurer un bon nettoyage du fond.

.V.1.4.2 Viscosité

Des essais ont mis en évidence l'influence néfaste de la viscosité sur la vitesse d'avancement, il est assez logique de penser que, plus un liquide est visqueux, plus il a des difficultés à pénétrer dans les porosités ou les petites fractures produites par l'outil et par conséquent aider à la destruction de la formation.

.V.1.4.3 Les jets

Le jet de boue a pour effet de nettoyer le fonds du puits et également d'induire une turbulence suffisante pour laver la denture de l'outil, on considère que la vitesse minimale doit être de l'ordre de 80 m/s, la fourchette étant généralement de80 à 150 m/s [4].

Tableau I .1 : Débit de la boue en fonction de diamètre de puits.

Diamètre forage (in)	Débit moyen (1/ min)	Dusage pour vitesse aux évents (en 1/32'')	
		80 m/s	150 m/s
17 1/2	3500	22-22-22	16-16-17
12 1/4	2300	18-18-18	13-13-13
8 1/2	1300	13-14-14	9-10-10
6	700	10-10-10	7-7-7

.V.1.4.4 Filtrat

Cette influence est assez mal définie, les faibles densités et viscosités qui vont généralement de pair avec un filtrat élève, semblent plutôt à l'origine de 1'amélioration constatée des performances.

.V.1.4.5 Pourcentage d'huile dans la boue

L'expérience a montré que l'huile ajoutée à la boue augmente la vitesse d'avancement, de plus, la lubrification par l'huile prolonge la durée de vie des roulements de l'outil.

.V.2 Les paramètres mécaniques

Sont des paramètres issus par l'utilisation des processus mécaniques appliqués sur la roche telle que la traction et la compression pour un bon avancement. Ces paramètres sont [18].

.V.2.1 Vitesse d'avancement ou ROP (Rate Of Penetration)

Le ROP étant définie comme le taux de mètre par unité de temps, ce paramètre est le plus important car tout les autres paramètres sont liés d'une manière ou d'une autre à l'outil dont l'objectif principal est d'optimiser la vitesse d'avancement.

.V.2.2 Outil neuf et changement d'outil

Lorsque l'on descend un outil neuf, il n'est pas recommandé d'appliquer immédiatement le poids maximum, en effet, si l'outil remonte est du même type mais usé, l'empreinte de fond de trou laissée est différente, si l'on applique brutalement le poids maximal, la mauvaise répartition des charges (sur le nez du cône n° 1, et les talons des trois cônes en particulier) pourrait être la cause de détérioration rapide de ces parties.

A plus forte raison, lorsque l'outil remonté a perdu du diamètre, en plus des risques précédents, il y a risque de coincement dans le forage de diamètre plus petit.

C'est pourquoi, avec un outil neuf, il faut forer les premiers centimètres avec peu de poids et rotation réduite. Dans le cas de perte de diamètre, il faut reforer très prudemment les derniers mètres forés par l'outil précédent.

Si l'outil est d'un type différent, il s'agit de tracer, un nouveau profil de fonds de trou.

D'où l'importance du constat de l'usure d'un outil, que l'on appelle le bit record. La décision de remonter un outil ne doit pas être arbitraire, mais les seules indications pour le foreur sont :

- la diminution de la vitesse d'avancement.
- L'augmentation régulière du couple à la rotation. Mais les à-coups de couple ne sont pas toujours l'indication que l'outil est usé ; ils peuvent provenir du pendage des formations, du profil du puits, des stabilisateurs placés dans le train de masses-tiges.

.V.2.3 Les utilisations sont anormales

Dans le choix d'un outil, lorsqu'il n'y a pas de changement de terrain, les outils remontés fournissent des indications précieuses.

Un outil sera dégradé pour l'une des raisons savantes :

- Usure des dents à un degré tel qu'aucune action de destruction de la formation n'est plus possible.
- perte de diamètre, avec pour conséquence la réalisation d'un trou de plus petit diamètre.
- détérioration des roulements résultant d'une charge trop élevée (molette coincée).

On peut admettre en première analyse :

- qu'un outil dont seuls les roulements sont usés, demande à être remplacé par un outil de nuance plus tendre,
- qu'un outil dont l'avancement décroît rapidement et remonté avec des dents complètement usées, mais sans jeu excessif dans les molettes, demande à être remplacé par un outil de nuance plus dure,
- qu'un outil remonté avec une perte importante sur le diamètre, mais une usure normale au point de vue dents et roulements, devra être remplacé par un outil bien protégé sur l'extérieur, et ayant un minimum d'offset.

.V.2.4 Le poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit)

Un test de forabilité typique qui illustre le changement de ROP contre le WOB, la réponse de ROP au changement de WOB est caractérisée par 03 régions, la première région est quand le WOB appliqué est insuffisant pour forer ainsi plus de poids est nécessaire pour être appliqué sur l'outilpour pousser ses dents à l'intérieur de la formation, le forage dans cette région est inefficace et le poids appliqué, appelé au-dessous de la profondeur de la coupe, devrait être augmenté pour atteindre la valeur exigée de l'outil pour forer ou ce qui s'appelle le poids de seuil.

Dans la deuxième région un forage efficace a été établi et la ROP réponde linéairement au changement de WOB. Dans cette région l'efficacité de forage est à son maximum et la ROP peut seulement être augmenté par une augmentation de WOB, la pente de la ligne de ROP versus WOB dépendent du type de formation, du type de l'outil et de la vitesse de rotation.

La troisième région commence au point d'effondrement (founder point) quand la ROP arrête à augmenter linéairement avec le WOB, ceci signifie que le système a approché son performance maximale dans les conditions actuelles, de nouvelle conception est nécessaire pour plus d'amélioration de ROP, les causes du point d'effondrement peuvent être des vibrations sévères, mauvais nettoyage du trou ou bourrage de l'outil de forage [7].

.V.2.5 Vitesse de rotation ou RPM (revolution per munite)

Le poids sur l'outil est étroitement lié à la vitesse de rotation, on ne peut pas augmenter indéfiniment et simultanément ces deux paramètres sans provoquer un travail extrêmement dur pour le train de sonde et l'outil de forage.

D'après les études, il ressort que la vitesse de pénétration croit en proportion directe avec la vitesse de rotation dans les terrains tendres, mais pas dans les terrains durs. Pour ces derniers, il existe une vitesse optimale au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus, cette vitesse maximale de rotation décroit au fur et à mesure que la dureté de la formation géologique

augmente, par ailleurs la vitesse optimale de rotation décroit quand on augmente le poids sur l'outil.

.V.2.6 Les roches

Une **roche** est un assemblage de minéraux comportant parfois d'autres éléments tels que des fossiles ou des fluides.

Un **minéral** est une espèce chimique dont les constituants (atomes ou ions) sont, le plus souvent, organisés en un réseau cristallin, un **cristal** est un ensemble d'atomes ordonnés dont l'organisation présente une unité élémentaire, la maille, qui, répétée dans l'espace, forme le réseau cristallin, dans un **verre**, l'arrangement des constituants est. non ordonné [19].

.V.2.6.1 Grandes catégories de roches

Trois grandes catégories de roches en fonction de leur genèse.

Il est fréquent de classer les roches en fonction de leur origine en trois groupes : roches sédimentaires, roches magmatiques et roches métamorphiques.

A. **Les roches magmatiques** (ou roches ignées) sont le résultat de la solidification d'un magma.

B. **Les roches magmatiques plutoniques** se forment en profondeur après une cristallisation lente.

Ex.: granitoïdes, gabbros.

C. Les **roches magmatiques volcaniques** se forment en surface après une cristallisation rapide.

Ex.: basaltes

D. **Les roches sédimentaires** sont formées en surface, à partir de sédiments constitués de particules issues de l'érosion des continents ; elles se déposent après avoir été transportées, Ces particules peuvent être unies par un ciment.

Ex.: calcaires

E. **Les roches métamorphiques** sont des roches (ou **protolithes**) transformées à l'état solidelorsqu'elles ont été soumises à des conditions thermodynamiques (température et/ou pression).

différentes de celles de leur formation. Selon que le protolithe est sédimentaire ou magmatique, on distingue des roches paradérivées (paramétamorphiques) ou orthodérivées (orthométamorphiques).

Ex. : le gneiss.

F. **Les roches mantelliques**

Ne peuvent pas entrer dans cette classification.

.V.2.7 Deux grandes catégories de roches en fonction des conditions de mise en place

- Les **roches endogènes** sont formées, entièrement ou partiellement, en profondeur.

Ex. : péridotites, gabbros, éclogites.

- Les **roches exogènes** sont formées à la surface du globe. Les roches résiduelles (roches issues de l'altération d'autres roches préexistantes ;

Ex. : roches argileuses issues de la décalcification d'un calcaire).

.V.3 L'effet du type de roche sur les performances de l'outil de forage

Les performances de l'outil seront influencées par de nombreux paramètres

La géologie de la roche (composition minéralogique, origine et granulométrie des différents constituants, conditions de dépôt, diagenèse, contraintes encaissées par la roche au cours de son histoire, etc.).

Son environnement au moment du forage (contraintes produites sur la roche par le confinement, par la présence du trou creusé par l'outil, par la pression exercée par le fluide de forage sur la paroi du puits, par la pression de pore dans la formation, par la température de la boue, etc.).

.V.4 Mécanisme de rupture des roches par les outils

Parmi les principales difficultés de l'étude de la destruction des roches par des outils mécaniques il y a la définition d'un critère de rupture et par suite la difficulté de préconiser la mesure d'un ou de plusieurs paramètres de la roche qui seraient représentatifs des possibilités de sa fragmentation par une machine d'abattage [20].

Lors de la pénétration de l'outil dans la roche, il se forme nécessairement une zone de roche broyée au voisinage immédiat de l'outil ; cette zone d'une certaine étendue apparaît nécessaire à l'éclatement de la roche(quel que soit le mode de rupture du matériau) , au cours de l'avancement de l'outil, la roche au contact est ce plus en plus tassée et broyée tout autour de la surface de contact outil roche cette surface sur la quelle agissant les efforts croit au fur et à mesure de l'avancement de l'outil avec comme conséquence directe la réduction de la contrainte maximale dans la roche et donc l'augmentation des effort nécessaires à la destruction de la roche.

Cela montre l'intérêt d'utiliser des outils tranchants de manière à ce que les efforts de compression génèrent des contraintes très élevées et très localisées à la pointe de l'outil. Les contraintes de compression sont responsables du broyage (écrasement) et peuvent induire aussi des tractions indirectes justes à l'extérieur de la zone de compression.

.V.1 Principe du choix des outils

Les terrains traversés par le forage présentent une grande variété de dureté ou plutôt de forabilité. Pour détruire des roches ayant de telles différences de forabilité. Les outils utilisés procéderont suivant des principes différents[21].

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

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

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

Pour les terrains tendres, mi- tendres et mi-durs, les outils les plus utilisés sont les tricônes à molettes. Ces outils ont trois molettes portant une denture ayant une géométrie variable suivant la fonction destinée.

Les molettes d'un tricône permettant de réaliser les actions d'arrachement de la roche sont contenues dans un volume très réduit, déterminé par le diamètre de forage .cette contrainte a conduit à un compromis entre la hauteur des dents, l'épaisseur de la coquille des molettes et la taille des roulements La hauteur des dents par rapport au diamètre du tricône différencie aussi les réactions des tricônes selon leur affectation. Terrains tendres, moyens ou durs.

.VI Choix de outil de forage

En raison de la diversité et de la diversité des types de roches, ainsi que des types d'outils de forage, il n'est pas facile de choisir l'outil de forage optimal, en fonction des paramètres de forage, Le meilleur outil est celui qui est le plus bas prix par mètre, et fonctionne le plus longtemps possible.

Le choix de l'outil est un facteur essentiel pour l'avancement du forage à cause des duretés variables des formations géologiques du terrain et de la très grande variété des types d'outils utilisés .Le nombre, la taille, la forme des dents et la conception des dusses sont des caractéristiques qui influent sur l'avancement de l'outil et par conséquent il n'est pas facile de choisir le meilleur outil pour le terrain [18].

Il existe cinq principaux types d'outils utilisés dans le forage des puits pétroliers :

1. Outils tricônes à molettes.
2. Outils imprégnés de diamant naturel (NDB).
3. Outils thermiquement stables (TSP).
4. Outils compacts en diamant poly-cristallin (PDC).
5. Outils hybrids.

.VI.1 Les outils à molettes

Un outil à molettes est constitué de trois parties principales : les molettes, les roulements et le corps de l'outil. Les molettes présentent des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des cônes adjacents. Les dents sont soit en acier usinées dans le cône, soit des picots de carbure de tungstène sertis dans des perçages à la surface des cônes. Les molettes sont montées sur des arbres de roulements qui sont partie intégrante du corps de l'outil [4].

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du typede formation à forer. Les outils pour formations tendres, qui nécessitent peu de poids, ont des roulements plus petits, des cônes moins épais et des jambes de plus faible section que les outils pour formations dures. Ceci laisse plus de place pour des éléments de coupe longs et minces.

Les outils pour formations dures, qui travaillent avec des poids plus importants, ont des éléments de coupe plus trapus, des roulements plus gros et des corps plus solides.

Figure I. 15 : Les outils à molettes .[1]

.VI.1.1 Géométrie des cônes

Pour comprendre comment la géométrie des molettes peut affecter la façon dont, les dents coupent la roche, considérons le cône pour formation tendre schématisé sur la figure 1.20**.** Il a deux angles coniques de base, et aucun d'entre eux n'a son sommet au centre de l'outil. Comme les cônes sont obligés de tourner autour de l'axe de l'outil, ils glissent en même temps qu'ils tournent et ont une action de gouge et de cisaillement efficace pour le forage des formations tendres. L'augmentation de cet effet pour améliorer la vitesse d'avancement dans les formations tendres s'obtient en décalant les axes des cônes par rapport à l'axe de rotation de l'outil (Fig. 1.16). Les cônes des outils pour formations dures ont un mouvement plus proche du roulement vrai, et présentent peu d'offset. De ce fait, ils brisent la roche surtout par écrasement.

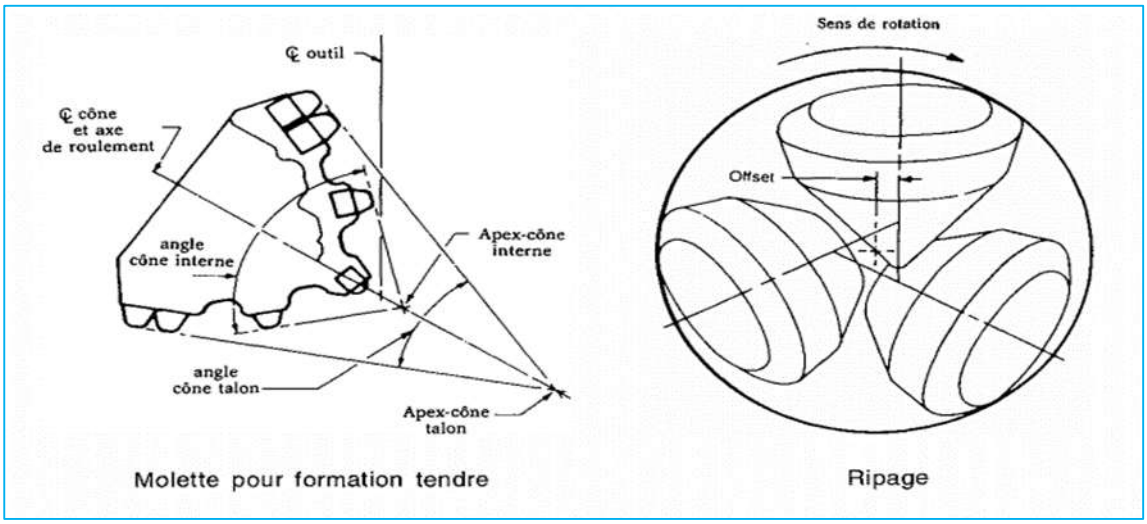

Figure I. 16 : Principe de construction des molettes des tricônes .[4]

.VI.1.2 Conception des paliers

Trois types de paliers existent actuellement :

- roulements à billes ou rouleaux non étanches.
- roulements à billes ou rouleaux étanches.
- paliers de friction.

Les roulements à billes ou rouleaux non-étanches et non lubrifiés sont principalement utilisés de nos jours pour les débuts de trou où les temps de manœuvre étant courts, la durée de vie de l'outil est moins pénalisante. Les cas où des vitesses de rotation importantes sont souhaitées leurs sont aussi favorables **(**Figure**.** 1.17). Lorsque le fluide de forage est soit l'air, le gaz ou la mousse, on utilise également des outils à roulements billes et rouleaux non-étanches. Toutefois, ces outils sont conçus de manière à ce qu'une partie du fluide de forage soit orientée vers le palier afin de le refroidir.

Le palier étanche à billes ou rouleaux fut créé pour les outils à picots. Actuellement, ce système équipe principalement les outils à dents et sa durée de vie est au moins égale à celle des éléments de coupe.

Le palier de friction (journal bearing) développé pour faire coïncider sa durée de vie avec celle des éléments de coupe au carbure ne contient aucun élément mobile, mais uniquement un palier mâle ajusté sur l'alésage interne du cône. Les zones de contact entre l'arbre du palier et l'alésage du cône sont carburées, revêtues de métaux spéciaux, et reçoivent un traitement spécial augmentant la résistance à l'usure et protégeant du grippage.

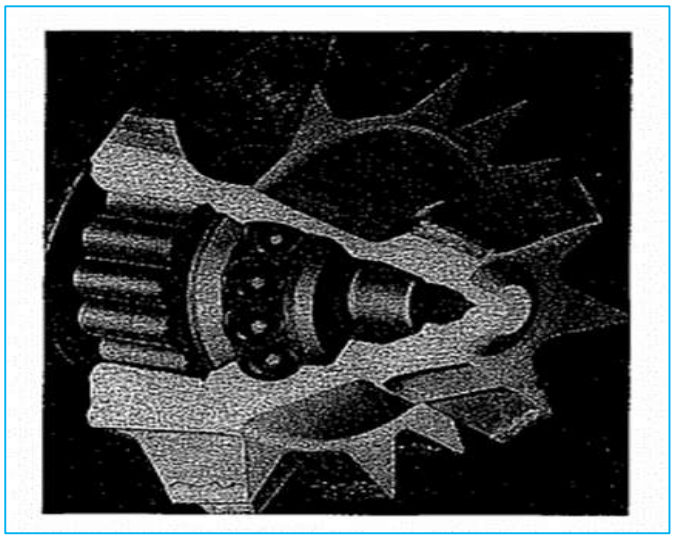

Figure I. 17 : Palier à roulements à billes et à rouleaux
[4]

.VI.1.3 Système de lubrification

Les outils à paliers étanches ont leur système de lubrification dans chaque bras. Celui-ci comprend un réservoir à graisse, un compensateur par membrane caoutchouc et un canal étanche. Le compensateur égalise la pression dans le roulement entre celle du fluide de forage et celle de la graisse encapsulée à la fabrication.

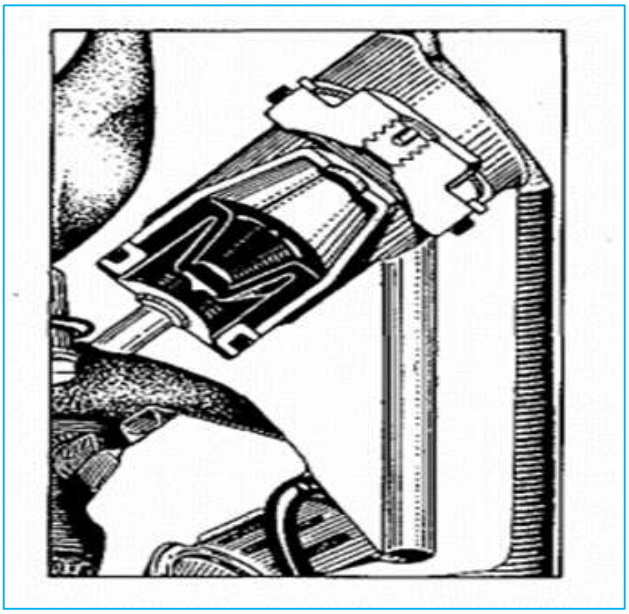

Figure I. 18 : Système de lubrification des paliers .[4]

.VI.2 Outils diamant naturel

Le diamant (carbone cristallisé) est le matériau le plus dur que Ton connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80 000 bar (carbure de tungstène : 50 000 ; acier C.45 : 15 000). Son point de fusion est très élevé (3 650 °C) mais il se transforme superficiellement en graphite vers 1 450 °C. Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0,2 gramme). Pour les outils de forage, la taille des pierres se mesure en nombre de pierres par carat et varie généralement entre 2 et 12 pierres au carat.

La taille, le type et la quantité de diamants pour un outil donné dépendent de la vitesse d'avancement prévue, de la taille des déblais et de l'homogénéité de la formation à forer. Lors du forage à faible vitesse de pénétration des formations dures, les déblais sont très petits et sont plus facilement évacués qu'aux grandes vitesses d'avancement. De petits diamants peuvent être utilisés pour obtenir une contrainte maximale sur le front de taille, sans nuire à l'évacuation des déblais. D'autre part, les formations plus tendres nécessitent une contrainte plus faible. Des diamants plus grands sont utilisés pour arracher un volume de roche plus gros, et avoir plus d'espace pour le passage des déblais. Bien qu'il existe des règles générales pour le choix de la taille des diamants, l'expérience acquise lors de passes d'outils précédents reste le meilleur des guides.

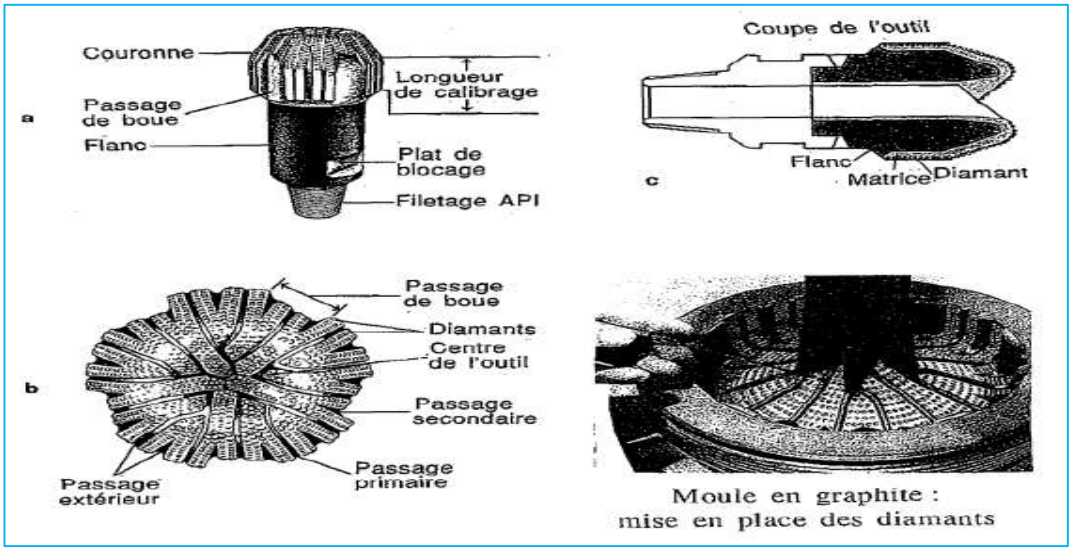

Figure I. 19 : Nomenclature des outils diamants naturels .[4]

.VI.2.1 Utilisations des outils diamants

Comme tout choix d'outil, la décision de forer au diamant doit reposer sur une analyse de coût. Certaines situations en forage suggèrent l'utilisation économique d'un outil diamant [4].

1) Lorsque la durée de vie des outils à molettes est très courte du fait de l'usure des roulements ou des dents, ou de la cassure des dents.
2) Lorsque la vitesse d'avancement est très faible (1,5 m/h ou moins), à cause d'une densité de boue élevée, ou d'une puissance hydraulique insuffisante de l'appareil de forage.
3) En diamètre six pouces ou moins, où la durée de vie des outils à molettes est limitée.
4) Pour les montées d'inclinaison en forage dirigé.
5) Quand le poids sur l'outil est limité.
6) En turboforage, où la vitesse de rotation élevée favorise l'avancement de l'outil diamant.

L'utilisation de l'outil diamant est limitée dans certaines formations fracturées très dures où les diamants peuvent être exposés à des chocs violents. Les formations contenant des silex ou de la pyrite réduisent la durée de vie de l'outil diamant lorsque des morceaux se dessertissent et roulent sous l'outil en endommageant les diamants.

.VI.2.2 Différents types des outils diamants :

Il existe de nombreux types d'outils. Il faut se rappeler qu'un outil est défini par [22].

- Le nombre de « carats » que contient l'outil,
- Le nombre de « pierres au carat » qui définit la taille des pierres.
  - Grosses pierres : 1 à 4 au carat.
  - Petites pierres : plus de 6 au carat.

- La disposition et l'exposition des pierres.

Il est évident que les outils pour :

- Terrains tendres auront :
  - Des grosses pierres
  - Une exposition plus grande (jusqu'à 45% de la pierre).
- Terrains dures
  - Petites pierres
  - Très faible exposition

.VI.2.3 Conception des outils diamants :

La conception et sélection adéquate d'un outil de forage en diamant destiné à une application spécifique sont une procédure compliquée. Chaque outil est fabriqué dans son propre moule, il peut avoir les caractéristiques de conception standard ou des caractéristiques spéciales pour aider à face aux problèmes de forage spécifiques. A cause de sa capacité unique de pouvoir être fabriqué sur commande en seulement 16 à 72 heures (selon la dimension), toute information disponible concernant l'application de l'outil doit être étudiée et évaluée plus la valeur de l'information disponible est compréhensible, plus il sera possible de minimiser le coût du forage. Avant de considérer les caractéristiques des détails de conception les conditions sous lesquelles l'outil diamant travaillera doivent être listées. Ces conditions sont suivantes :

- Formation.
- Profondeur.
- Capacités de l'appareil.
- Hydrauliques.
- Stabilisation.
- Inclinaison du puits.
- Conditions de fond.
- Données du fluide de forage (densité, débit….).
- Diamètre du dernier tubage et/ou du trou.
- Performance actuelle et/ou passée des autres outils.
- Problèmes anormaux.
- Considérations spéciales.

.VI.3 Outils hybrides

Le terme « hybride » vient du mariage de la technologie des taillants PDC et diamant naturel montés sur un même outil. Un élément secondaire de carbure de tungstène imprégné de diamant est placé derrière la dent en PDC. Ces seconds éléments sont généralement appelés « imprégnés ». Chaque imprégné va de paire avec un PDC spécifique situé à un endroit critique, potentiellement exposé à l'usure [9].

On trouve des outils hybrides aussi bien sur les corps en acier que sur les matrices. Dans les deux cas, les imprégnés contiennent de nombreux petits diamants naturels sur la face exposée au contact de la formation durant les sévères conditions de forage. Les outils hybrides à matrice ont l'imprégné incorporé dans le moule pendant le processus de fabrication du corps (figure I.20).

Les outils hybrides avec corps en acier utilisent des composants séparés qui sont fabriqués à partir du carbure de tungstène.

La plupart des fabricants développent pour un même outil, les deux versions hybride et non-hybride.

Cependant, les performances des outils hybrides ont amené une réduction des demandes concernant les outils non-hybrides. D'où la tendance des fabricants à offrir seulement des conceptions hybride

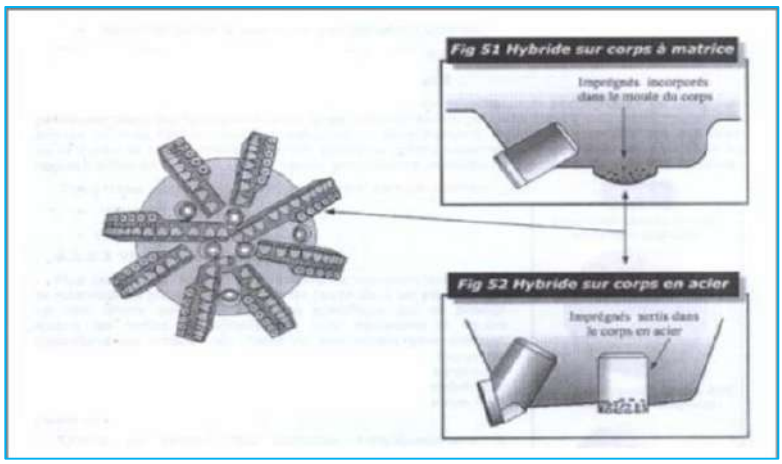

Figure I. 20 : Outils hybrides . [9]

.VI.3.1 Avantage des outils hybride

Le TSP présente de nombreux avantages sur les autres types de diamant [1].

- Il résiste mieux à la température que le PDC.
- Grâce à sa structure poly cristalline, il résiste mieux au choc que le diamant naturel.

Son usure irrégulière produit des faces tranchantes alors que le diamant naturel s'émousse. De ce fait, les performances des TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil.

- Leur forme triangulaire présente des arêtes agressives pour le cisaillement de la roche
- L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de destruction des PDC et des diamants naturels.

.VI.4 Outil (TSP)

Thermiquement (TSP) polycristallin stable est thermiquement le produit polycristallin stable de diamant, qui est fabriqué par la mêmes pression ultra-haute et techniques à hautes températures liées à d'autres produits de PCD. C'est thermiquement des jusqu'à 1200 degrés stable Celsius. Il peut être manufacturé dans un grand choix de tailles et de formes (cubes, cylindre, rectangles, triangles, etc.) [23].

Le TSP de triangles est une triangle équilaterale.

Le peu d'exploitation et de forage de pétrole de TSP est plus adapté pour des formations plus abrasives ou plus cassées. Le peu de perceuse et les coquilles d'alésage faites avec des diamants de TSP conviennent à forer dedans les roches molles avec la dureté en-dessous de 7 degrés, tels que la roche de chaux, le marbre, le schiste, etc. ; et dans le milieu aux hards rock avec les céréales secondaires, telles que la roche sédimentaire. Les résultats obtenus en médias de perçage dans le hard rock et formations abrasives non-uniformes sont bien mieux que ceux obtenus en imbibant le peu de perceuse ou en marquetant un cristal naturel simple de diamant sur la surface.

.VI.5 Classification IADC

Cette classification se fait à l'aide de quatre caractères. Elle est donc cohérente avec la classification des outils tricônes. Comme les codes d'usure sont communs entre les outils tricônes et les outils à éléments de coupe fixes, les rapports journaliers, rapports d'outils et bases de données se remplissent de la même façon [4].

- Le premier caractère (D, M, S, T, O) définit le type d'élément de coupe : diamant ,PDC et corps fritté, PDC et corps acier, TSP, autres types.
- Le deuxième caractère (chiffre de 1 à 9) définit le type et la forme générale du profil.
- Le troisième caractère concerne l'hydraulique en général.
- Le quatrième caractère (chiffres de 0 à 9) définit la taille des éléments de coupe et leur densité sur l'outil.

.VI.6 Les PDC (Poly-cristalline diamant compact)

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

C'est *General Electric* qui a mis au point la synthétisation de ces pastilles diamantées (Stratapax) constitués d'un dépôt de quelques dixièmes de millimètre de diamant synthétique sur un disque en carbure de tungstène. Ces pastilles sont ensuite disposées à la surface de l'outil de façon à fournir à chaque élément de coupe l'action de cisaillement maximale.

L'inconvénient majeur des PDC est de ne pas supporter des températures au-delà de 800 °C. Ceci interdit de les enchâsser dans une matrice carbure comme des diamants naturels. Il faut donc les fixer sur la matrice par brasure dans des logements prévus au moulage. Dans le cas des corps aciers, les pastilles PDC sont également brasées sur des plots cylindriques qui seront ensuite sertis dans des perçages.

Le développement de ces produits élargi sans cesse les applications des outils PDC, la fourchette de dureté des formations adaptées se situe entre mi-dur à tendre. Les limitations qui peuvent apparaître sont la résistance au terrain abrasif et l'efficacité hydraulique pour le nettoyage des pastilles PDC.

Figure I. 21 : l outil PDC .[1]

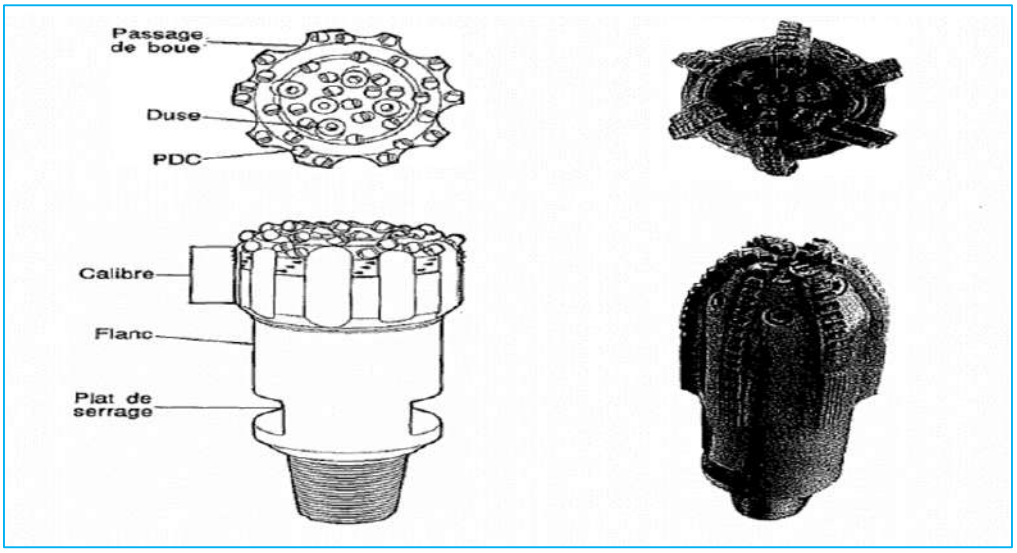

Figure I. 22 : Les element de l'outil PDC .[4]

.VI.6.1 Conception des outils PDC :

La conception d'un outil de forage PDC est la plupart du temps un problème de compromis. Plusieurs facteurs, qui peuvent être en conflit, sont considérés et constituent une structure de contraintes fondamentales. Les caractéristiques qui se montrent extrêmement efficaces sur un modèle peuvent être néfastes pour une autre caractéristique [9].

Un outil PDC est comparable à un appareil mécanique conçu pour transmettre de l'énergie dans le but de forer la roche. En dépit de sa petite dimension, il doit être conçu pour transférer plus d'énergie que celle produite dans un moteur de voiture de course de haute performance. Cette section résume les questions par un ingénieur pendant la conception d'un outil PDC et explique la pertinence de chaque item.

La réparation et la densité des taillants (cutters) seront différentes suivant les profils. Ces différents profils seront adaptés à des conditions spécifiques (type de formation à forer, type de forage …).

.VI.6.2 Mode de travail des outils PDC

Les outils PDC forent en coupant la formation par cisaillement [7].

Pour garder l'efficacité du mécanisme de cisaillement à un niveau élevé, il est essentiel que les bords des éléments de coupe du PDC restent tranchants. Comme la dent s'use et développe un méplat, l'énergie spécifique du système de coupe augmente autant que le poids qui est exigé pour maintenir une profondeur constante de coupe.

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

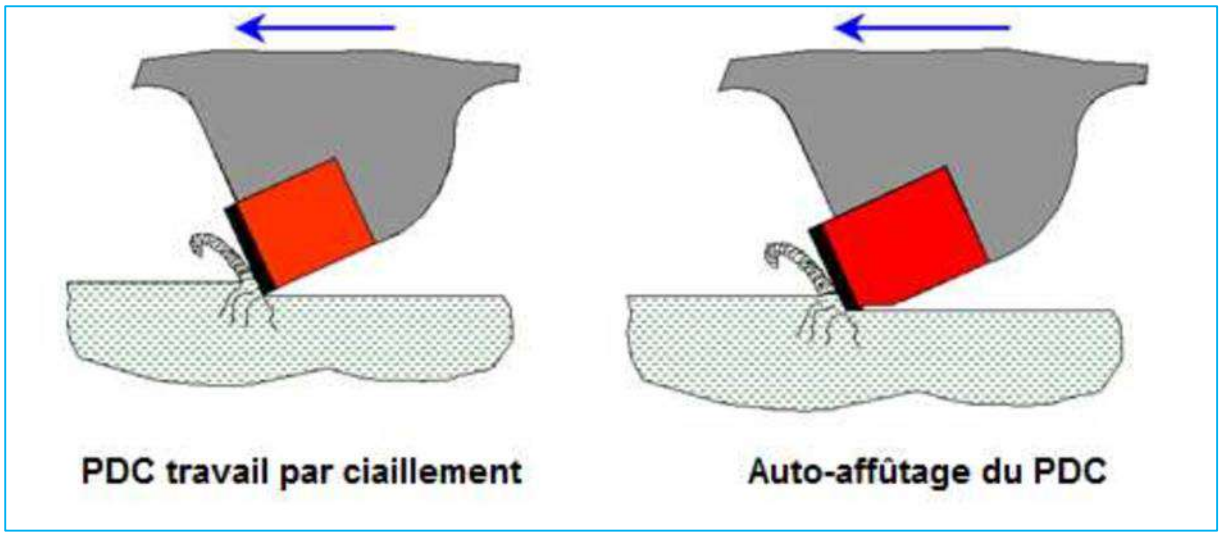

Figure I. 23 : mode de travail d'un PDC .

.VI.6.3 Profil :

Une grande variété de profils d'outils existe. Ces profils peuvent être regroupés en trois principaux groupes [9].

- Profil à simple cône (single cône) : plat, hémisphérique et forme à étage.
- Profil à cône peu profond (shallow cône) : plat, à flanc court, à flanc moyen et à flanc long.
- Profil à double cône (double cône) : flanc court à médium et flanc long.

Pour chacun de ces groupes, les variations de profil permettent d'associer le volume du taillant en rapport avec la dureté de la formation et la conception hydraulique pour l'évacuation des déblais.

- La stabilité de l'outil.
- Cône.
- Le nombre des taillants.
- La durabilité de l'outil.
- La vitesse d'avancement.
- Le nettoyage et le refroidissement de l'outil.

Le profil de l'outil consiste en :

- Apex (centre géométrique de l'outil).
- Cône.
- Nez.
- Le flanc (shoulder ou taper).
- L'épaulement (ODR).
- Le diamètre (gauge).

.VI.6.4 Les dents (cutters) :

Le nombre de couteaux sur un outil PDC est un déterminant fondamental de performance de l'outil.

Idéalement le concepteur recherche un produit qui :

- Peut forer une gamme des formations qui incluent formations dures et abrasives.
- Peut fournir une vitesse d'avancement régulière et élevée.
- A une longue durée de vie.
- Peut être fabriqué à faible coût.

Plus la dureté de la roche augmente, plus le nombre de taillants augmente. Malheureusement, il y a performance et compromis de coût dans la décision du nombre de cutters.

Augmenter la densité des taillants permet à un outil de forer plus efficacement, de traverser des formations plus abrasives et généralement signifie une plus longe durée de vie. En effet, une durée de vie est prolongée car son temps de travail et son degré d'usure diminuent. L'énergie dissipée par la coupe est calorifique, si le nombre de taillants est optimisé, l'énergie unitaire par taillant est réduite et la température critique (750°) de déstabilisation du PDC ne

sera pas atteinte. Cependant, un plus grand nombre de dents rend l'outil plus cher (particulièrement depuis que les composants PDC constituent une grande partie du coût total) et, en général, la vitesse de pénétration diminue.

.VI.6.5 Le corps de l'outil (bit body) :

Le corps de l'outil (bit body) fournit les fonctions suivantes pendant la durée de vie de l'outil Servir de support pour les dents et les duses et la fixation de ceux-ci.

- Accepter les contraintes mécaniques sous les conditions d'opérations de fond.
- Diriger et contrôler le courant de boue pour le nettoyage et le refroidissement des dents.
- Permettre la connexion à la garniture de forage.

Deux types de corps existent : le corps en acier et le corps à matrice (corps fritté). Chacune à ses caractéristiques et avantages propres, ainsi que ses limites qui doivent être conçues avant la sélection pour une application spécifique

.VI.6.5.1 Corps en acier :

Le corps en acier supporte d'avantages les contraintes de forage (poids, torque) que le corps à matrice. Il est généralement utilisé quand le concepteur veut maximiser les faces d'attaque pour favoriser la vitesse de pénétration. Cependant, les hauteurs peuvent être limitées par les contraintes mécaniques du corps. Des calculs sont réalisés pour maximiser les contraintes sur la lame pour une hauteur donnée et des programmes de test de fatigue vérifient les contraintes adéquates.

L'utilisation de l'acier représente également un avantage pour les outils de grands diamètres en évitant les problèmes complexes de fabrication des corps à matrice. L'inconvénient majeur du corps en acier est qu'il est moins résistant à l'érosion que l'outil matrice et par conséquent plus susceptible d'être endommagé par les fluides de forage abrasifs. Pour combattre ceci, la technique de renforcement (hard facing) peut être appliquée aux sections les plus exposées de l'outil.

.VI.6.5.2 Corps à matrice :

Les corps à matrice sont fabriqués par les procédés de moulage, dans lequel un composé de poudres de carbure de tungstène est coulé avec un liant autour d'une partie en acier (blank steel). Le liant enrobe et fixe les particules de carbure. De plus le processus facilite une adhésion métallurgique entre les croix de la matrice et l'intérieur du blank steel. Une matrice à poudre de carbure de tungstène fournit des propriétés de surface excellentes avec une capacité exceptionnelle à résister à l'érosion par les fluides. Le phénomène d'érosion est causé par la perte de l'alliage servant de liant qui est tendre ce qui alors défait les grains de poudre de carbure de tungstène de la matrice. Les outils à matrice sont préférés dans les applications où la boue de forage est hautement chargée en solides, où encore lorsqu'une grande puissance hydraulique à l'outil est risquée, ainsi que dans les cas où la durée du forage élevée prime pour des raisons économiques.

Les outils diamant naturels, bien que classés comme outils de coupe le PDC, forent avec une action de meulage et ne cisaillent pas la formation. L'action de coupe des outils joue un rôle clé dans l'énergie nécessaire pour forer une formation donnée. Cette caractéristique est généralement présentée en terme 'd'énergie spécifique' qui est définie comme l'énergie exigée

pour couper un volume unitaire de formation. Un outil qui brise la roche directement par cisaillement plutôt que d'utiliser la charge compressive, dépense une énergie spécifique inférieure. Ce qui donne au PDC l'action de coupe la plus efficace. En règle générale, la résistance au cisaillement est approximativement la moitié de la résistance compressive.

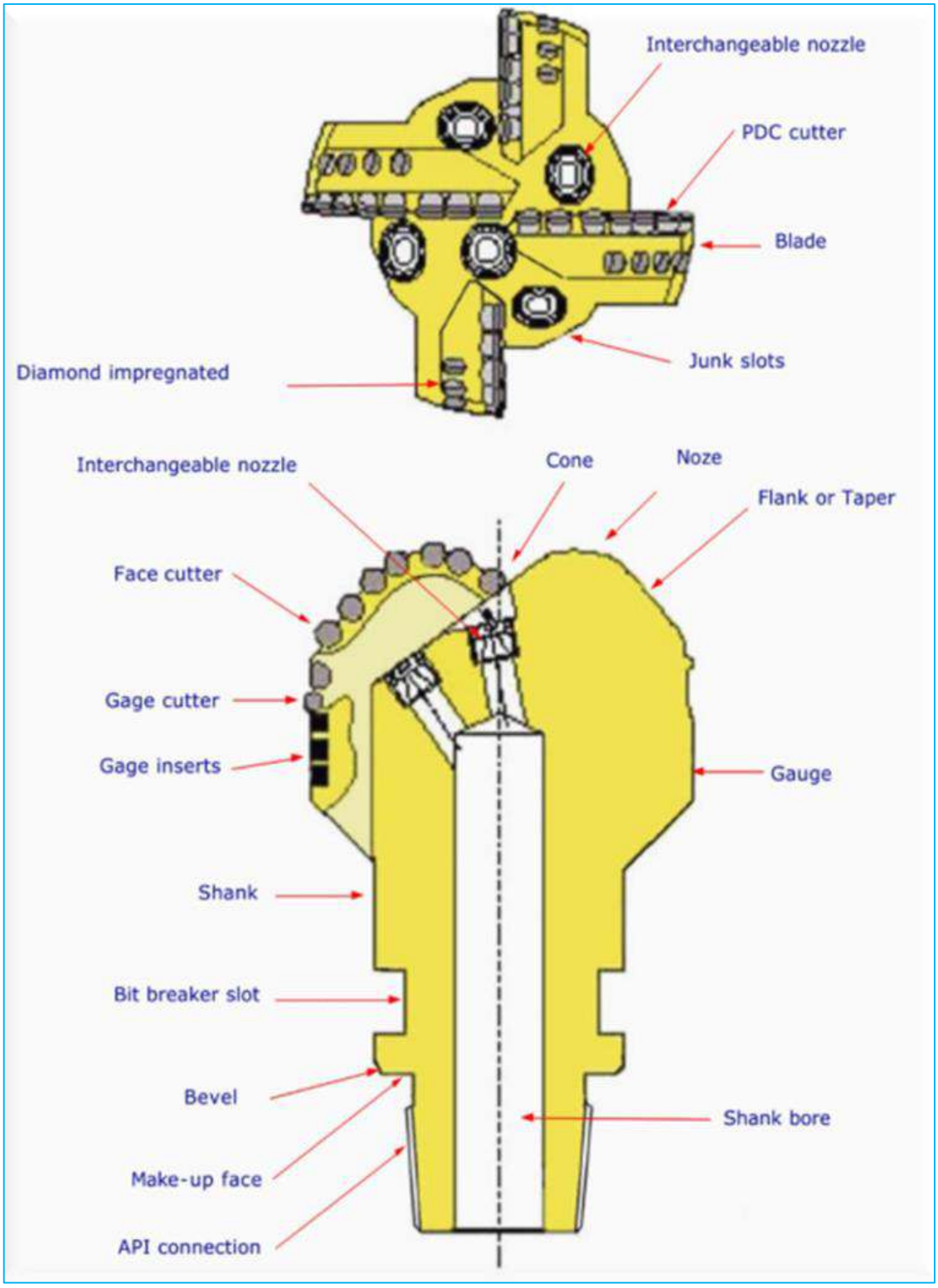

Figure I. 24 : Corps en acier .[7]

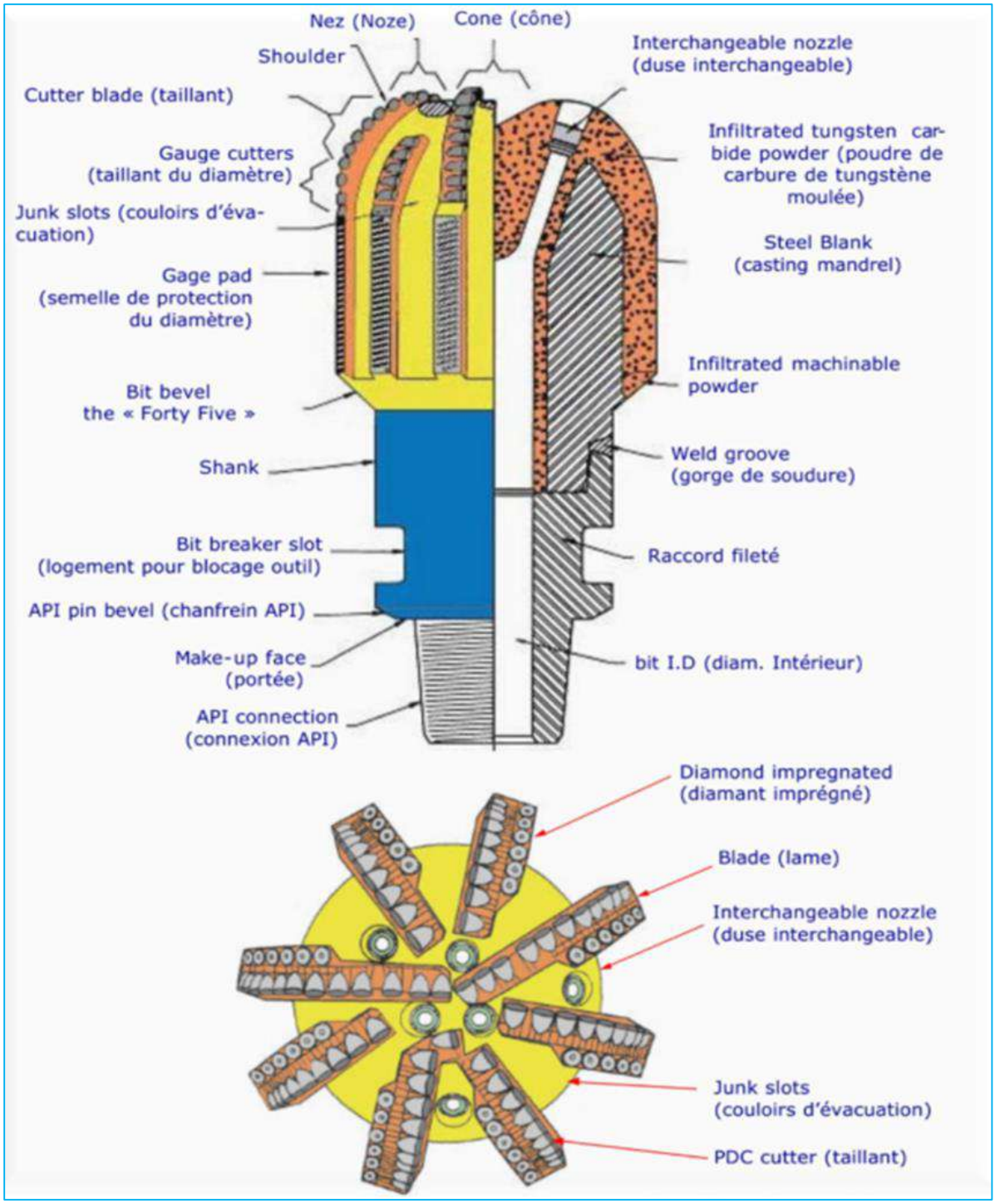

Figure I. 25 : Corps en matrice .[7]

Conclusion

Le choix de l'outil de forage requirt une bonne connaissance de facteurs mécaniques et hydrauliques ainsi que la nature des roches pour avoir de bons résultats d'où une meilleure qualité moins chère dans un court délai en toute sécurité

Chapitre II
Méthodes d'optimisation des paramètres de forage

Méthodes d'optimisation des paramètres de forage

.I Introduction

Le but du forage optimisé est d'améliorer les variables, qui ont la capacité de produire de meilleurs résultats, en les contrôlant pendant le processus de forage, à savoir :

- le poids de l'outil.
- Vitesse de rotation.
- les paramètres hydrauliques.

Pour les coûts les plus bas, le plus grand retour sur le forage.

Par conséquent, nous devons utiliser les meilleures méthodes, les plus exactes et exploiter les expériences et les recherche antérieures.

.II Modèles d'optimisation dans la littérature (état de l'art)

L'optimisation des activités de forage pétrolier constituent actuellement un domaine scientifique en plein expansion.

Au cours de cette partie nous présentons les méthodes d'optimisation les plus couramment utilisées pour résoudre les problèmes d'amélioration des paramètres de forage.

Il existe deux méthodes d'optimisation, une méthode utilisant des modèles analytiques tels que la méthode de Galle et Woods[24], et l'autre méthode basée sur l'utilisation des modèles numériques (statistiques) tels que l'analyse de régression multiple[25].

Lummus [26]a présenté la définition et de la philosophie de l'optimisation. Il a examiné l'influence des principaux paramètres de forage sur la performance de forage. Il a également proposé une méthodologie d'optimisation de forage. Lummus a mentionné que la boue et paramètres hydrauliques sont les deux des facteurs les plus importants qui affectent l'optimisation des opérations de forage. De plus, le matériel de manutention de la boue devrait avoir assez de puissance pour répondre aux exigences.

Graham et Muench [27] sont parmi les premiers chercheurs qui ont mené des évaluations sur les données de forage pour déterminer le poids optimal sur le l'outil et la vitesse de rotation. Ils ont utilisé une méthode d'analyse mathématique pour les coûts liés au forage dans des circonstances optimales. Des expressions mathématiques empiriques ont été établies pour définir la durée de vie de l'outil et la fréquence de forage en fonction de la profondeur, la vitesse de rotation et le poids sur l'outil. Les relations mathématiques proposées contenaient des constants représentants respectivement les formations existantes dans la région. L'étude a permis de proposer un poids sur l'outil et une vitesse de rotation optimaux afin de minimiser les coûts total dans toutes les conditions de forage.

Sur le même plan Maurer [28] a dérivé l'équation de taux de pénétration avec les caractéristiques de la roche. L'équation a été fondée sur la condition de «nettoyage parfait» dont tous les débris de la roche sont considérés comme étant retirée entre les impacts de la dent. Une relation entre le taux de forage, le poids sur l'outil et la vitesse de rotation a été obtenu dans la condition que le trou est parfaitement nettoyé. Il a également mentionné que les relations obtenues sont en fonction de la profondeur de forage. L'équation de taux de forage a été exprimée sous la forme donnée par l'équation (1).

$$\frac{dF}{dt} = \frac{4}{\pi d_b^2}\frac{dV}{dt} \qquad (1)$$

Ou **F** est la distance foré par outil,

V est le volume de roche enlevée

$\mathbf{d_b}$ est le diametre du trépan.

Galle et Woods [24] sont les premiers auteurs qui ont travaillé sur la modélisation du processus d'avancement d'un outil tricône, et après Lubinski [29] aexploité ce model par l'utilisation des méthodes d'optimisation afin de définir une politique d'optimisation des paramètres mécaniques de forage. Galle et Woods ont étudié le développement des relations mathématiques de poids et de la vitesse de rotation pour le coût le plus bas. Les graphiques et les procédures des applications sur le terrain ont été produits pour déterminer le meilleur rapport de poids et de la vitesse de rotation. Ils ont supposé une relation du taux d'usure de la dent en fonction du temps par rapport à l'inverse du poids du bit et le diamètre du trépan. Ils ont présenté l'équation (2) de la vitesse de forage en fonction de WOB et RPM.

$$\frac{dF}{dt} = C_{fd}\frac{\overline{W}^k\, r}{a^p} \qquad (2)$$

Ou C_{fd} est le coefficient de forabilité de la formation.

a = 0.028125h² + 6.0h + 1

k=1.0 (pour la plupart des formations, à l' exception des formations très tendres), 0.6 (pour des formations très tendres).

p = 0,5 (pour la dent de type auto-affûtage ou déchiquetage)

$$r_{hard-formattions} = \left[e^{\frac{-100}{N^2}}\ N^{0.428} + 0.2N\left\langle 1 - e^{\frac{-100}{N^2}}\right\rangle\right] \qquad (3)$$

$$r_{soft-formattions} = \left[e^{N^2}\ N^{0.75} 0.5N\left\langle 1 - e^{\frac{-100}{N^2}}\right\rangle\right] \qquad (4)$$

$$\overline{W} = \frac{7.88WOB}{D_b} \qquad (5)$$

Bingham [30]a proposé une équation du taux de pénétration basée sur les données de laboratoire. Dans leur équation (6) la vitesse de pénétration est une fonction du poids appliqué sur le trépan et de la vitesse de rotation, avec le poids de seuil a été supposé négligeable.

L'exposant du poids de bit, a_5 a été déterminé expérimentalement dans les conditions fréquentes

$$\boldsymbol{R = K \left(\frac{WOB}{d_b}\right)^{q_5}} \qquad \textbf{(6)}$$

D'autres études ont été élaborées, notamment celle de Reed [31] dans le but de l'optimisation les paramètres mécaniques et hydrauliques de forage. Reed a développé un modèle de forage optimal poids-vitesse pour minimiser les couts opérationnels. L'objectif principal de travail est non seulement l'optimisation du poids et de la vitesse mais aussi la conception et le traitement de la boue.

Young [32] a réalisé un système informatique pour contrôler le poids sur l'outil et la vitesse de rotation. Il a développé quatre équations : du poids, de la hauteur de la dent d'outil, du débit en fonction de la vitesse de rotation du trépan, et de taux d'usure de la dent. Les meilleures solutions optimales des paramètres de forage ont été obtenues par l'intégration des équations.

Wilson et Bentsen [33] ont étudié les diverses procédures d'optimisation du poids sur l'outil et de la vitesse de rotation. Avec l'augmentation de la complexité et d'exigence de données trois méthodes ont été développées. La première méthode basée sur la détermination du Point d'optimisation pour le coût le plus bas. La deuxième méthode définie l'intervalle d'optimisation proportionnel a l'intervalle de sélection des couts bas. La troisième méthode possède un multi-Intervalle d'optimisation pour minimiser une série d'intervalles des coûts. Les auteurs ont conclu que leur modèle pourrait avoir comme un guide de bonnes procédures de forage et que la réduction des coûts pourrait être considérable.

De nouvelles méthodes actuellement en développement, sont basé sur l'introduction des éléments d'informatique dans les systèmes de forage. L'étude de Mitchell [34] en 1995 Parmi les plus importantes réalisations en ce domaine. Mitchell dans son livre a présenté la sélection du poids sur le l'outil et de la vitesse de rotation optimaux. Une des raisons les plus importantes a été donnée pour produire le coût plus bas de forage **Figure II. 1** L'identification de la commande de la direction du trou de forage et l'exploration des zones de surpression ont été considérés à la sélection des paramètres optimaux. Il a également mentionné la méthode d'étudiée la sélection du poids et de la vitesse optimaux.

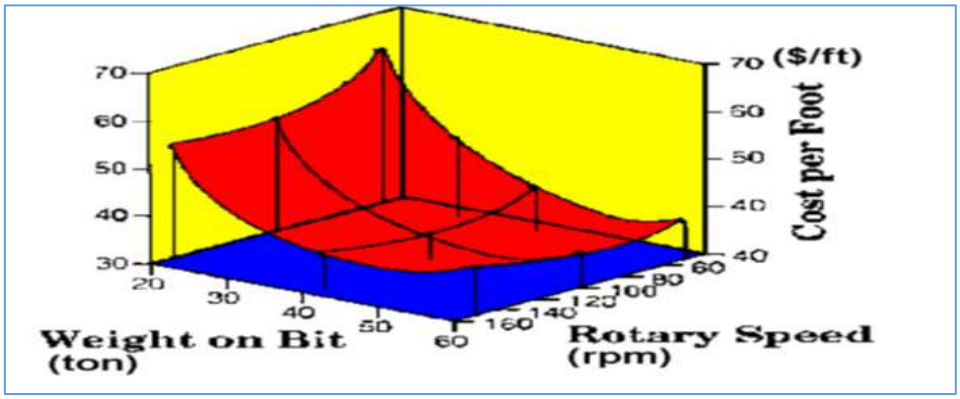

Figure II. 1: graphe de poids et de la vitesse de rotation optimaux d'après Mitchell . [5]

.III Améliorez de la vitesse d'avancement (ROP)

.III.1 Optimisation par l'énergie mécanique sélectionné E_S (MSE)

Le but de la méthode d'énergie mécanique spécifique est :

- Améliorer le comportement d'excavation.
- Réduire au minimum les coûts d'exploitation.
- Augmenter la durée de vie de l'outil de forage.

L'énergie spécifique ES [35] [36]est le travail effectué pour arracher un volume unitaire de la roche.

.III.1.1 Contexte et Buts de l'énergie mécanique Spécifique

L'optimisation de forage n'est pas confinée à l'optimisation de la vitesse de pénétration uniquement. Il faut prend en considération toutes les impacts qui influent le développement de ROP. Car les conditions réelles de forage dans certain cas différents aux processus étudiés dans le laboratoire, alors le problème des méthodes qui modélise de le ROP c'est qu'elle cherche un ROP maximal, et néglige l'effet d'autres facteurs tels que les vibrations, mauvais nettoyage du trou et le bourrage d'outil, et l'usure de l'outil qui sont causés la founder point. Ce problème peut inventaire les résultats dans le cadre théorique et ne peut s'appliquer que dans certaines cas bien déterminées. Donc il faut prendre en considération l'impact le founderpoint pendant l'optimisation.

Par définition le founder point est le point où le ROP ne répond plus linéairement avec l'augmentation du WOB. On peut considérer le WOB dans ce point comme le poids optimum [37] [8] .

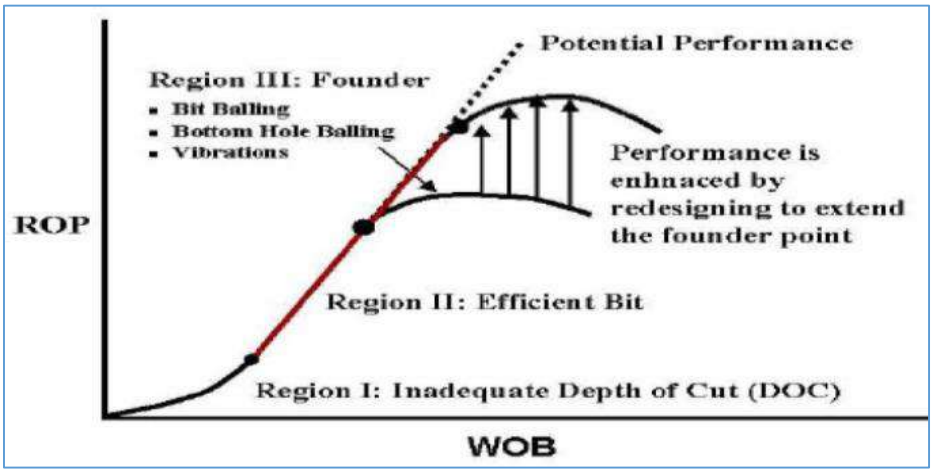

Figure II. 2: Le founder point. [5]

Théoriquement, il n y a pas une équation mathématique peut expliquer l'effet du founder point, et on ne peut déterminer le founder point que par le test drill- off. Comme indiqué dans la (figure. II. 1).

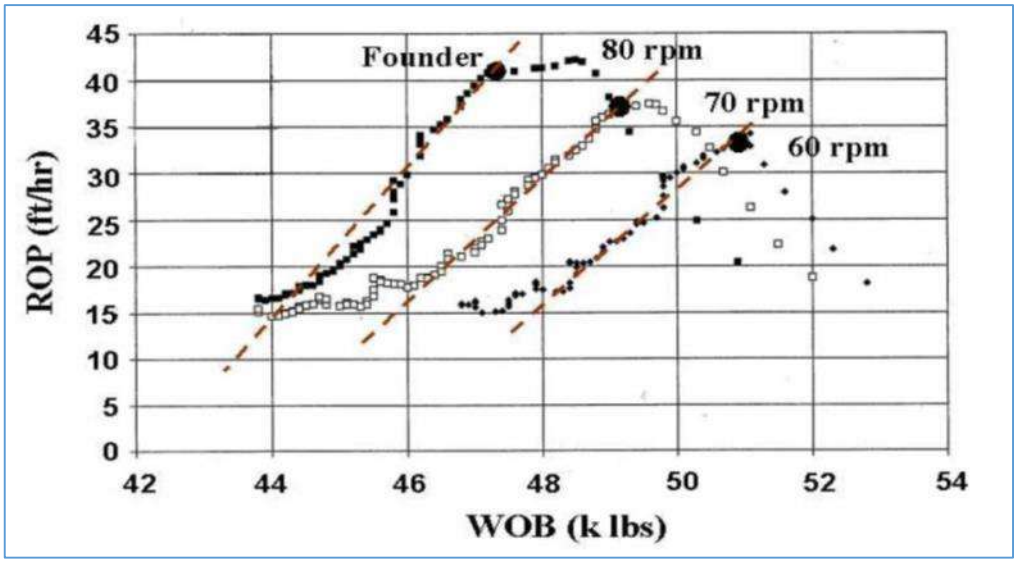

Figure II. 1: drill- off test .[8] [11]

le ROP s'augment avec l'augmentation du WOB, mais pour une valeur supérieure au founder point, l'augmentation du WOB entraine une usure accéléré de l'outil qui conduit à la réduction de sa duré de vie. Pour cet argument l'application d'une d'énergie mécanique spécifique minimale aide à conserver l'outil en bon état la duré plus possible.

Pour toutes ces raisons, on utilise la méthode de l'énergie mécanique spécifique MSE, pour traiter le problème d'optimisation.

.III.1.2 Principe de la théorie de l'énergie spécifique ES :

L'énergie mécanique de qualité est inversement associée au taux de pénétration. Le paramètre Es est une mesure utile de la prévision de la puissance requise (couple d'instrument et RPM) pour un type particulier d'outil à forer à un ROP donné dans un type de roche particulier. La théorie d'Es n'est pas nouvelle, elle a été employée pour l'évaluation rapide de la performance d'outil pendant des années. L'équation (7) montre la relation entre l'énergie mécanique spécifique et les paramètres mécaniques.

$$E_s = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120.\pi.N.TOR}{A_B.ROP} \qquad (7)$$

.III.2 Amélioration de la vitesse d'avancement d'un outil PDC par l'utilisation du modèle d'Eckel.

Pour un temps optimal dans le forage pétrolier, un ou plusieurs paramètres peuvent être modifiés, grâce à :

- le prix du mètre gaufré est réduit.
- minimiser les problèmes de forage.

La minimisation du cout de forage se fait par l'application d'une combinaison de paramètres optimaux de forage, autrement dit il faut minimiser au maximum les problèmes de forage générés par le choix des paramètres inadéquats. L'optimisation du cout de forage est faite en considérant que les équipements de forage, la garniture de forage, les paramètres hydrauliques et l'outil utilisé sont sélectionné d'une façon optimale. La présente étude est une contribution pour minimiser le prix de mètre foré notamment par le choix judicieux des paramètre de forage qui permettra d'augmenter la vitesse d'avancement avec un minimum de problème et une usure modéré [38] [39].

$$ROP = a\,WOB^b RPM^c \qquad (8)$$

a,b,c : des constantes.

Afin de définir les coefficients a, b, c dans chaque K mètres forés on utilise la méthode des moindres carrées [38].

.III.2.1 Amélioration du ROP par la procédure drill-off

La procédure la plus importante de l'optimisation du ROP est le drill-off test . Le drill-off test estréalisécommesuit :

- Choisir un poids sur l'outil (WOB) de départ et un RPM (le RPM doit être maintenu constant durant le test).
- Forer avec le WOB initial pour quelques minutes pour stabiliser les conditions de fond.
- Bloquer le frein.

. Enregistrer le temps pour forer avec une valeur prédéterminée de ΔWOB, généralement de 2000 à 4000 lbf. e. Calculer le ROP moyen sur le WOB en utilisant la formule suivante

$$ROP = L * \frac{1}{E*A} * \frac{\Delta WOP}{\Delta T} \qquad (9)$$

Où : ROP = taux de pénétration en ft/min.

L = longueur des tiges en ft.

E = module de Young en psi.

A = section des tiges en in2.

T = temps d'enregistrement.

f. Répéter les étapes d et e pour établir un graphe. g.

Répéter le test drill-off pour différent RPM.

.III.2.2 Méthode des moindres carrés

On dispose de N données expérimentales (x_i,y_i). Les valeurs x_i sont certaines alors que y_i est une variable aléatoire dont on connaît l'écart-type, noté σ_i.

On recherche une fonction $f(x|a_0,a_1)$ comportant deux paramètres (a_0,a_1) qui représente au mieux ces données expérimentales. Dans cet exposé, on se limite à la recherche d'une fonction à deux paramètres mais les algorithmes seront généralisables à une fonction comportant un nombre quelconque de paramètres [40].

La méthode des moindres carrés consiste à recherche les paramètres qui minimisent la fonction erreur définie par :

$$\boldsymbol{e(a_0,a_1) = \sum_{i=0}^{N-1}\left(\frac{y_i - f(x_i|a_0,a_1)}{\sigma_i}\right)^2} \qquad \textbf{(10)}$$

Sans donner le fondement statistique de cette méthode, on remarque simplement que l'écart au carré est pondéré par l'inverse de la variance : une donnée très incertaine a donc un poids plus faible dans la somme.

Nous allons tout d'abord traiter le cas d'une fonction qui dépend linéairement des paramètres, qui conduit à l'équation normale, dont la résolution relève de l'algèbre linéaire. Dans un second temps, nous aborderons le cas d'une fonction non linéaire des paramètres, un problème beaucoup plus difficile d'optimisation dans un espace de dimension 2 (autant que de paramètres), qui peut se résoudre par la méthode itérative du gradient.

Remarque : la méthode des moindres carrés est une méthode élémentaire d'apprentissage. Si un grand nombre de données correspondant au même phénomène est traité, la connaissance des paramètres (a_0, a_1) permet de faire une prévision sur une nouvelle donnée x_n en appliquant : $y_n=f(x_n|a_0,a_1)$.

.III.3 Méthode d'arthur lubinski

Puisque la longueur de la garniture est affectée par le changement des forces dues aux déformations élastiques. Cette approche suppose que le changement de la longueur de la garniture est égal à une fonction linéaire du changement de la force résultante du changement du poids sur l'outil de forage, en supposant que la garniture se comporte comme un ressort parfait.

Comme le montre les équations (11 et 12), le ROP est égal à la somme du changement de la longueur de la garniture qui est proportionnelle au changement du WOB. Cette méthode néglige les effets dynamiques et les frottements entre le trou et la garniture [49].

$$\boldsymbol{ROP = \frac{dD}{dT} + K\frac{dWOB}{dT}} \qquad \textbf{(11)}$$

$$K = \frac{L}{144.E.A} \qquad (12)$$

.III.4 Méthode d'I.G. Falconer

Cette recherche utilise le torque et le WOB du fond (TOR, WOB), pour calculer letorque adimensionnel (13) et la dureté apparente de la formation (FORS, (14)).L'objectif de cette étude est de distinguer entre les effets de l'outil de forage et les effets de lalithologie pendant le forage [49].

$$T_D = \frac{TOR}{WOB.D_B} \qquad (13)$$

$$FORS = \frac{5.WOB.RPM}{12.ROP.D_B} \qquad (14)$$

.IV Autres méthodes mathématiques d' amélioration (optimisation par Plan d'Experiences)

Le but de l'optimisation du forage est d'améliorer les variables mécaniques (le poids sur l'outil, la vitesse de rotation des bits) et hydrauliques(les propriétés de la boue), d'augmenter l'efficacité de l'excavation et de réduire les coûts de forage.

L'amélioration des paramètres d'excavation vise à :

- Rationalisation et conception du forage.
- Modéliser des phénomènes complexes à travers des expériences, ces derniers peuvent être difficiles à appliquer sur le terrain, ou leurs conséquences sont déraisonnables, etc.

C'est pourquoi la méthodologie de conception expérimentale est utilisée pour résoudre ce problème.

Avant de se lancer dans l'étude de plans expérimentaux, il est nécessaire de définir le vocabulaire que nous allons utiliser. (Facteurs et niveaux).

.IV.1 Facteurs et niveaux

On qualifie de facteur toute variable, obligatoirement contrôlable, susceptible d'influer sur la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion classique de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir ˆ et remodifie sans difficulté. Cette hypothèse est obligatoire pour les plans d'expérience puisque nous allons par la suite proposer une liste des expériences ` à réaliser. Il est donc impératif que l'expérimentateur puisse s'y tenir en adaptant les facteurs aux diverses valeurs données. A titre d'exemple lorsqu'une réaction chimique dépend de la pression ambiante, il s'agit alors d'un facteur si l'expérience est menée dans un local o` u la pression peut ˆ et remodifiée ou bien d'une variable si le local n'est pas ´ équipé d'un tel dispositif (la pression est alors la pression atmosphérique que l'on peut mesurer mais qu'il est impossible de faire varier) [41] .

.IV.1.1 Facteurs affectant le taux de pénétration

Les facteurs connus pour avoir un effet sur le taux de pénétration sont énumérés sous deux classifications générales telles que contrôlable et environnementale. Facteurs contrôlables sont les facteurs qui peuvent être modifiés instantanément tels que le poids sur le bit, le bit rotatif vitesse, hydraulique. Les facteurs environnementaux en revanche ne sont pas contrôlables comme propriétés de formation, exigences en matière de fluides de forage. La raison pour laquelle le fluide de forage est considéré comme un facteur environnemental est dû au fait qu'une certaine quantité de la densité est nécessaire pour atteindre certains objectifs comme avoir suffisamment surpression pour éviter l'écoulement des fluides de formation. Un autre facteur important est le effet de l'hydraulique globale sur l'ensemble de l'opération de forage qui est sous le effet de nombreux facteurs tels que la lithologie, le type de trépan, la pression au fond et les conditions de température, les paramètres de forage et principalement les propriétés rhéologiques dès le fluide de forage. Le taux de performance de pénétration dépend et est fonction des facteurs contrôlables et environnementaux. Il a été observé que la vitesse de forage de la pénétration augmente généralement avec la diminution de la densité de circulation équivalente (ECD) [42].

.IV.2 Contexte et le but des plans

De nombreux procédés industriel, ou en laboratoire deviennent de plus en plus complexes car ils dépendent d'un grand nombre de variables difficiles à régler intuitivement.

Les méthodes intuitives basées généralement sur le principe de fixer la valeur (niveau) de toutes les facteurs sauf un, et faire varier la valeur de ce facteur et mesurer la réponse avec chaque variation, comme dans la figure ci-dessous.

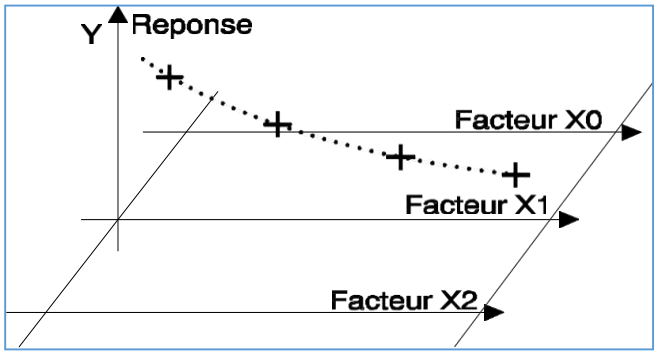

Figure II. 3: méthode traductionnelle d'expérimentatio. [5]

où x_0 et x_2 sont fixés, seul x_1 est variable.

Il faut refaire la même opération pour chaque facteur. Alors si on veut par exemple étudier 6 facteurs pour 5 niveau, il doit faire 5^6 =15625 essais. Pour réaliser cet énorme nombre d'essais ça prend beaucoup du temps et soit très couteux, et souvent il est irréalisable. Pour éviter ce problème, il doit réduire soit le nombre de facteurs soit le nombre de niveaux, mais cela peut faire perturbé le résultat. En raison de trouver un compromis pour des résultats confiants au coût le plus bas et dans le temps le plus court possible, de nombreux chercheurs font appel à la planification des expériences, ou ce qu'ils appellent **'les plans d'expériences'**.

L'objectif principal des plans est d'obtenir un maximum d'information en un minimum d'expériences.

.IV.3 Principaux avantages des plans d'expériences

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences.

En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (Qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences `a réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs ´étudies, en d´détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport `a une réponse, c'st-`a-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point d´délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences `a mener sans sacrifier la précision sur les résultats. De nombreux ouvrages traitent des plans d'expériences. Celui publie par l'association Experimentique présente de facon claire les plans d'expériences et propose une bibliographie commentée très riche permettant `a l'expérimentateur de trouver les informations qui lui sont n´nécessaires [43].

Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses

Propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant

Diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- les plans pour ´étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'idée essentielle qui doit mener la démarche expérimentale de l'expérimentateur est que l'on met en œuvre un plan d'expériences afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donne ra les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour ´étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

Afin d'obtenir des informations pertinentes, une démarche m´méthodologique doit être suivie :

- d´définitions des objectifs et critères.
- d´définition des facteurs ´étudies et du domaine expérimental.
- construction du plan d'expériences.
- Expérimentation.
- analyse des résultats.
- conduite ´éventuelle d'essais supplémentaires.
- validation des résultats.
- conclusion de l'étude.

A l'issue de cette procédure, on pourra conclure sur les résultats donnés parles plans. On d´détaillera ici chacun de ces points pour les deux types de plans précédemment cites.

.IV.4 Plans factoriels complets à deux niveaux 2k

Les plans factoriels complets à deux niveaux sont les plus simples, ils sont aussi les plus utiles car ils forment la base de tous les débuts d'étude. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché [44].

.IV.4.1 Plans complets à deux facteurs

Nous allons d'abord décrire le cas simple du plan 2^2. Commençons par expliquer cette notation :

- le 2 en exposant signifie qu'il y a deux facteurs étudiés ;
- l'autre 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Cette notation se généralise immédiatement : pour un plan comportant l'étude de *k* facteurs prenant chacun deux niveaux, on écrira qu'il s'agit d'un plan 2^k.

Nous avons vu que l'on pouvait donner une représentation géométrique du domaine d'étude. Chaque point de ce domaine représente des conditions opératoires possibles donc une expérience que l'opérateur pourrait réaliser. Le choix des meilleures expériences est le problème fondamental de l'expérimentique. En l'absence de toute information sur la fonction *f*, on se donne, a priori, une loi d'évolution de la réponse en fonction des variables. Comme on ne désire effectuer, dans un premier temps, que deux essais par facteur, soit deux niveaux par facteur, on adopte une loi du premier degré par rapport à chaque variable. Cette loi est la suivante pour les plans factoriels complets comportant deux facteurs :

$$\boldsymbol{y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} a_1 x_2} \quad \textbf{(15)}$$

.IV.4.2 Plans factoriels à N niveaux et p Paramètres

Il est parfois nécessaire d'augmenter le nombre de niveaux d'un facteur afin de mieux maîtriser l'action de ce facteur. Dans ce cas il faut être prudent, car le nombre d'expériences augmente rapidement.

Un plan comportant *p* facteurs à N niveaux apporte noté N^P expériences à réaliser.

Le nombre d'expériences = n^P

La notation de YATE n'est plus utilisable, on remplace simplement la valeur des niveaux par des chiffres-1 ≡ 1 et 1 ≡ 2.

.IV.4.3 Plans fractionnaires

Les plans fractionnaires sont très utiles et mettent en évidence l'intérêt primordial de la méthode des plans d'expériences nécessaires à la construction d'un modèle. mais cependant , il est prudent de grader un certain esprit critique face aux résultats que fournissent les plans fractionnaires, car ils nécessitent une certaine maîtrise de leur constriction et de l'interprétation des résultats [2].

.IV.4.3.1 Plan fractionnaire à n niveaux et p paramètres

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d‘ expériences $= \mathbf{n^{p-k}}$

La matrice d‘ expériences est donc divisée k fois **[45].**

.IV.4.3.2 Notation des plans factoriels fractionnaires

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

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

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

Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 21.

Un plan 25-2 permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par 22 = 4.

Un plan 2*k*-*q* permet d'étudier *k* facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet été divisé par 2*q*.[2]**.**

.IV.4.3.3 Les avantages et les inconvénients

Les avantages des plans factoriels fractionnaires sont les mêmes que ceux des plans factoriels complets, en plus du fait qu'ils soient beaucoup plus économiques, en nombre d'essais et plus rapides. Il faut encore ajouter un avantage considérable, celui de pouvoir mener les expériences séquentiellement. En effet, si un "plan 2^{p-k}" s'avère non satisfaisant, on poursuivra les expériences en exécutant un deuxième "plan 2^{m-s}" qui est ajouté au premier, ce qui donnera deux "plan 2^{p-k}" soit $2 \times 2^{p-k}$ou un "plan 2^{p+1-k}" qui restera plus économique que le "plan 2^{p}" tant qu'il n'a pas été reproduit 2^{k} fois. Cette possibilité permet à l'expérimentateur de réaliser le nombre juste suffisant d'essais pour aboutir à la résolution de son problème [5] .

.IV.4.4 Les plan de Taguchi

Un plan de Taguchi est un plan d'expériences qui vous permet de choisir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus cohérente dans son environnement d'exploitation. Les plans de Taguchi partent du principe que les facteurs à l'origine de la variabilité ne peuvent pas tous être contrôlés. Ces facteurs incontrôlables sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi essaient d'identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Pendant l'expérimentation, vous manipulez les facteurs de bruit de manière à imposer une variabilité, puis vous déterminez les paramètres de facteurs de contrôle optimaux qui rendent le procédé ou le produit plus robuste ou plus résistant face à la variation provoquée par les facteurs de bruit. Un procédé conçu dans cette optique produira des résultats plus cohérents. Un produit conçu dans cette optique aura des performances plus cohérentes, quel que soit l'environnement dans lequel il sera utilize.

Les plans de Taguchi utilisent des répertoires orthogonaux, qui évaluent les effets des facteurs sur la moyenne et sur la variation de la réponse. Avec un répertoire orthogonal, le plan est équilibré de telle sorte que les niveaux de facteurs sont également pondérés. Ainsi, chaque facteur peut être évalué indépendamment de tous les autres et l'effet d'un facteur n'influence pas

l'estimation d'un autre facteur. Cela peut réduire la durée et le coût de l'expérience en cas d'utilisation de plans fractionnés. [24].

.IV.4.4.1 Objectif de méthode

Classiquement, quand on constate une dispersion ou une instabilité des caractéristiques d'un produit lors de sa fabrication ou de son utilisation, on en recherche les causes afin de les réduire, voire les éliminer. Or ces causes peuvent être multiples : variabilité des conditions d'environnement (température, pression, hygrométrie, ...), variabilité des caractéristiques des matières premières et des composants utilisés, différences de façons de faire entre les différents opérateurs, etc.

Les moyens pour les combattre coûtent en général fort cher : resserrement des tolérances des matières utilisées, surdimensionnement des composants, dispositifs plus ou moins sophistiqués de climatisation des ateliers de fabrication, règles d'utilisation ou de fonctionnement des produits très strictes.

La stratégie adoptée par le Docteur Taguchi est diamétralement opposée : au lieu de chercher à éliminer ces facteurs parasites (appelés facteurs bruits), la démarche consiste à minimiser leur impact. Concrètement, elle consiste à identifier les combinaisons de paramètres qui réduisent les effets des causes, sans s'attaquer directement à celles-ci [5].

.IV.4.5 Plans de surfaces et de réponse (RSM)

La méthodologie de surface de réponse RMS, par rapport à d'autres méthodes expérimentales ou d'optimisation, présente plusieurs avantages: par exemple, RMS fournit une grande quantité d'informations dans le plus petit nombre d'expériences, gagnant ainsi du temps [46]

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est un ensemble de méthodes statistiques et mathématiques utiles pour la modélisation et l'optimisation des problèmes des sciences de l'ingénieur. Dans cette technique, l'objectif principal est d'optimiser les réponses qui sont influencées par divers paramètres de processus d'entrée. RSM quantifie également la relation entre les paramètres d'entrée contrôlables et les réponses obtenues. Dans la modélisation et l'optimisation des processus de fabrication à l'aide de RSM, les données suffisantes sont collectées grâce à une expérimentation conçue [46].

En général, un modèle de régression de second ordre est développé parce que les modèles de premier ordre donnent souvent un manque d'ajustement.

Selon RSM, tous les paramètres de processus d'entrée sont supposés être mesurables et les réponses correspondantes peuvent être exprimées comme suit :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \qquad (16)$$

y: est la réponse qui doit être optimisée

f : est l'inconnu fonction de réponse

$x_1, x_2, \ldots, x_k$: désignent les paramètres ou variables indépendants

K : est le nombre de variables indépendantes

Ɛ : est l'erreur statistique qui représente d'autres sources de variabilité non prises en compte par f

Ces sources incluent les effets tels que la mesure Erreur. On suppose généralement que e a une distribution normale avec une moyenne nulle et une variance.

Il est possible de séparer une étude d'optimisation utilisant RSM en trois étapes.

a) **La première étape** est le travail préliminaire dans lequel la détermination des paramètres indépendants et de leurs niveaux est effectuée.

b) **La deuxième étape** est la sélection du plan expérimental et la prédiction et la vérification de l'équation du modèle.

c) **La troisième étape** consiste à obtenir le tracé de surface de réponse et le tracé de contour de la réponse en fonction des paramètres indépendants et la détermination des points optimaux.

On suppose que les variables indépendantes (paramètres de processus d'entrée) sont continues et contrôlables par des expériences avec des erreurs négligeables. Il est également nécessaire de trouver une approximation appropriée de la véritable relation fonctionnelle entre les variables indépendantes et les réponses. Habituellement, un modèle de régression de second ordre comme indiqué ci-dessous est utilisé dans RSM.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{j>1}^{k} b_{ii} x_i x_j \qquad (17)$$

où «y» est la réponse et les xi (1, 2,…, k) sont les niveaux codés de k variables quantitatives. Le coefficient b0 est le terme libre, les coefficients **bi** sont les termes linéaires, les coefficients bii sont les termes quadratiques et les coefficients **bij** sont les termes d'interaction. Les équations reliant la réponse aux variables sont puis dérivée en déterminant les valeurs des coefficients en utilisant la méthode des moindres carrés (**MLS**). MLS est une technique de régression multiple

.IV.4.5.1 Les Avantages de Plans (RSM)

La méthodologie de surface de réponse (RSM) présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes expérimentales ou d'optimisation classiques dans lesquelles une variable à la fois technique est utilisée. Premièrement, RSM offre une grande quantité d'informations provenant d'un petit nombre d'expériences. En effet, les méthodes classiques prennent du temps et un grand nombre d'expériences sont nécessaires pour expliquer le comportement d'un système. Deuxièmement, dans RSM, il est possible d'observer l'effet d'interaction des paramètres indépendants sur la réponse. L'équation du modèle clarifie facilement ces effets pour la combinaison binaire des paramètres indépendants. De plus, le modèle empirique qui a lié la réponse aux variables indépendantes est utilisé pour obtenir des informations sur le processus. Par rapport à ceux-ci, on peut dire que RSM est un outil utile pour l'optimisation des processus de fabrication.

.IV.4.5.2 Les inconvénients de Plans (RSM)

D'autre part, l'inconvénient majeur de RSM est d'ajuster les données à un polynôme du second ordre. On ne peut pas dire que tous les systèmes contenant une courbure sont bien accueillis par le polynôme du second ordre. Pour surmonter cela, les données peuvent être converties sous une autre forme qui peut être expliquée par le modèle du second ordre. Par exemple, des transformations logarithmiques et d'autres méthodes de linéarisation peuvent être utilisées à cette fin. Bien que ces transformations puissent être utiles, il n'est pas possible de disent que ces transformations donnent des résultats souhaitables pour tous les systèmes. De plus, la transformation de la réponse ou des entrées prend du temps et il est parfois difficile de savoir quelle forme de transformation est la meilleure. Alternativement, si le système est à peine expliqué par un modèle du second ordre, il faut choisir une gamme plus petite de paramètres indépendants. Il est possible d'augmenter la précision de l'équation du modèle en travaillant dans une plage étroite de paramètres indépendants, mais il ne faut pas oublier que travailler dans une plage étroite réduit la possibilité de détermination du point stationnaire. Le travail préliminaire devient plus critique pour la détermination de la plage de paramètres indépendants.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) ne convient pas pour résoudre des fonctions multimodales hautement non linéaires et également en cas d'objectifs multiples [26]. De plus, la fonction objective doit être continuellement différentiable, ce qui peut ne pas êtrele cas dans de nombreux processus physiques complexes.

.IV.4.5.3 Plans composites centrés

Les plans composites centrés peuvent ajuster un modèle quadratique complet. Ils sont souvent utilisés lorsque le plan demande une expérimentation séquentielle, car ces plans peuvent intégrer des informations provenant d'une expérience factorielle correctement planifiée.

Le plan composite centré est le plan de surface de réponse le plus utilisé. Les plans composites centrés comprennent un plan factoriel ou un plan factoriel fractionnaire avec des points centraux, auxquels s'ajoute un groupe de points axiaux (ou étoiles) qui permettent d'estimer la courbure. Vous pouvez utiliser un plan composite centré pour effectuer les opérations suivantes :

- Estimer efficacement les termes des 1 et 2 ordres.
- Modéliser une variable de réponse avec courbure en ajoutant des points centraux et axiaux à un plan factoriel précédemment exécuté.

Les plans composites centrés s'avèrent particulièrement utiles dans les expériences séquentielles, car vous pouvez souvent vous appuyer sur des expériences factorielles antérieures en ajoutant des points axiaux et centraux [47].

.IV.4.5.4 Plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube **(figure II. 4**). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. La matrice du **(Tableau II. 4)** indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre **[2].**

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'isovariance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

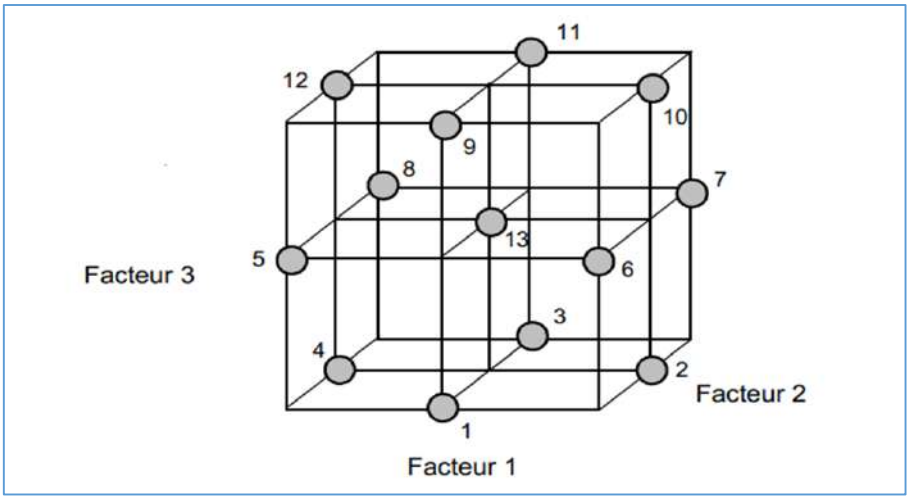

Figure II. 4: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs. [2]

Tableau II. 1: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs

N essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1.	0	-1	-1
2.	+1	0	-1
3.	0	+1	-1
4.	-1	0	-1
5.	-1	-1	0
6.	+1	-1	0
7.	+1	+1	0
8.	-1	+1	0
9.	0	-1	+1
10.	+1	0	+1
11.	0	+1	+1
12.	-1	0	+1
13.	0	0	0

.IV.4.5.5 LES LOGICIELS DE PLANS D'EXPERIENCES

A construction des plans d'expériences est souvent facile et il suffit de choisir parmi les matrices déjà publiées. Mais, il importe que le plan soit adapté à l'étude et non pas l'inverse. Il y a donc des situations où il faut absolument tailler un plan sur mesure. Les logiciels de plan d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans sur mesures. En particulier, les plans de mélanges et les plans avec

contraintes sur le domaine d'étude nécessitent l'usage d'un logiciel pour construire le plan le mieux adapté à l'étude.

On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur [20], mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique (Coefficient de détermination, écarts-types des réponses et des coefficients, *p*-value, etc.).

Les logiciels de plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tout le domaine d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'isoréponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer rapidement de multiples analyses et de regarder ses données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expériences.

Les logiciels de plans d'expériences sont devenus des outils absolument indispensables pour la construction de plans complexes et l'interprétation approfondie des résultats du plan.

Nous indiquons ci-dessous les principaux logiciels de plans d'expériences et les sites internet correspondants. Quelques-uns d'entre eux mettent à disposition des personnes intéressées des versions de démonstration et certains des versions complètes simplement limitées dans le temps.

Tableau II. 2: Principaux logiciels de plans d'expériences

JMP	http://www.jmpdiscovery.com
Minitab	http://www.minitab.fr
Statistica	http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica
Statgraphics	http://www.sigmaplus.fr
Unscrambler	http://www.camo.no
Pirouette	http://www.infometrix.com
Modde	http://www.umetrics.com

Conclusion

Nous concluons de ce chapitre, que l'amélioration des paramètres de forage est passée par de nombreuses étapes et méthodes, pour atteindre ce qu'elle est aujourd'hui. Nous avons discuté dans ce chapitre de l'une des méthodes modernes d'amélioration des paramètres de forage, qui sont des conceptions expérimentales, qui ont subi un grand développement par les scientifiques et les chercheurs dans ce domaine, car elles ont dépassé les méthodes classiques. et c'est à travers Répondre aux exigences pour améliorer le forage, réduire le nombre d'expériences et ainsi réduire les coûts de forage

Chapitre III
Analyse expérimentale du comportement dynamique d'un outil PDC

.I Introduction

Dans ce chapitre, on analyse le comportement dynamique d'un outil PDC, en appliquant quatre paramètres mécaniques, à trois différents types de roches. Afin d'estimer l'effet de différents paramètres sur le taux de pénétration, on applique la méthode RMS le traitement et l'analyse statistique des données est réalisée à l'aide de la méthode ANOVA Un modèle mathématique est développé pour évaluer la performance de forage.

.II Equipements utilisés

Les tests ont été réalisés sur un banc d'essais similaire à une machine de forage rotatif. Cette foreuse est conçue spécialement pour fournir les données nécessaires pour les paramètres d'étude. Les caractéristiques de la foreuse utilisée sont résumées sur le tableau suivant :

Tableau III**.1 :** caractéristiques de la foreuse.

Tableau III. 1: Caractéristiques de la foreuse.

Puissance maximale	1.5 kw
Poids maximal sur l'outil	250 kgf
Vitesse de rotation	220 tr/min
Diamètre de bit	13 mm

les roches utilisées au cours des éssais sont des roches calcaires, dont ses indices de forabilité sont classés sur le tableau au-dessous.

Tableau III. 2: Caractéristiques des roches.

Roches	**Resistance à la compression**
Roche (A)	1550kg/cm^2
Roche (B)	750kg/cm^2
Roche (C)	640 kg/cm^2

L'outil utilisé pour réaliser les tests est un outil de type PDC. Les valeurs choisies pour chaque paramètre d'études sont données sur le tableau suivant :

Tableau III. 3 : valeurs des paramètres.

Facteurs	**Unité**	**Symboles**	**Niveau**		
			1	**2**	**3**
Angle de coupe	**Degré**	**β**	**3**	**8**	**45**
Poids sur l'outil	**kg f**	**WOB**	**80**	**120**	**160**
Vitesse de rotation	**tr/min**	**RPM**	**118**	**135**	**152**
Résistance à la compression	**kg/cm^2**	**Rc**	**640**	**750**	**1550**

.III Effets des différents paramètres sur le taux de pénétration

Au cours de chaque expérience, on fait varier la valeur d'un paramètre, et on garde les valeurs des autres paramètres fixes, puis on note les observations concernant le développement du taux de pénétration

.III.1 Effet de du poids sur l'outil.

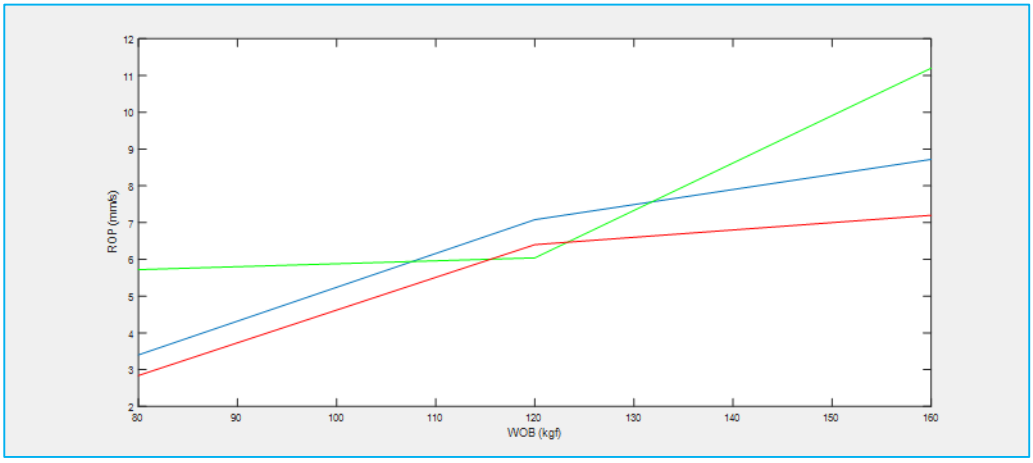

Figure III. 1 : le taux de pénétration en fonction du poids sur l'outil

- **pour valeurs les plus faibles :** (— RPM = 118 tr/min β= 3° Rc= 640 kg/cm^2) .

WOB= [80 ; 120 kgf] Il y a une augmentation très significative de la vitesse de pénétration (2.8 ; 6.4 mm/s) avec l'augmentation du poids sur l'outil .

WOB =[120 ; 160 kgf] après 120 kgf, On observe une faible augmentation du taux de pénétration.

- **Pour les valeurs :** (— RPM= 135 tr/min β=8° Rc= 750 kg/cm^2) .

WOB= [80 ; 120 kgf] nous remarquons un taux de penetration relativment faible (5.72 ;6.04 mm/s).

WOB [120 ; 160 kgf] nous remarquons un taux de pénétration élevé (6.04 ; 11.2 mm/s).

- **Pour les valeurs les très élevé :** (— RPM=152 tr/min β=45° Rc=1550 kg/cm^2).

WOB[80 ; 120kgf] Il y a une augmentation rapide de la vitesse de pénétration (3.4 ; 7.08 mm/s) avec une augmentation du poids sur l'outil .

WOB=[120 ; 160 kgf] après 120 kgf , nous constatons une baisse du taux de pénétration (7.08 ; 8.72mm/s), par rapport le cas précédent .

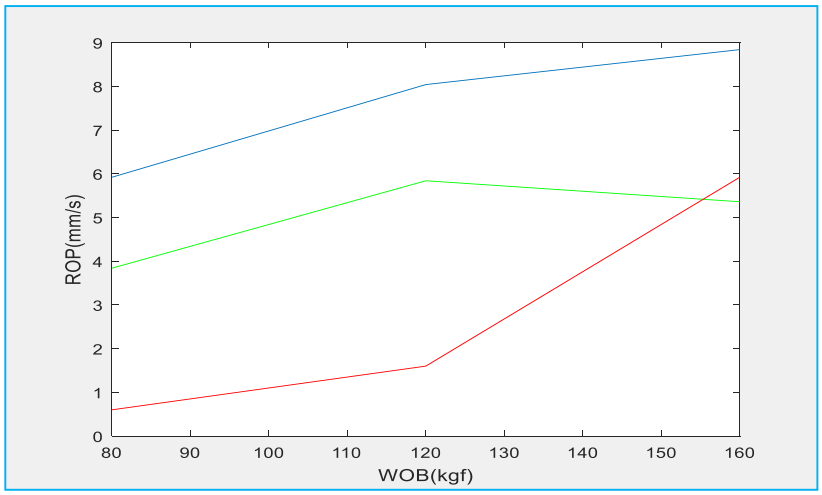

Figure III. 2 : le taux de pénétration en fonction du poids sur l'outil.

- **Pour les valeurs :**

(— RPM= 152 tr/min β= 3° Rc=640kg/cm^2)
(— β=45° RPM=118 tr/min Rc= 640 kg/cm^2)
(— Rc= 1550kg/cm^2 RPM=118tr/min β=3°)

WOB =[80 ; 120 kgf] on note que le taux de pénétration de différentes valeurs augmente significativement avec le gain du poids sur l'outil.

- **Pour les valeurs :** (— RPM= 152 tr/min β= 3° Rc=640kg/cm^2) .

WOB = [120 ; 160 kgf] nous constatons une baisse du taux de pénétration (8.04 ;8.84 mm/s), par rapport le cas précédent .

- **Pour les valeurs :** (— β=45° RPM=118 tr/min Rc = 640 kg/cm^2) .

WOB = [120 ; 160 kgf] Il y a une diminution significative du taux de pénétration (5,84 ; 5,36 mm/s) lorsque le poids appliqué sur l'outil augmente de 120 kg.

- **Pour les valeurs :** (— Rc= 1550kg/cm^2 RPM=118tr/min β=3°) .

WOB = [120 ; 160 kgf] Il y a une augmentation très significative de la vitesse de pénétration (1.6 ; 5.92mm/s) avec l'augmentation du poids sur l'outil .

.III.2 Effet de la vitesse de rotation

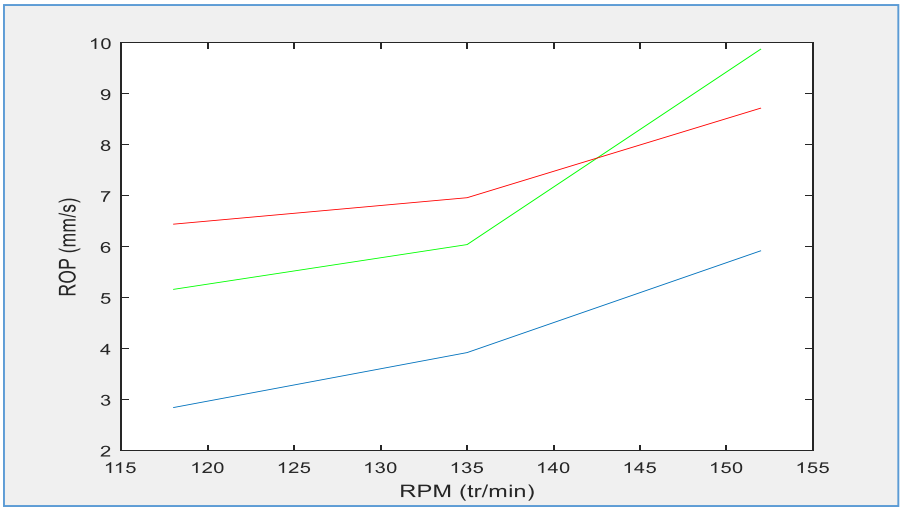

Figure III. 3 : le taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation.

- **Pour les valeurs :**

(— WOB= 160 kgf β=45° Rc=1550 kg/cm^2 **).**
(— WOB=120 kgf β=8° Rc=750kg/cm^2 **)**
(— WOB =80 kgf β=3° Rc=640 kg/cm^2)

RPM= [118;135 tr/min] on note que le taux de pénétration à différentes valeurs augmente de façon significative avec le gain de la vitesse de rotation.

- **Pour les valeurs : (**— WOB= 160 kgf β=45° Rc=1550 kg/cm^2 **) .**

RPM =[135; 152 tr/min] On note que le taux de pénétration des valeurs (6.96 ; 8.72 mm / s) augmente plus que le cas précédent avec l'augmentation de la vitesse de rotation **.**

- **Pour les valeurs : (** — WOB =80 kgf β=3° Rc=640 kg/cm^2) **.**

RPM =[135;152 tr/min] On note que le taux de pénétration des valeurs (3.92 ; 5.92 mm/s) augmente significativement avec de la vitesse de rotation mais mieux que le cas précédent.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=120 kgf β=8° Rc=750kg/cm^2 **)**

RPM =[135 ; 152 tr / min] On note que le taux de pénétration des valeurs (6.04 ; 9.88 mm/s) augmente considérablement avec l'augmentation de la vitesse de rotation, à partir de 135 tr/min.

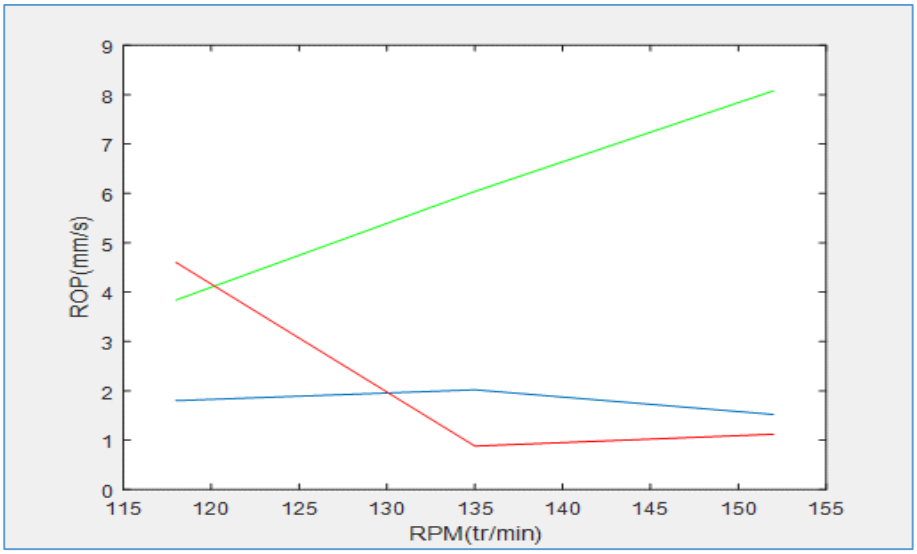

Figure III. 4 : le taux de pénétration en fonction de la vitesse de rotation.

- **Pour les valeurs :** (— β=45° WOB=80kgf Rc=640kg/cm^2) .

RPM = [118 ; 135 ; 152 tr/min] On note que le taux de pénétration des valeurs (3.84 ; 6.04 ; 8.08 mm/s) augmente significativement avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

- **Pour les valeurs :** (— WOB= 160kgf β=3° Rc=640kg/cm^2) .

RPM =[118 ; 135 tr/min] On note que le taux de pénétration reste relativement constant à mésure que la vitesse de rotation augmente .

RPM= [135 ; 152 tr/min] il y a une baisse de taux de pénétration (2.02 ; 1.52 mm/s) quand la vitesse de rotation augmente de 135tr/min.

- **Pour les valeurs :** (— Rc=1550kg/cm^2 WOB=80kgf β=3°)

RPM= [118 ; 135 tr/min] Il y a une diminution drastique du taux de pénétration (4,6 ; 0,88 mm/s) avec l'augmentation de la vitesse de rotation .

RPM= [135 ; 152 tr/min] Après 135 on note une stabilité relative du taux de pénétration avec l'augmentation de la vitesse de rotation

.III.3 Effet de forabilité (dureté) de la roche :

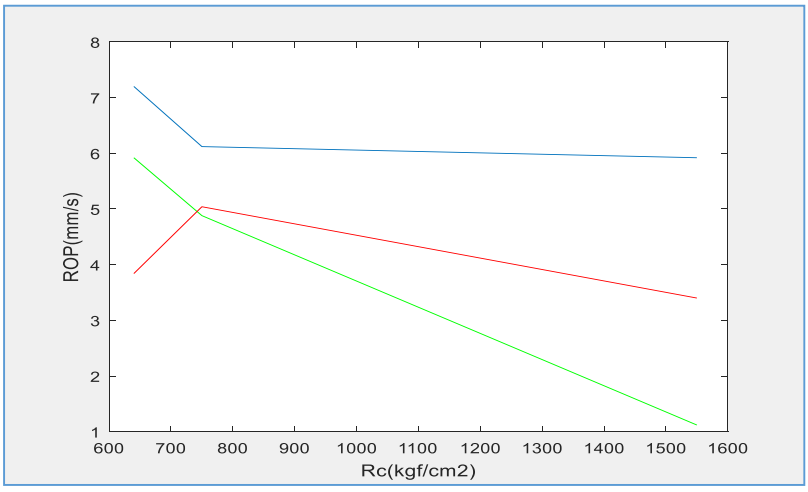

Figure III. 5 : le taux de pénétration en fonction de forabilité de la roche.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=160kgf RPM= 118 tr/min β=3°) .

Rc = [640 ; 750 kg/cm^2] Il y a une diminution du taux de pénétration (7.2 ; 6.12 mm / s) lorsque la forabilité de la roche augmente .

Rc= [750 ; 1550 kg/cm2] Après 750 on note une stabilité relative du taux de pénétration (6.12 ; 5.92 mm / s) lorsque la forabilité de la roche augmente.

- **Pour les valeurs :** (— RPM=152tr/min WOB=80kgf β=3°) .

Rc=[640 ; 750 kg/cm^2] Il y a une diminution du taux de pénétration (5.92 ; 4.88 mm / s) lorsque la forabilité de la roche augmente .

Rc=[750 ; 1550 kg/cm^2] Il y a une diminution drastique du taux de pénétration (4.88 ; 1.12mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente **.**

- **Pour les valeurs :** (— β=45° WOB=80kgf RPM=118tr/min) .

Rc [640 ; 750 kg/cm^2] Il y a une augmentation du taux de pénétration (3.84 ; 5.04 mm/s)lorsque la forabilité de la roche augmente .

Rc [750 ; 1550 kg/cm^2] il y a une diminution du taux de pénétration (5.04 ; 3.4mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente.

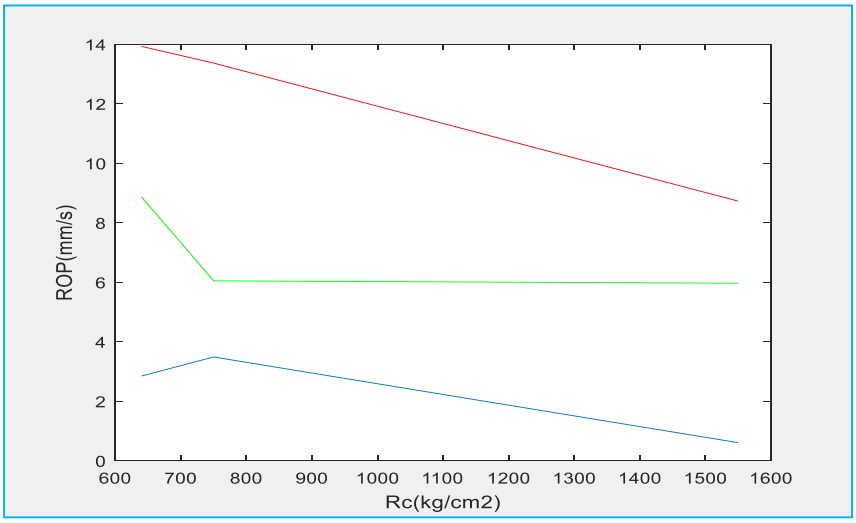

Figure III. 6 : le taux de pénétration en fonction de forabilité de la roche.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=80kgf RPM=118tr/min β=3°) .

Rc=[640; 750 kg/cm^2] Il y a une augmentation du taux de pénétration(2.84 ; 3.48 mm/s)lorsque la forabilité de la roche augmente .

Rc=[750 ; 1550 kg/cm^2] il y a une diminution du taux de pénétration (3.48 ; 0.6 mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente.

- **Pour les valeurs :** (— WOB= 120kgf RPM=135rt/min β=8°)

Rc= [640 ; 750 kg/cm^2] il y a une diminution du taux de pénétration (8.86; 6.04 mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente **.**

Rc=[750 ; 1550kg/cm2] Après 750 on note une stabilité relative du taux de pénétration (6.04 ; 5.96 mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=160kgf RPM=152tr/min β=45°)

Rc= [640 ; 750 ; 1550 kg/cm^2] Il y a une diminution drastique du taux de pénétration (13.92 ; 13.36 ; 8.72 mm/s) lorsque la forabilité de la roche augmente .

.III.4 Effet de l'angle de coupe de l'outil

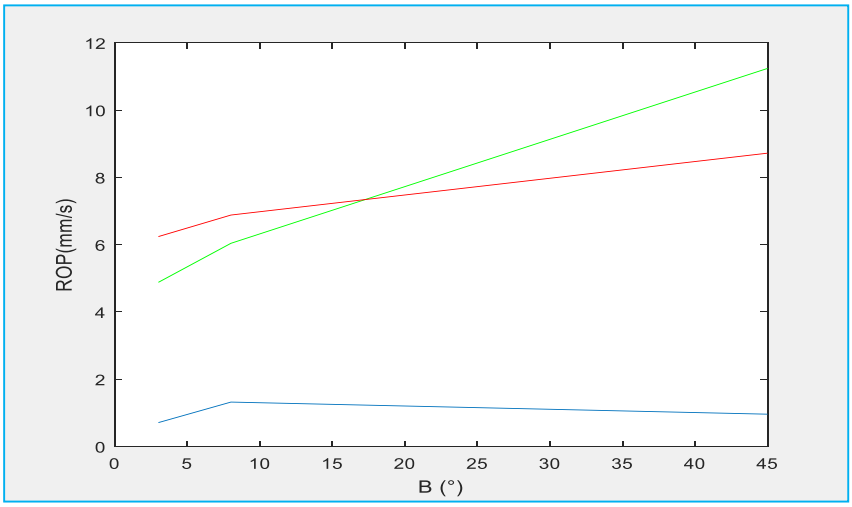

Figure III. 7 : le taux de pénétration en fonction de l'angle de coupe de l'outil.

- **Pour les valeurs :**

(— WOB=80kgf RPM= 118tr/min Rc=640kg/cm^2)
(— WOB=120kgf RPM 135tr/min Rc=750 kg/cm^2)
(— WOB=160kgf RPM= 152 tr/min Rc=1550kg/cm^2)

β=[3° ; 8°] Il y a une augmentation du taux de pénétration lorsque l'angle de coupe de l'outil augmente .

- **Pour les valeurs :** (— WOB=80kgf RPM= 118tr/min Rc=640kg/cm^2)

β=[8° ; 45°] Après (8°) on note une relative stabilité du taux de pénétration (1.32 ; 0. 96mm/s) avec laugmentation de l'angle de coupe de l'outil.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=120kgf RPM 135tr/min Rc=750 kg/cm^2)

β=[8° ; 45°] il y a une agmentation significative de taux de pénétration (6.04 ; 11.24mm / s) quand l'angle de coupe de l'outil augmente de 8°.

- **Pour les valeurs :** (— WOB=160kgf RPM= 152 tr/min Rc=1550kg/cm^2)

β=[8° ; 45°] il y a une agmentation de taux de pénétration (6.88 ; 8.72mm / s) quand l'angle de coupe de l'outil augmente de (8°).

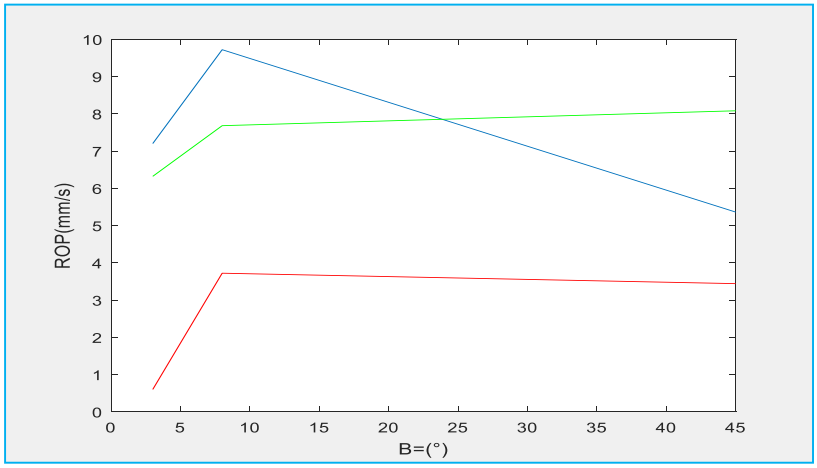

Figure III. 8 : Le taux de pénétration en fonction de l'angle de coupe de l'outil.

- **Pour les valeurs :**

(— WOB=160kgf RPM=118tr/min Rc=640kg/cm^2)

(— Rc=1550kg/cm^2 WOB=80kgf RPM=118tr/min)

β=[3° ; 8°] Nous remarquons une augmentation significative du taux de pénétration quand l'angle de coupe de l'outil augmente.

(— RPM=152tr/min WOB=80kgf Rc=640kg/cm^2)

β=[3°; 8°] Nous remarquons une augmentation du taux de pénétration quand l'angle de coupe de l'outil augmente.

- **Pour les valeurs :**

(— WOB=160kgf RPM=118tr/min Rc=640kg/cm^2)

β=[8°; 45°] il y a une baisse significative de taux de pénétration (9.72 ; 5.36 mm/s) quand l'angle de coupe de l'outil augmente de 8°.

- **Pour les valeurs :**

(— Rc=1550kg/cm^2 WOB=80kgf RPM=118tr/min)

(— RPM=152tr/min WOB=80kgf Rc=640kg/cm^2)

β=[8°; 45°] on note une relative stabilité du taux de penetration quand l'angle de coupe de l'outil augmente de 8°.

L'opération de forage doit être effectuée minutieusement et avec une grande sensibilité par le choix des déterminants nécessaire et les méthodes utilisées dans les différents cas ,le bon choix des valeurs utilisées dans le forage selon le type des roches est primordial pour un bon taux de pénétration, du fait, pour obtenir un taux de pénétration plus important on prend en compte les valeurs de chaque facteur.

.IV Application de la méthode RMS

Dans le cas général, on appelle surface de réponse, la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire à des variables stimuli.

La propriété étudiée, ou réponse Y, résulte alors du transfert par une fonction de réponse explicite, ou fonction de transfert, des variables d'entrée du système, le changement de valeurs de ces variables entraînant un changement de la valeur de la fonction de réponse. Les modèles expérimentaux des surfaces de réponse prennent en considération le choix des variables stimuli, la définition des periods d'observation et le calcul d'erreur.**[48]**

Pour appliquer la méthode, on a pris quatre facteurs et chaque facteur a trois niveaux comme suit :

Tableau III. 4 : facteurs d'étude.

	Unités	nivaux	L[1]	L[2]	L[3]
WOB	Kgf	3	80	120	160
RPM	tr/min	3	118	135	152
RC	kg/cm^2	3	640	750	1550
B	Degré	3	3	8	45

.IV.1 Traitement des données

La présentation des valeurs de la réponse ROP selon la méthode RMS utilisant le logiciel DESIGN EXPERT 11, est montrée sur le tableau :

Tableau III. 5 : Résultats des essais

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Response 1
Run	A:WOB	B:RPM	C:RC	D:β	ROP
	Kgf	tr/min	kg/cm^2	degré	mm/s
1	80	118	1550	8	1.56
2	160	135	750	8	11.2
3	80	118	1550	45	3.4
4	80	152	640	45	3.84
5	120	135	750	3	4.88
6	80	135	640	3	3.92
7	160	118	1550	3	5.92
8	80	135	640	3	3.92
9	160	118	640	3	7.2
10	120	152	640	8	10.12
11	80	152	1550	3	1.12
12	160	118	640	45	5.36
13	160	152	640	3	8.84
14	160	135	750	8	11.2
15	120	118	640	8	7.84
16	160	152	640	3	8.84
17	80	152	750	8	6.72
18	120	135	1550	3	1.96
19	80	152	750	8	6.72
20	160	152	1550	45	8.72
21	160	135	750	8	11.2
22	160	152	1550	8	6.88
23	80	118	750	3	3.48
24	80	152	1550	45	4.52
25	120	135	750	45	11.24

.IV.2 Analyse statistique des données

L'analyse statistique des données se fait par l'approche ANOVA.

L'analyse de variance (expression souvent abrégée par le terme anglais ANOVA : Analysis Of

Variance) est une technique statistique ; son but est en fait de procéder à une sorte de généralisation de la comparaison des moyennes ou de la comparaison des pourcentages lorsqu'il y a plus de deux valeurs à comparer.

Il s'agit aussi de l'équivalent, pour des variables qualitatives de la régression linéaire.

On cherche à expliquer une variable quantitative Y au moyen d'une variable explicative qualitative X.

Généralement, la variable explicative est appelée facteur (explicatif).

Les modalités sont appelées niveaux de facteur [49]

L'analyse est basé sur l'étude des variances, et des degrés de significativité (p-value), comme le tableau au-dessous indiqué. Le tableau présente les résultats de traitement statistique des données pour le niveau de signification α = 5%, et le niveau de confiance est 95%.

Tableau III. 6 : Analyse de la variance.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.68	14	0.1198	11.80	0.0002	Signifiant
A-WOB	0.4142	1	0.4142	40.78	< 0.0001	
B-RPM	0.0020	1	0.0020	0.1950	0.6682	
C-RC	0.0622	1	0.0622	6.13	0.0328	
D-β	0.1625	1	0.1625	15.99	0.0025	
AB	0.0069	1	0.0069	0.6778	0.4295	
AC	0.0830	1	0.0830	8.17	0.0170	
AD	0.0218	1	0.0218	2.15	0.1735	
BC	0.0049	1	0.0049	0.4788	0.5047	
BD	0.0021	1	0.0021	0.2051	0.6603	
CD	0.1549	1	0.1549	15.25	0.0029	
A^2	0.0144	1	0.0144	1.42	0.2610	
B^2	0.0027	1	0.0027	0.2643	0.6184	
C^2	0.0317	1	0.0317	3.13	0.1075	
D^2	0.0751	1	0.0751	7.40	0.0216	
Residual	0.1016	10	0.0102			
Lack of Fit	0.1016	5	0.0203			
Pure Error	0.0000	5	0.0000			
Cor Total	1.78	24				

L'analyse statistique de ce modèle indique principalement que le modèle utilisé est bien ajusté ici puisque la somme des carrés due à l'erreur (résidual égale à 0.1016) est très faible par rapport à la somme des carrés totale (1.78).

Ceci est confirmé par l'analyse plus fine complémentaire donnée ci-dessous. On retiendra principalement la valeur du coefficient de corrélation linéaire multiple (R^2 = 0.94) qui est bien trop important pour rendre compte d'un ajustement correct. R^2 est un indice de déterminer l'adaptation du modèle choisi, d'autant R^2 proche à 1 d'autant le modèle est bien adapté. De même la plupart des indices estimées pour ce modèle sont significativement différents de zéro ce qui, une nouvelle fois, confirme que l'ajustement réalisé est satisfaisant.

Tableau III. 7 : Statistiques d'ajustement

R^2	0.9429
Adjusted R^2	0.8630
Predicted R^2	-0.0244
Adeq Precision	13.1120

Un **R^2 prévu (predicted R^2)** négatif implique que la moyenne globale, peut être une meilleure façon de prédiction de la réponse.

Adeq Precision mesure le rapport signal / bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. ici le rapport de 13.112 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception.

Concernant maintenant l'estimation des divers paramètres inconnus du modèle il est intéressant de remarquer que la valeur F du modèle de 11.80 implique que le modèle est significatif. Il n'y a qu'une chance de 0.02% qu'une valeur F aussi grande puisse se produire en raison du bruit. Les valeurs de p inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. La relation entre la valeur F et la valeur Pest une la relation inverse de sorte que autant F augmente, P diminue. Dans ce cas A (WOB), C (RC), D(β), AC (interaction de poids et la forabilité), CD (interaction de forabilité et l'angle de coupe), et de D^2 (effet quadratique de l'angle de coupe) sont des termes de modèle significatifs, donc ils ont un effet significatif sur la réponse (ROP). Des valeurs supérieures à 0,1 000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

.IV.3 Modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_i + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \cdots + \sum a_{ij} x_i^2 + a_{ij\ldots z} x_i x_j \ldots x_z + e \qquad (18)$$

y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

x_i représente le niveau attribué au facteur *i* par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).

a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

e est l'ecart.

Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$\boldsymbol{y = Xa + e} \qquad \textbf{(19)}$$

y est le vecteur des réponses.

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

a est le vecteur des coefficients.

e est le vecteur des écarts.

On a un système de *n* équations (s'il y a *n* essais) à *p* inconnues (s'il y a *p* coefficients dans le modèle choisi a priori). Donc ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression classique. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note : $\hat{a}$

Le résultat de ce calcul est :

$$\boldsymbol{a = (X' X)^{-1} X' y} \qquad \textbf{(20)}$$

Formule dans laquelle la matrice **X'** est la matrice transposée de **X**. Le logiciel DESIGN EXPERT on exécute ce calcul et donne directement les valeurs des coefficients.

l'équation du réponse ROP (taux d'avancement) selon un modèle quadratique c'est-`a-dire incluant aussi les effets de a_{ii} ou a_{jj} , prend la forme finale suivante :

$$\boldsymbol{(ROP) = -0.416286 + 0.015866WOB - 0.016062RPM + 0.001834RC + 0.039472\beta - 0.000038WOB * RPM + 4.78727E - 06WOB * RC - 0.000061WOB * \beta - 2.88444E - 06RPM * RC - 0.000044RPM * \beta + 0.000013RC * \beta - 0.000040WOB^2 + 0.000095RPM^2 - 1.13808E - 06RC^2 - 0.000729\beta^2} \qquad \textbf{(21)}$$

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour faire des prédictions sur la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine pour chaque facteur.

.IV.4 Effets des différents facteurs sur le taux d'avancement

Après le développement du modèle mathématique en termes de facteurs codés, on peut aisément déterminer l'effet de chaque facteur, ainsi que l'effet d'interaction de deux facteurs.

Le modèle mathématique codé du taux d'avancement ROP est donné par l'équation développé on utilisant le logiciel DESIGN EXPERT 11 suivant :

$$(\boldsymbol{ROP}) = +\mathbf{1.24} + \mathbf{0.1925}\boldsymbol{A} + \mathbf{0.0132}\boldsymbol{B} - \mathbf{0.0746}\boldsymbol{C} + \mathbf{0.1118}\boldsymbol{D} - \mathbf{0.0258}\boldsymbol{AB} + \mathbf{0.0871}\boldsymbol{AC} - \mathbf{0.0511}\boldsymbol{AD} - \mathbf{0.0223}\boldsymbol{BC} - \mathbf{0.0158}\boldsymbol{BD} + \mathbf{0.1232}\boldsymbol{CD} - \mathbf{0.0647}\boldsymbol{A}^2 + \mathbf{0.0274}\boldsymbol{B}^2 - \mathbf{0.2356}\boldsymbol{C}^2 - \mathbf{0.3216}\boldsymbol{D}^2 \quad \mathbf{(22)}$$

L'équation en termes de facteurs codés peut être utilisée pour prédire la réponse pour les niveaux de chaque facteur. Cette équation est utilisée pour identifier l'impact relatif des facteurs par l'estimation des coefficients de ces facteurs. Par la comparaison de l'équation (1), on trouve :

a_0: est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
a_i: est l'effet (ou effet principal) du facteur i.
a_j: est l'effet (ou effet principal) du facteur j.
a_{ij}: est l'interaction entre les facteurs i et j.

.IV.5 Les figures suivantes présentent les effets des différents facteurs sur le taux d'avancement

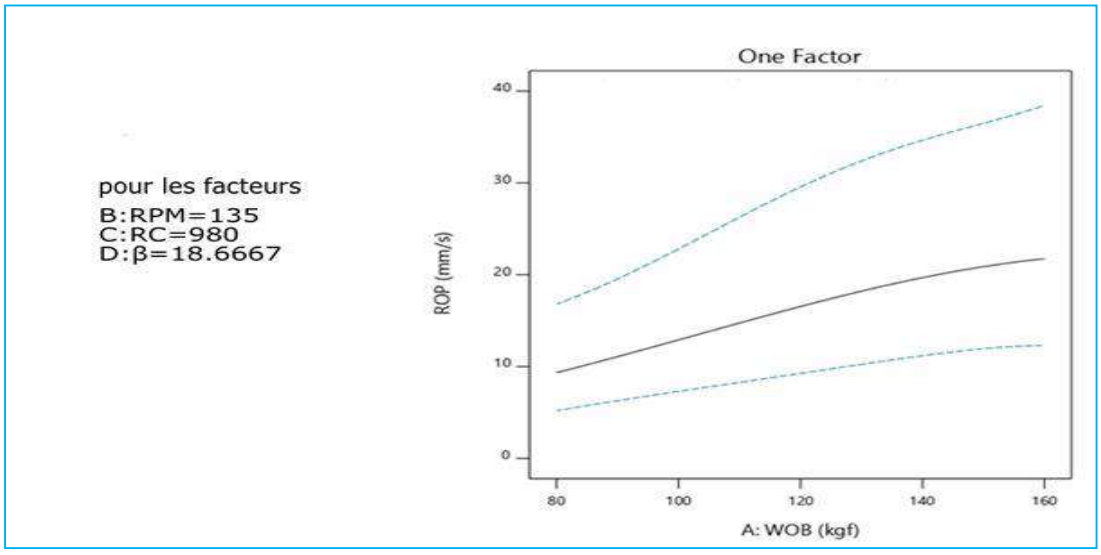

Figure III. 9: L'effet du poids sur le taux d'avancement.

Les courbes ci haut représentent l'effet du poids appliqué sur l'outil sur le taux d'avancement. pour les valeurs des facteurs : B: RPM=135 et C: RC= 980 , D: β=18.6667 ,on constate sur la courbe continue, une augmentation du taux d'avancement quand le poids appliqué sur l'outil augmente ,du 80 à 160.

Les courbes discontinues montrent que les autres valeurs se comportent de la même manière mais le taux d'avancement est différent.

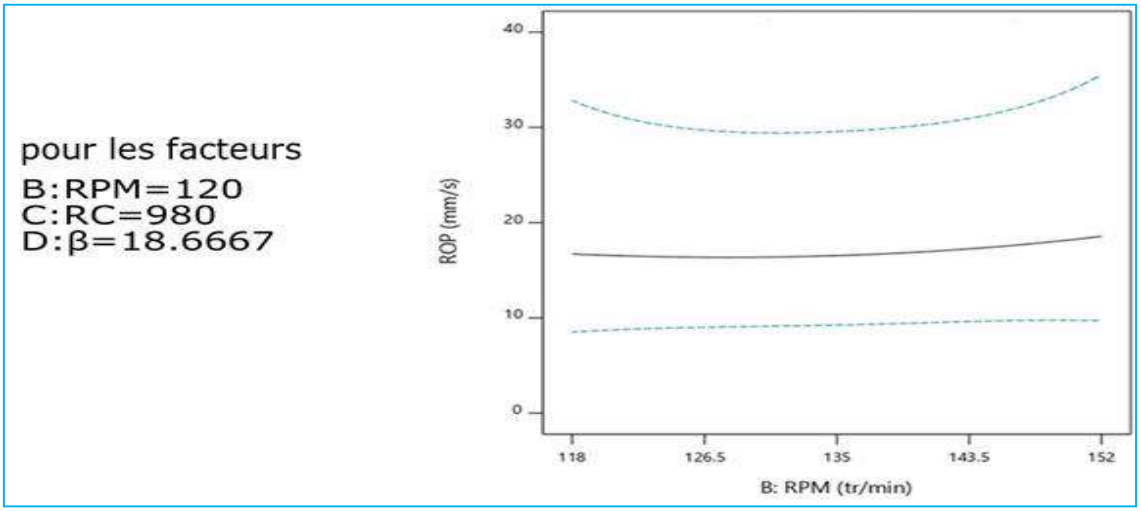

Figure III. 10 : L'effet du vitesse de rotation sur le taux d'avancement .

Les courbes ci haut représentent l'effet de vitesse de rotation sur le taux d'avancement . pour les valeurs des facteurs : B: RPM= 120 et C: RC=980 , D: β=18.6667 On note une stabilité relative du taux d'avancement quand la vitesse de rotation augmente ,du 118 à 152.

Les courbes discontinues montrent que les autres valeurs se comportent de la même manière mais le taux d'avancement est différent.

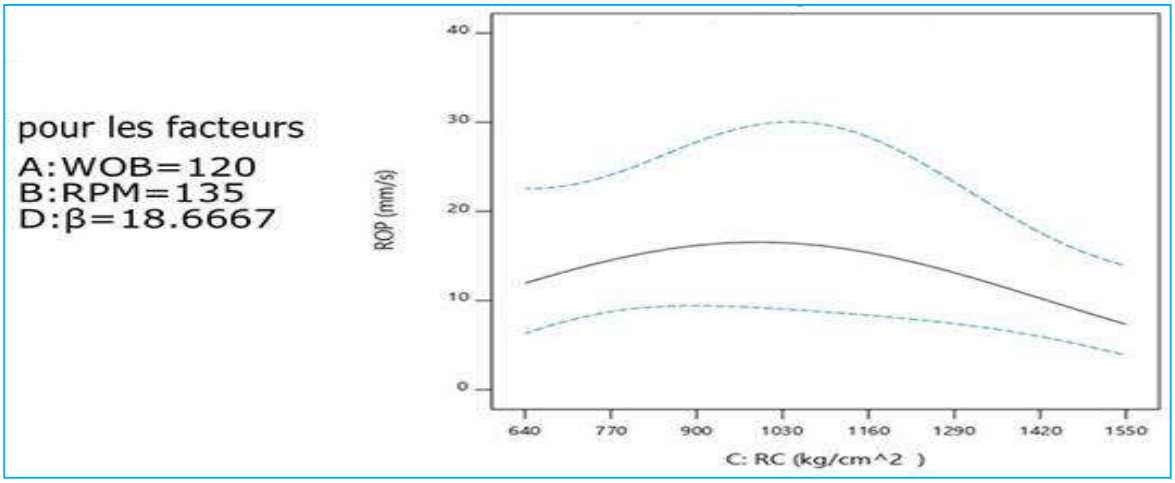

Figure III. 11: L'effet de forabilité de la roche sur le taux d'avancement .

Les courbes ci haut représentent l'effet de forabilité de la roche sur le taux d'avancement. pour les valeurs des facteurs : A : WOB = 120 et B : RPM = 135, D: β=18.6667. On constate sur la courbe continue, une petite augmentation du taux d'avancement puis il recule après une certaine valeur quand la forabilité de la roche augmente.

Les courbes discontinues montrent que les autres valeurs se comportent de la même manière mais le taux d'avancement est différent.

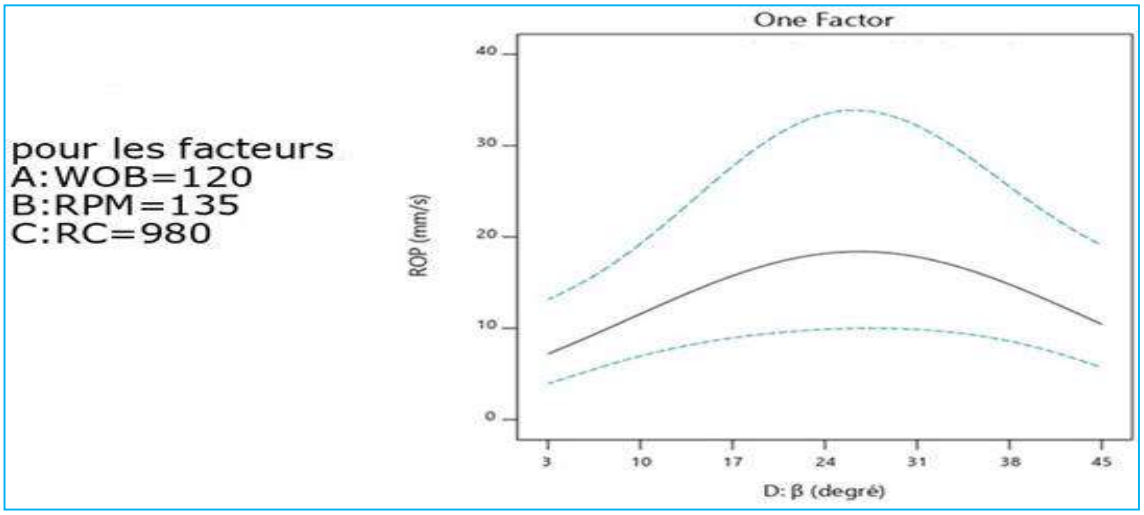

Figure III. 12 : L'effet de l'angle de coupe de l'outil sur le taux d'avancement

Les courbes ci haut représentent l'effet de l'angle de coupe de l'outil sur le taux d'avancement. pour les valeurs des facteurs : A : WOB = 120 et B : RPM = 135 , C: RC=980. on constate sur la courbe continue, une augmentation notable du taux d'avancement puis il recule après une certaine valeur quand l'angle de coupe de l'outil augmente.

Les courbes discontinues montrent que les autres valeurs se comportent de la même manière mais le taux d'avancement est différent.

.IV.6 Analyses graphiques

Les figures suivantes montrent les surface des réponses (ROP):

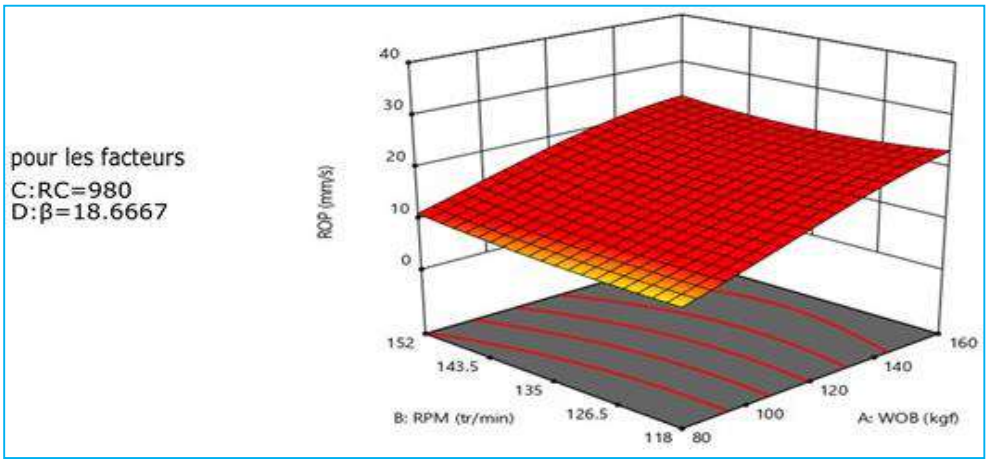

Figure III. 13 : Surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de vitesse de rotation.

La surface de réponse ci haut représentent l'effet du poids sur l'outil et de vitesse de rotation sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs C : RC=980 et D : β= 18.6667 , une augmentation du taux d'avancement quand le poids appliqué sur l'outil augmente et vitesse de rotation augmente .

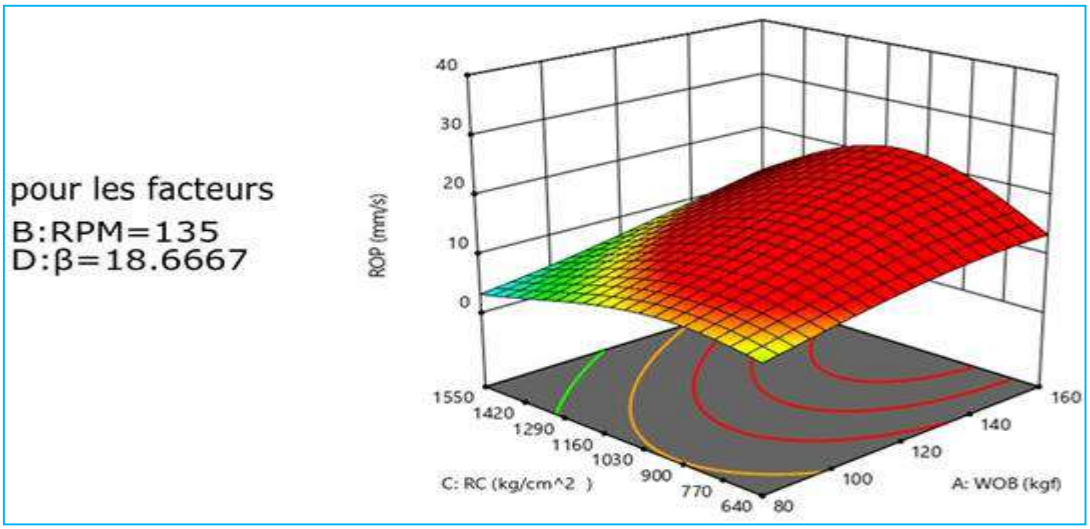

Figure III. 14 : Surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de forabilité du roche .

La surface de réponse ci haut représente l'effet du poids sur l'outil et l'effet de forabilité de roche sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs B: RPM = 135 et D: β =18.6667 , Le taux d'avancement de l'outil augmente avec l'augmentation des facteurs. après certaine valeur, l'avancement reste sensiblement constante même si les deux facteurs augmentent.

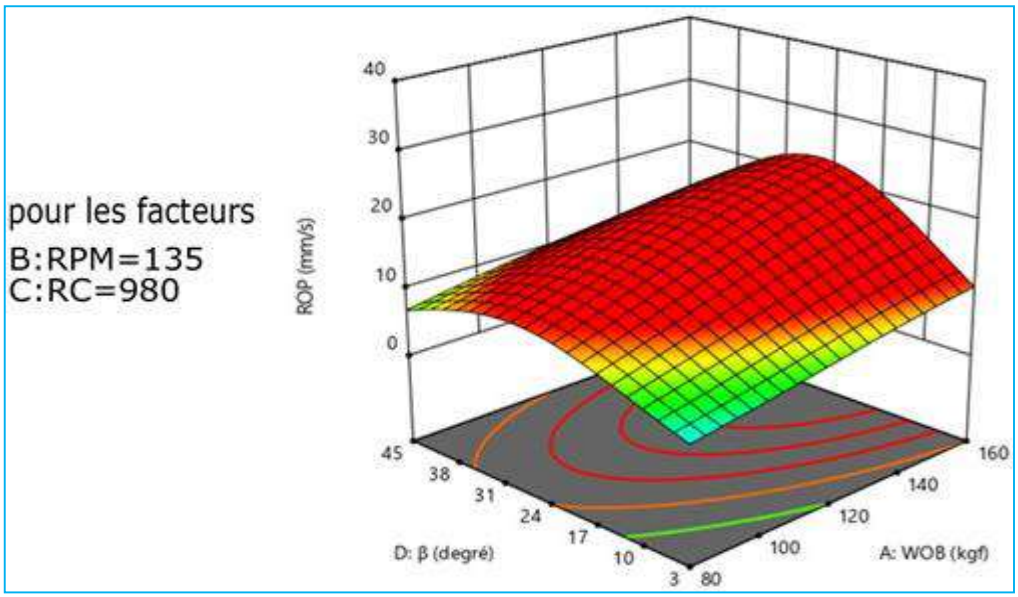

Figure III. 15 : la surface de réponse du taux d'avancement en fonction du poids sur l'outil et de l'angle de coupe .

La surface de réponse ci haut représente l'effet du poids sur l'outil et l'effet de l'angle de coupe sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs B: RPM =135 et C : RC = 980 ; Une faible augmentation du taux de pénétration. Apes une certaines valeurs des facteur l'avancement de l'outil diminue avec lauglentation du poids et de l'angle de coupe

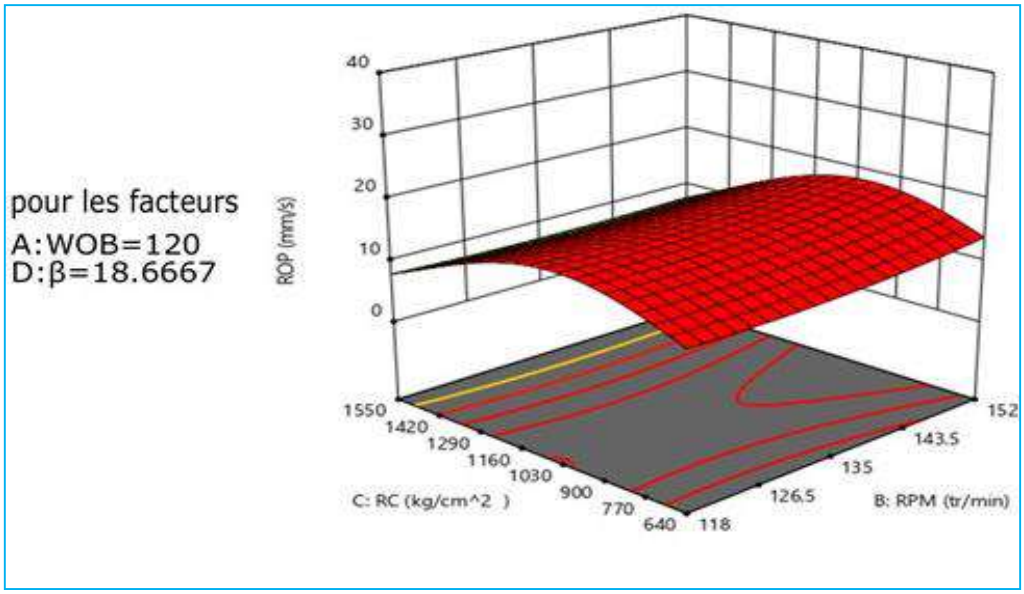

Figure III. 16 : la surface de réponse du taux d'avancement en fonction de la vitesse de rotation et de la forabilité de roche.

La surface de réponse ci haut représente l'effet de la vitesse de rotation et de la forabilité de roche sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs A: WOP = 120 et D: β = 18.6667. on note une relative stabilité du taux d'avancement quand la vitesse de rotation augmente et la forabilité de roche augmente.

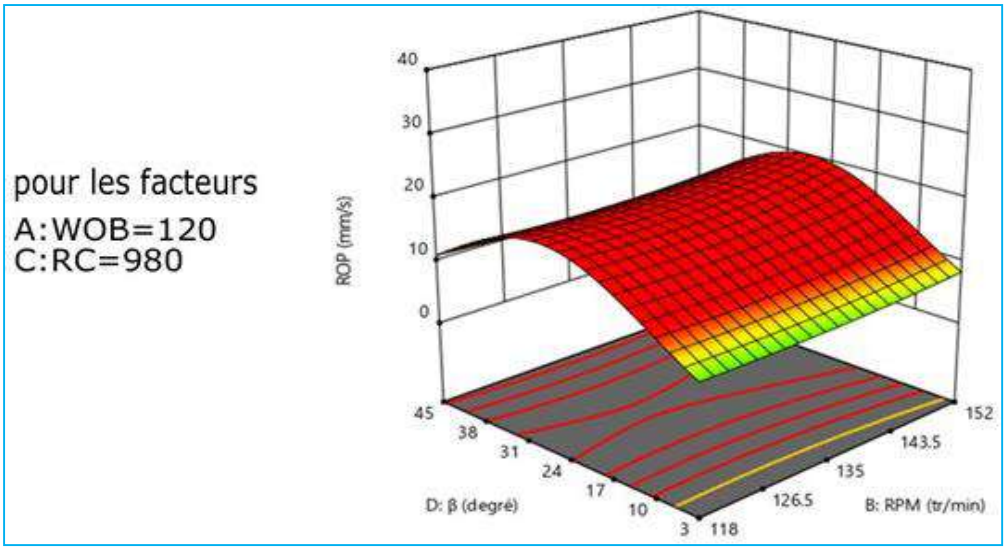

Figure III. 17 : La surface de réponse du taux d'avancement en fonction du vitesse de rotation et de l'angle de coupe .

La surface de réponse ci haut représente l'effet de la vitesse de rotation et de l'angle de coupe sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs : A: WOP = 120 et C:RC = 980 , on constate sur la courbe , une petite augmentation du taux d'avancement puis il recule après une certaine valeur, et diminue avec l'augmentation des deux facteurs.

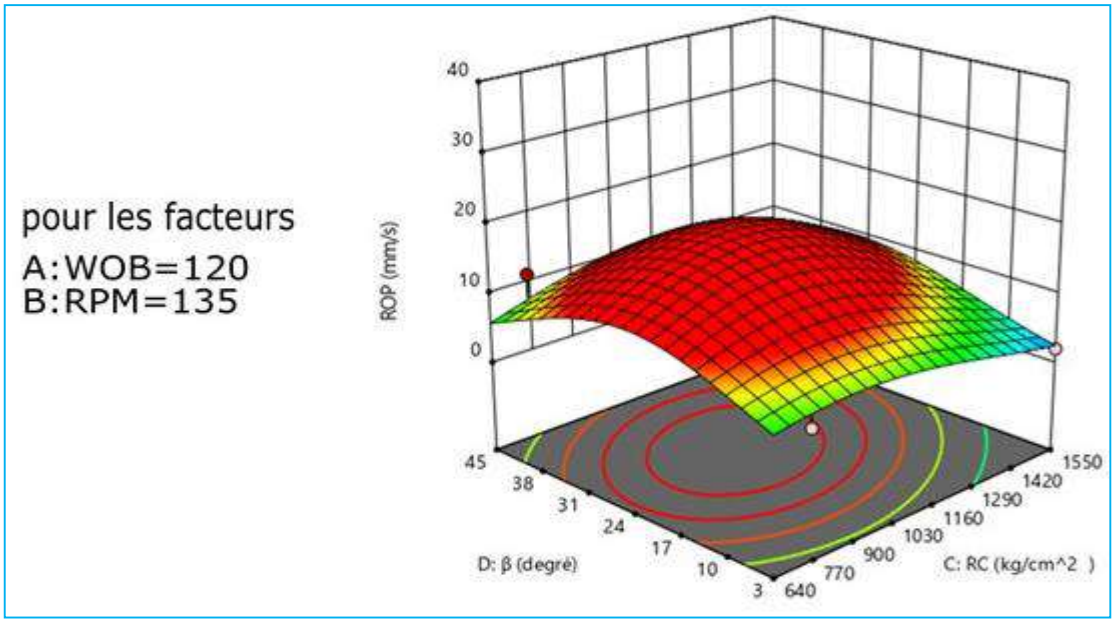

Figure III. 18 : La surface de réponse du taux d'avancement en fonction de la forabilité de roche et de l'angle de coupe.

La surface de réponse ci haut représente l'effet de la forabilité de roche et de l'angle de coupe sur le taux d'avancement.

Pour les facteurs A : WOP=120 et B: RPM= 135, nous voyons une légère augmentation du taux d'avancement par rapport aux valeurs moyennes de l'angle de coupe ,de la forabilité de roche , et le taux d'avancement est faible dans d'autres valeurs.

.V Interprétation des résultats obtenus

La figure suivante décrit le modèle de régression qui permet d'estimer la corrélation des données expérimentales. Celui-ci consiste à rechercher la droite permettant d'expliquer le comportement de la réponse ROP mesurée comme étant une fonction affinée de la réponse prédite. la dispersion de la réponse mesurée est une mesure de la corrélation : si la dispersion est faible l'analyse de régression est adaptée pour décrire la variation de cette réponse et si la dispersion est élevée l'analyse de régression n'est pas adaptée.

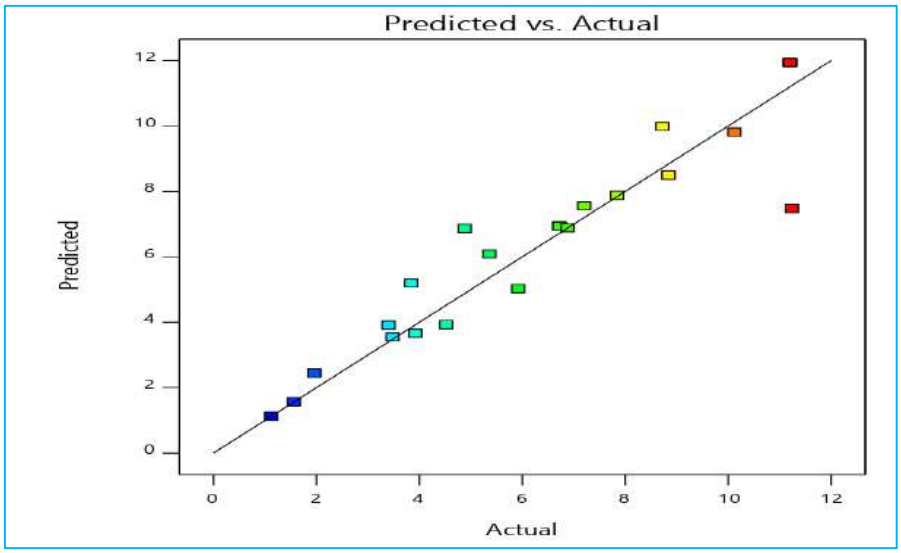

Figure III. 19 : Estimation de corrélation de modèle expérimental et de modèle prévu.

La figure montre que le nuage des points qui représente la réponse mesurée est presque confondu sur le droit repère qui représente la réponse prédite qui traduit d'une grande convergence entre les deux courbes en termes de changement de valeurs. La comparaison entre la réponse mesurée (actual) et la réponse prédite par le modèle (predicted) confirme que l'ajustement est de très bonne qualité. On conclut donc que le modèle est adapte et utile pour prédire le comportement de ROP.

.VI Optimisation des paramètres

Maintenant qu'un ajustement de bonne qualité a été réalisé, l'étape finale consiste à rechercher les valeurs optimales pour le problème posé, c'est-à-dire les valeurs de poids, de la vitesse de rotation, de la forabilité, ainsi que l'angle de coupe amenant à maximiser le taux d'avancement. Pour recherche du maximum d'une fonction de plusieurs variables, il doit trouver tout point annulant les dérivées partielles.

Si on pose $\hat{y}$ la réponse prédite, et x_1, x_2, x_3, x_4 les facteurs, on obtient le système des fonctions suivantes :

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_4}(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$$

Les solutions de ce système sont les valeurs optimales qui conduisent à maximiser le ROP. Le tableau suivant montre les résultats de la résolution des équations par le logiciel utilisé.

Tableau III. 8 : Valeurs optimales.

WOB	RPM	RC	β	ROP
151.745	125.915	1054.445	39.904	17.109

.

Conclusion

Après l'analyse des données obtenues des quatre facteurs mécaniques en utilisant la méthode RMS.

On note que le modèle mathématique développé est utile pour prédire le comportement du taux d'avancement, et estimer précieusement les valeurs optimales des paramètres qui permettent d'avoir la meilleure valeur du taux d'avancement.

Conclusion et recommendation

Conclusion

Le forage pétrolier est ensemble de processus techniques permettant d'extraire du pétrole à l'aide d'équipements et de paramètres de forage appropriés.

L'étude est appuie sur l'analyse de la vitesse d'avancement en fonction de la variation des paramètres mécanique de forage. Le traitement des données conduit au développement d'un modèle d'optimisation, et à la détermination des paramètres optimaux avec l'analyse des résultats obtenus.

En utilisant les méthodes des plans d'expériences notamment la méthode de réponse de surface et l'analyse statistique à l'aide l'approche ANOVA, permet d'obtenir la relation de la contribution de tous les facteurs au taux de pénétration, ainsi que de déterminer les valeurs optimales des différents paramètres. Les résultats obtenus montrent que le modèle développé est utile pour prédire le comportement du taux de pénétration.

Recommandation

La qualité de données est un facteur principal dans l'optimisation et la modélisation de la ROP.

Le domaine de l'exploration pétrolière témoigne d'une grande concurrence entre les compagnies pétrolières, C'est du forage pétrolier, Aussi peu de temps que possible, avec des coûts minimes et fournir les meilleures conditions de sûreté et de sécurité.

Référence

1. SERHANE, K., FORAGE Mars 2012: p. 63.
2. Goupy, J., Plans d'expériences2006: Ed. Techniques Ingénieur.
3. bomcobras, top drive, 2020.
4. Nguyen, J.-P., Le forage1993: Editions OPHRYS.
5. khentout.A, Système d'optimisation des paramètres géométriques de l'outil de forage 2019.
6. Dupond, J., Appareil de forage. p. 15.
7. Nacef, A., Modélisation de la vitesse d'avancement de l'outil de forage: cas du champ d'Ahnet, puits TGR-11ET thn-1, phases 8 1/2 et 6, 2015.
8. Kumar, A.S., A Baseline for Mechanical Specific Energy and Estimation of Bit Wear Rate, 2008, University of Texas at Austin.
9. Ben Hamida, M., Analyse et validation du comportement directionnel des outils de forage couplés aux systèmes de forage dirigé, 2013, Paris, ENMP.
10. Mohamed, F., Etude du régime de forage dans les conditions de la carrière de calcaire (Chouf-Amar M'SILA)

2012, BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY.

11. Dupriest, F.E. and W.L. Koederitz. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. in SPE/IADC drilling conference. 2005. Society of Petroleum Engineers.
12. Rouetbi, O., Maîtrise de l'assemblage et des exigences fonctionnelles des systèmes hyperstatiques déformables : application aux outils de mesures pour forage pétrolier, 2017.
13. RAIS, K., Recherche du régime rationnel de fonctionnement des installations de forage (Cas de la mine de Djebel-Onk), 2018, Ecole polytechnique.
14. Cambefort, H., Forages et sondages1955.
15. Belaid, A., A 3D model for drilling structure behaviour inside complex trajectory wells: application to friction calculations (Torque&Draga), 2005, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
16. Slilimani, A. and M. Daddou, FORMATION JDFModule M1. Mars 2004: p. 62.
17. Abdulgalil, F., Commande non linéaire dans les systèmes de forage pétrolier: contribution à la suppression du phénomène de «stick-slip», 2006.
18. PAR, P., Amélioration des paramètres mécaniques du forage horizontal, 2017, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
19. Peycru, P., et al., Géologie tout-en-un BCPST - 1re et 2e années - Livre+compléments en ligne2008: Dunod.
20. Adel, B., Analyse des paramètres de coupe (abattage mécanique), in des Mines2011, BADJI MOKHTAR ANNABA. p. 81.
21. Lakhdar, K., optimisation des parametres des machines de forage mollest - dans les conditions de la carriere de OUENZA - in Electromécanique2006/2007, Université Badji Mokhtar Annaba.
22. AMRAT, O. and S. GHERIB, Etude de la performance des outils PDC hybrides de la Phase 8''1/2 dans le Champ Gassi Touil.
23. De triangles de TSP de diamant d'outils de coupe écurie polycristalline thermiquement jusqu'à 1200 degrés Celsius. Available from: http://french.polycrystallinediamondcutters.com/.
24. Galle, E. and H. Woods. Best constant weight and rotary speed for rotary rock bits. in Drilling and production practice. 1963. American Petroleum Institute.
25. Bourgoyne Jr, A.T. and F. Young Jr, A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974. 14(04): p. 371-384.

26. Lummus, J., Acquisition and analysis of data for optimized drilling. Journal of Petroleum Technology, 1971. 23(11): p. 1,285-1,293.
27. Graham, J. and N. Muench. Analytical determination of optimum bit weight and rotary speed combinations. in Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. 1959. Society of Petroleum Engineers.
28. Maurer, W., The" perfect-cleaning" theory of rotary drilling. Journal of Petroleum Technology, 1962. 14(11): p. 1,270-1,274.
29. Cunha, J., M. Prado, and L. Bonet, Drilling optimization: A new approach to optimize drilling parameters and improve drilling efficiency, 1995, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY (United States).
30. Bingham, G., A new approach to interpreting rock drillability. TECHNICAL MANUAL REPRINT, OIL AND GAS JOURNAL, 1965. 93 P., 1965.
31. Reed, R.L., A Monte Carlo approach to optimal drilling. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972. 12(05): p. 423-438.
32. Young Jr, F., Computerized drilling control. Journal of Petroleum Technology, 1969. 21(04): p. 483-496.
33. Wilson, D.C. and R.G. Bentsen. Optimization techniques for minimizing drilling costs. in Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. 1972. Society of Petroleum Engineers.
34. Mitchell, B., Advanced oilwell drilling engineering handbook. 1992.
35. Teale, R. The concept of specific energy in rock drilling. in International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. 1965. Elsevier.
36. Pessier, R. and M. Fear. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. in SPE annual technical conference and exhibition. 1992. Society of Petroleum Engineers.
37. Glowka, D.A., Development of a method for predicting the performance and wear of PDC (polycrystalline diamond compact) drill bits, 1987, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA).
38. Barragan, R., O. Santos, and E. Maidla. Optimization of multiple bit runs. in SPE/IADC drilling conference. 1997. Society of Petroleum Engineers.
39. GHALEM, K. and S. Noureddine, Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage.
40. Legrand, F. Méthode des moindres carrés. Available from: https://www.f-legrand.fr/scidoc/docimg/numerique/optimisation/moindrecarre/moindrecarre.html.
41. Tinsson, W., Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques. Vol. 67. 2010: Springer Science & Business Media.
42. Eren, T. and M.E. Ozbayoglu. Real time optimization of drilling parameters during drilling operations. in SPE oil and gas India conference and exhibition. 2010. Society of Petroleum Engineers.
43. Faucher, J., Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue, 2006.
44. GOUPY, J. Plans d'expériences. 10 sept. 1997; Available from: https://www.techniques-ingenieur.fr/.
45. Gillon, F., Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques, 1997.
46. Rao, R.V., Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes: International Research and Development2010: Springer London.
47. Minitab. Available from: https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/.
48. Rguig, M., Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées, 2005.
49. BILLEL, A., La modélisation et l'analyse statistique des données expérimentales, in Génie Mécanique2016/2017, BADJ MOKHTAR - ANNABA. p. 66.

Annexe

.I Effet WOB

- **Le premier cas**

WOB=[80 120 160];

>> ROP=[3.4 7.08 8.72]; % rpm=152 tr/min β=45° Rc=1550kg/cm^2;

>> ROP1=[5.72 6.04 11.2];% rpm= 135tr/min β=8° Rc= 750kg/cm^2;

>> ROP2=[2.84 6.4 7.2];% rpm= 118tr/min β= 3° Rc= 640kg/cm^2;

>> plot(WOB,ROP)

>> hold on

>> plot(WOB,ROP1,'g')

>> hold on

>> plot(WOB, ROP2,'r')

>> xlabel('WOB (kgf)')

>> ylabel('ROP (mm/s)')

Legend (' WOB,ROP ',' WOB,ROP1',' WOB, ROP2')

- **Le deuxième cas**

WOB=[80 120 160];

>> rop=[5.92 8.04 8.84]; % RPM= 152 tr/min β= 3° Rc=640kg/cm^2;

>> rop1=[3.84 5.84 5.36]; % β=45° RPM=118 tr/min Rc= 640 kg/cm^2;

>> rop2=[0.6 1.6 5.92];% Rc= 1550kg/cm^2 RPM=118tr/min β=3°;

>> plot(WOB,rop)

>> hold on

>> plot(WOB,rop1,'g')

>> hold on

>> xlabel('WOB (kgf)')

>> ylabel('ROP (mm/s)')

>> plot(WOB,rop2,'r')

.II Effet RPM

- **Le premier cas**

```
>> RPM=[118 135 152];
>> ROP=[2.84 3.92 5.92];% WOB =80 kgf        β=3°     Rc=640 kg/cm2;
>> rop1=[5.16 6.04 9.88]; % WOB=120 kgf      β=8°     Rc=750kg/cm2;
>> ROP2=[6.44 6.96 8.72];% WOB= 160 kgf      β=45°    Rc=1550 kg/cm2;
>> plot(RPM,ROP)
>> hold on
>> plot(RPM,rop1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(RPM,ROP2,'r')
```

- **Le deuxième cas**

```
>> RPM=[118 135 152];
>> rop=[1.8 2.02 1.52];% WOB= 160kgf   β=3°   Rc=640kg/cm2;
>> rop1=[3.84 6.04 8.08]; % β=45°   WOB=80kgf     Rc=640kg/cm2;
>> Rc=[4.6 0.88 1.12];%Rc=1550kg/cm2     WOB=80kgf       β=3° ;
>> plot(RPM,rop)
>> hold on
>> plot(RPM,rop1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(RPM,rop2,'r')
```

.III Effet Rc

- **Le premier cas**

```
>> Rc=[640 750 1550];
>> ROP=[2.84 3.48 0.6]; % WOB=80kgf      RPM=118tr/min     β=3° ;
>> rop1=[8.86 6.04 5.96];%WOB= 120kgf    RPM=135rt/min     β=8°;
>> rop2=[13.92 13.36 8.72];% WOB=160kgf      RPM=152tr/min     β=45°;
>> plot(Rc,ROP)
>> hold on
>> plot(Rc,rop1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(Rc,rop2,'r')
```

- **Le deuxième cas**

```
>> Rc=[640 750 1550];
>> ROP=[7.2 6.12 5.92];% WOB=160kgf    RPM= 118 tr/min    β=3°;
>> ROP1=[5.92 4.88 1.12];% RPM=152tr/min    WOB=80kgf       β=3°;
>> ROP2=[3.84 5.04 3.4];% β=45°      WOB=80kgf       RPM=118tr/min;
>> plot(Rc,ROP)
>> hold on
>> plot(Rc,ROP1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(Rc,ROP2,'r')
```

.IV Effet β

- **Le premier cas**

```
>> β=[3 8 45];
>> rop=[0.71 1.32 0.96];% WOB=80kgf  RPM= 118tr/min  RC=640kg/cm2 ;
>> rop1=[4.88 6.04 11.24]; % WOB=120kgf  RPM 135tr/min  RC 750 kg/cm2;
>> rop2=[6.24 6.88 8.72]; % WOB=160kgf  RPM= 152 tr/min  Rc=1550kg/cm2;
>> plot(β,rop)
>> hold on
>> plot(β,rop1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(β,rop2,'r')
```

- **Le deuxième cas**

```
>> β=[3 8 45];
>> rop=[7.2 9.72  5.36]; % WOB=160kgf  RPM=118tr/min  Rc=640kg/cm2;
>> rop1=[6.32 7.68 8.08]; % RPM=152tr/min  WOB=80kgf  Rc=640kg/cm2;
>> rop2=[0.6 3.72 3.44]; % Rc=1550kg/cm2  WOB=80kgf  RPM=118tr/min;
>> plot(B,rop)
>> hold on
>> plot(B,rop1,'g')
>> hold on
>> xlabel('WOB (kgf)')
>> ylabel('ROP (mm/s)')
>> plot(B,rop2,'r')
```

Tableau 1. Build Information

File Version	11.1.0.1
Study Type	Response Surface
Design Type	I-optimal
Design Model	Quadratic

Tableau 2. les Factors

Factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean
A	WOB	kgf	Numeric	80.00	160.00	-1 ↔ 80.00	+1↔160.00	120.00
B	RPM	tr/min	Numeric	118.00	152.00	-1↔118.00	+1 ↔ 152.00	137.04
C	RC	kg/cm^2	Numeric	640.00	1550.00	-1↔640.00	+1↔1550.00	966.40
D	β	degré	Numeric	3.00	45.00	-1 ↔ 3.00	+1 ↔ 45.00	14.88