

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté Des Sciences Appliquées

Département De Génie Mécanique

Mémoire

Pour obtenir le Diplôme de master académique

Domaine : Sciences et techniques

Option : électromécanique

Spécialité : maintenance industrielle

Présenté Par :

BOUCENNA Abdelhak

HAOUSSAOUI Nouredine

-Thème-

**Application de la méthodologie des plans d'expérience
à l'optimisation des processus de forage**

Soutenu Publiquement Le : 16 / 06/2021

Devant le jury :

Mis. KHETTABI Rym

Mr. ROUAGDIA Karim

Mis. ALLOUI Imene

Encadreur

Président

Examineur

UKM Ouargla

UKM Ouargla

UKM Ouargla

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2020 / 2021

Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu le bon DIEU le tout puissant qui a fait que ce travail soit terminé;

En achevant ce travail nous tenons à remercier notre encadreur, chargé du suivi notre travail:

Madame KHETTABI RYM

Pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité.

A ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse dans mes études A tous mes enseignants de 1ère année primaire jusqu'à le Master.

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 surtout Lahcen et mes sœurs et ma nièce, pour leurs soutiens qu'ils m'ont apportés et leurs contributions à ma formation.

À toute ma famille petite et grande. À tous mes amis que je connais surtout mes amis dans la Cité universitaire.

B.ABDELHAK

Dédicace

Au nom de Dieu le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Je dédie cet humble travail à ma chère mère et à ma Cher Père.

Tous ceux qui m'ont enseigné, m'ont pris la main et m'ont éclairé sur le chemin
de la science et de la connaissance.

À tous ceux qui m'ont encouragé dans mon cheminement vers l'excellence et le
succès.

"Merci à tous"

Nouredine

Sommaire

Introduction général.....	1
1. INTRODUCTION.....	2
2. Système de forage	2
3. Garniture de forage.....	4
3.1. Tiges de forage.....	5
3.2. Masse-tiges.....	6
3.3. L'assemblage de fond (BHA : Bottom Hole Assembly).....	6
4. Description généralement de forage	6
5. L'Installation de forage.....	8
5.1. Le système de suspension	8
5.2. Le système d'alimentation.....	8
5.3. Le système de rotation.....	9
5.4. Le système hydraulique.....	9
6. FONCTIONS D'UN APPAREIL DE FORAGE	10
6.1. Fonction rotation	10
6.2. Fonction levage	11
6.3. Fonction pompage	15
7. Répartition des équipements de l'appareil de forage	16
7.1. Les équipements de fond	16
7.2. Les Equipements de surface.....	17
8. Conclusion	19
Chapitre II_ Les effets des paramètres mécaniques sur le ROP.....	20
1. Introduction.....	20
2. Les paramètres de forage	20
2.1. Les Paramètres mécaniques.....	21
2.1.1. Vitesse d'avancement (ROP).....	21
2.1.2.Le type des outils de forage	22
2.1.3. Le poids sur l'outil (WOB, Weight On Bit).....	29
2.1.4. Vitesse de rotation ou RPM (révolution per minute).....	29
2.1.5. La nature de la roche.....	29

2.2. Les paramètres hydrauliques.....	30
3. Influence des paramètres mécanique sur la vitesse d'avancement	32
3.1. Le poids sur l'outil.....	32
3.2. La vitesse de rotation.....	34
4. Conclusion	35
Chapitre III L'optimisation des processus de forage.....	36
1 .INTRODUCTION.....	36
2. Objectif des plans d'expérience dans l'optimisation	36
3. Méthodes composites centré (RSM)	37
3.1. Définition	37
3.2. Notion d'espace expérimental	37
3.3. Principe.....	40
3.4. Avantages de la méthode.....	41
4. Matériel	41
5. Application de la méthode.....	42
5.1. Traitement des données.....	42
5.2. Analyse statistique des données	43
5.3. Modélisation mathématique.....	47
5.4 Coefficients en termes des Paramètres codés	48
5.5 Équation finale en termes des facteurs réels.....	50
<u> 5.6 Équation finale en termes des facteurs codés</u>	<u>50</u>
5.7 Validation des résultats obtenus	51
6. Influence des paramètres étudiés sur le ROP	52
7. Les valeurs optimales	56
8. Conclusion	57
CONCLUSION GENERALE.....	58
Références.....	59
ANNEXE.....	61
المخلص	67
Abstract	67
Résumé.....	67

Liste des figures

Chapitre I: Général sur le forage pétrolier

Figure 1.1 : Système de forage Rotary.....	4
Figure 1.2. Garniture de forage	5
Figure 1.3 : Quelques éléments de la garniture de forage.....	5
Figure 1.4 Description simplifiée d'un appareille de forage.....	7
Figure 1.5: Classification des appareils de forage	8
Figure 1.6. Table de rotation	9
Figure 1.7 : Table de rotation	11
Figure 1.8 : Mât de forage.....	12
Figure 1.9 : Moufle fixe	13
Figure 1.10 : Moufle mobile et crochet	13
Figure 1.11 : Le treuil de forage	14
Figure 1.12 : Pompe de forage	15
Figure 1.13 : Cycle du fluide sur le site de forage.....	16

Chapitre II Les effets des paramètres mécaniques sur le ROP

Figure 2.1: Les outils à molettes	23
Figure 2.2 : Outil à diamant naturel	25
Figure 2.3 : Types des outils PDC	26
Figure 2.4: structures des PDC	26
Figure 2.5: mode de travail d'un PDC	27
Figure 2.6 : Les Outils TSP	28
Figure 2.7 : Les Outils imprégnés	28
Figure .28 : Effet du poids sur la vitesse d'avancement	32
Figure 2.9 Effet de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement.....	34

Chapitre III L'optimisation des processus de forage

Figure .31 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.....	38
Figure .32 : L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.....	38
Figure .33 : Les points expérimentaux	39
Figure 3.4 : Plan composite pour deux facteurs.	40
Figure 3.5: les valeurs réel de ROP1 à propos les valeurs Prédite de ROP1	51
Figure 3.6: les valeurs réel de ROP2 à propos les valeurs Prédite de ROP2	52
La figure 3.7 : présente l'effet de WOB sur le ROP1	52
La figure 3.8 : présente l'effet de RPM sur le ROP1.....	53
La figure 3.9 : présente l'effet de WOB sur le ROP2	53
La figure 3.10 : présente l'effet de RPM sur le ROP2	54
Figure 3.11 : présente l'effet de RPM et WOB sur le ROP1	55
Figure 3.12 : présente l'effet de RPM et WOB sur le ROP2	55

Liste des tableaux

Tableau 1:caractéristiques de l'appareil de forage.	41
Tableau 2 : Les valeurs choisies pour chaque paramètre d'études.	41
Tableau3 : présentation des valeurs de la réponse ROP1.	42
Tableau4 : présentation des valeurs de la réponse ROP2.....	43
Tableau5: les résultats de traitement statistique des données pour ROP1.....	44
Tableau6: les résultats de traitement statistique des données pour ROP2.....	45
Tableau7 : Statistiques d'ajustement pour ROP 1.....	45
Tableau8 : Statistiques d'ajustement pour ROP 2.....	46
Tableau9 : les valeurs des coefficients pour ROP1.....	48
Tableau10 : les valeurs des coefficients pour ROP2.....	49
Tableau11 : les valeurs optimales des paramètres pour le ROP1.....	56
Tableau12 : les valeurs optimales des paramètres pour le ROP2.....	57

Nomenclatures

WOB : poids appliqué sur l'outil (Weight on Bit).

RPM : Vitesse de rotation de l'outil de forage (Révolution Par Minute).

RC : est Résistance à la compression.

ROP : Rate Of Pénétration (La vitesse d'avancement de l'outil de forage) .

BHA: Bottom Hole Assembly

PDC: Polycrystalline diamond compact.

TSP: Thermally Stable Polycrystalline.

RSM : est méthode des surfaces de réponse (réponse surface méthodologie).

ANOVA : (analyses of variance).

CV : coefficient de variation.

R²: Coefficient de détermination.

VIF : (variance inflation factor)

Y : est le vecteur des réponses

X : la matrice du modèle.

a : est le vecteur des coefficients.

X: est la matrice transposée de X.

X⁻¹ : est la matrice inversée de X.

x₁; x₂:Sont les valeurs des paramètres

a₀; a₁; a₂; a₃; a₄ : sont les coefficients du modèle mathématique

INTRODUCTION GENERALE

L'optimisation selon la définition est le processus de choisir les meilleures variables afin de maximiser ou minimiser un paramètre spécifique. Ce travail concerne principalement l'optimisation des paramètres mécaniques de forage tels que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation de l'outil et la nature de la formation des roches sur le taux de pénétration. Les paramètres de forage sont les différents facteurs qui conditionnent le taux de pénétration. Ces paramètres sont classés en deux grandes catégories. Paramètres mécaniques concernant le type et la forme de l'outil, le poids, la vitesse de rotation et les paramètres hydrauliques que sont le débit, la pression, la nature du fluide de forage et ses caractéristiques. La compréhension des relations entre les différents paramètres de forage permet d'établir des concepts théoriques et pratiques pour mieux maîtriser les opérations de forage. Dans ce contexte, la recherche actuelle basée sur les interrelations empiriques de différents facteurs qui affectent le taux de pénétration en utilisation l'application de la méthode de composites centrés des plans d'expériences. Cette méthode basée sur l'analyse statistique des données expérimentales, pour obtenir le modèle mathématique qui relie les différents paramètres étudiés.

Le travail est divisé en trois parties, dont la première a été consacré à la description générale de processus de forage. La deuxième partie concerne la détermination des différents paramètres de forage qui influent l'évolution du taux de pénétration. La troisième partie concerne l'application de la méthode d'optimisation, qui permet de développer le modèle mathématique, ainsi que la détermination de valeurs optimales du régime rationnel de fonctionnement de forage.

Chapitre I

Général sur le forage pétrolier

1. INTRODUCTION

Les premiers forages de pétrole ont été réalisés en Allemagne en 1857. Mais l'opération qui eut un grand retentissement fut celle d'Edwin L. Drake en 1859 en Pennsylvanie pour l'extraction du pétrole à 23m de profondeur.

Depuis, les forages ont bel et bien évolué, car de nos jours, ces derniers s'effectuent jusqu'à atteindre des profondeurs allant de 2000 à 6000m, et dépassant parfois les 10 000 mètres. Cela ne pourrait être réalisé qu'en utilisant un outil de forage spécialement conçu pour tailler et détruire la roche. [2]

2. Système de forage

Dans un premier temps, il apparaît nécessaire d'introduire la terminologie pétrolière de base utilisée par la suite. Nous allons donc brièvement rappeler le principe et la constitution des systèmes de forage les plus couramment utilisés aujourd'hui (forage rotary) ainsi que les termes techniques que nous reprendrons à notre compte. Le principe de forage rotary consiste à mettre en rotation un outil sur lequel s'applique une force orientée dans la direction d'avancement. Ce procédé permet de creuser un trou de rayon égal à celui de l'outil. Les copeaux (cutting) générés au fond du trou suite à la destruction de la roche par l'outil remontent en continu à la surface grâce à la circulation du fluide de forage qui est généralement une boue benthonique à base d'eau ou d'huile. Ce fluide est pompé depuis la surface vers l'intérieur des tiges de forage pour être injecté au travers de l'outil sur le front de coupe. La boue remonte ensuite dans l'espace annulaire entre les tiges et les parois du puits et entraîne ainsi les copeaux de roche vers la surface. Le poids sur l'outil (Weight On Bit :WOB) est obtenu par gravité grâce à l'introduction de tiges lourdes appelées masses tiges. Le couple de rotation est obtenu soit à partir d'un couple en surface transmis vers l'outil via un train de tiges soit à partir d'un moteur fond de trou au-dessus de l'outil et piloté en surface.

Un système de forage rotary classique (figure 1.1) se compose principalement de :

Un système de production d'énergie : 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.

Un appareil de levage : cet appareil est constitué d'un derrick, d'un crochet et d'un treuil. Il permet d'effectuer les manœuvres de tiges (remonté du puits ou descente) et la complétion, mais aussi de contrôler le poids appliqué sur l'outil. Nous présenterons plus en détail dans la deuxième partie de ce chapitre une description explicite les efforts au crochet notamment en manœuvres car la quantification de ces efforts (Drag) constitue un objet essentiel de notre étude.

Un système de rotation : Il est constitué d'une table de rotation, d'une tige d'entraînement à section carré (Kelly) ainsi que d'une tête d'injection qui peut être motorisée (Top Drive). Comme pour l'effort au crochet, la prédiction du couple en surface (Torque).

Un système hydraulique : ce système se compose d'un ensemble de bacs à boue, de pompes à boue ainsi que d'un système de traitement de la boue.

Une garniture de forage : Le terme garniture de forage désigne toute la partie du système à l'intérieur du trou de forage. [1]

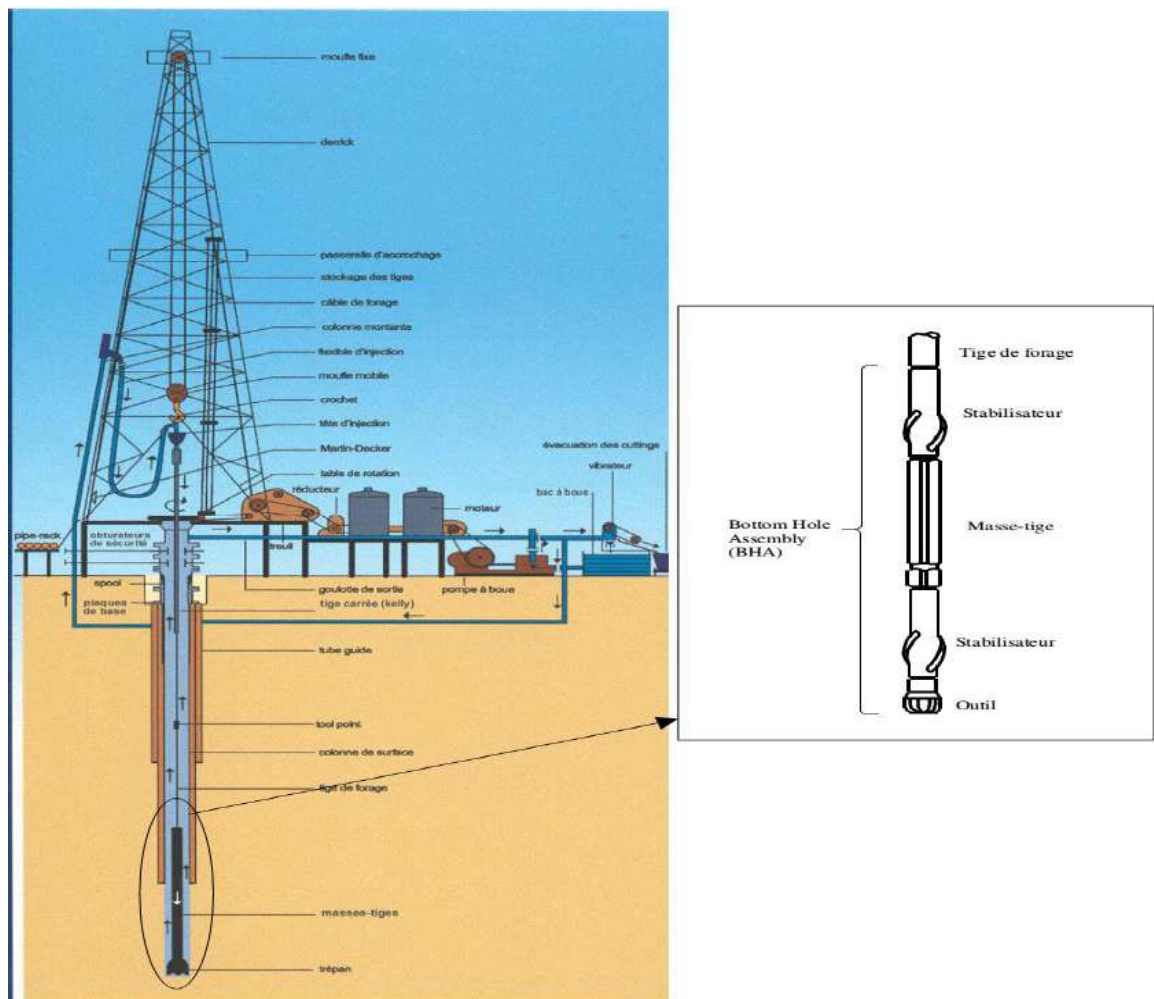


Figure 1.1 : Système de forage Rotary [1]

3. Garniture de forage

C'est la partie qui opère dans le puits, elle établit une liaison entre la table de rotation (en surface) et l'outil de forage (trépan). Elle est aussi appelée « arbre de forage » dont les principaux rôles sont :

- Transmettre l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche.
- Guider et contrôler la trajectoire du puits.
- Transmettre la force de poussée.
- Assurer la circulation du fluide. [2]

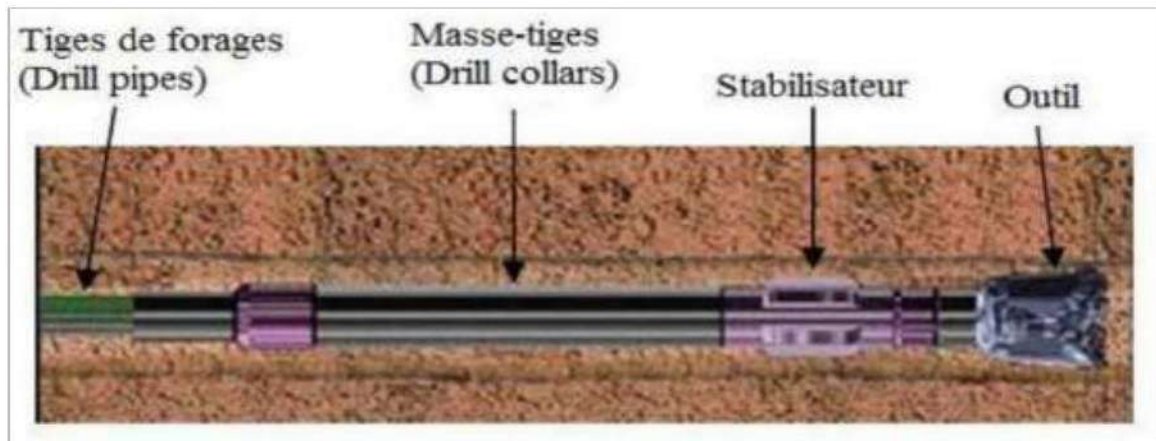


Figure 1.2 : Garniture de forage. [2]



Figure 1.3 : Quelques éléments de la garniture de forage [1]

Elle est constituée de :

3.1. Tiges de forage

Ce sont des tiges qui servent à transmettre le mouvement de rotation depuis la table de rotation jusqu'à l'outil, et d'acheminer la boue jusqu'à ce dernier. Les tiges doivent travailler en tension pour éviter de se détériorer et de provoquer la retombée des parois du puits et la déviation de ce dernier. Ce sont les raisons pour lesquelles elles ne peuvent pas servir pour poser du poids sur l'outil et l'enfoncer dans le sol, ce qui les met en compression et les fléchit. Cette fonction est assurée par les masse-tiges.

3.2. Masse-tiges

Ce sont des tiges plus robustes, beaucoup plus lourdes et moins souples que les tiges. Leur diamètre extérieur est proche de celui du puits, pour éviter leur flexion lorsqu'elles sont mises à la compression.

3.3. L'assemblage de fond (BHA : Bottom Hole Assembly)

C'est la partie inférieure de la garniture de forage, elle comporte l'outil de forage, les masse-tiges, ainsi que les équipements auxiliaires tels que les stabilisateurs.

a. Les stabilisateurs : Ils ont un diamètre presque égal à celui de l'outil. Intercalés entre les masse-tiges, ils les maintiennent droites dans le puits, évitent leur flexion et la déviation du puits.

b. Les tiges lourdes : Elles sont plus rigides que les tiges et moins rigides que les masses tiges. Intercalées entre les unes et les autres, elles évitent la rupture de tiges.

4. Description généralement de forage

Un appareil de forage est constitué d'un ensemble d'équipements, permettant les fonctions de levage, rotation et pompage afin de réaliser un sondage, ainsi que des équipements de sécurité, notamment ceux de mise en sécurité du puits en cas de venue. [5]

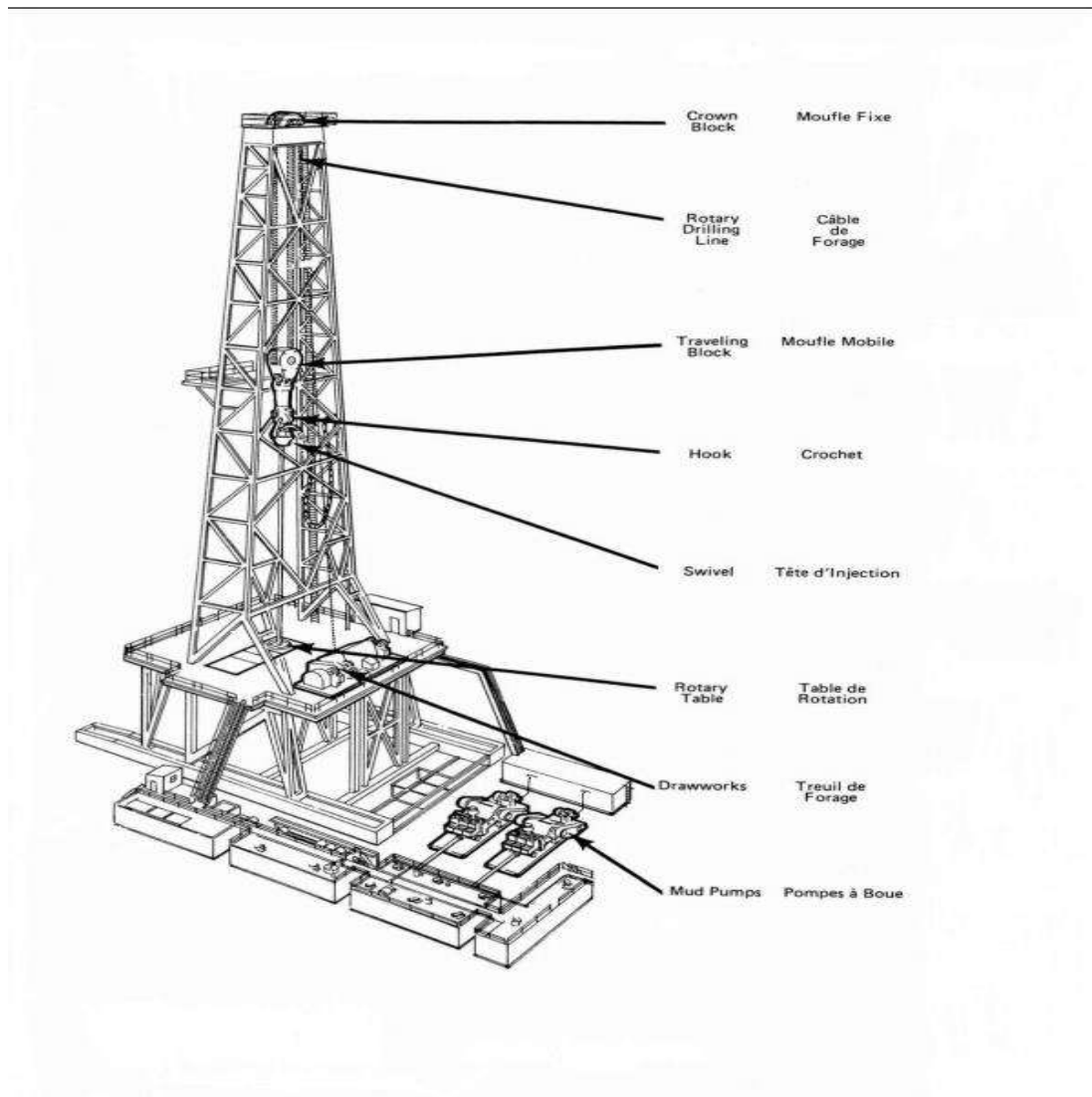


Figure 1.4 : Description simplifiée d'un appareil de forage [5]

4.1. Classification des appareils de forage

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale (figure 1.5).

Les appareils de forage peuvent être classés comme suit :

- Appareil léger.
- Appareil moyen.
- Appareil lourd.
- Appareil ultra lourd. [3]

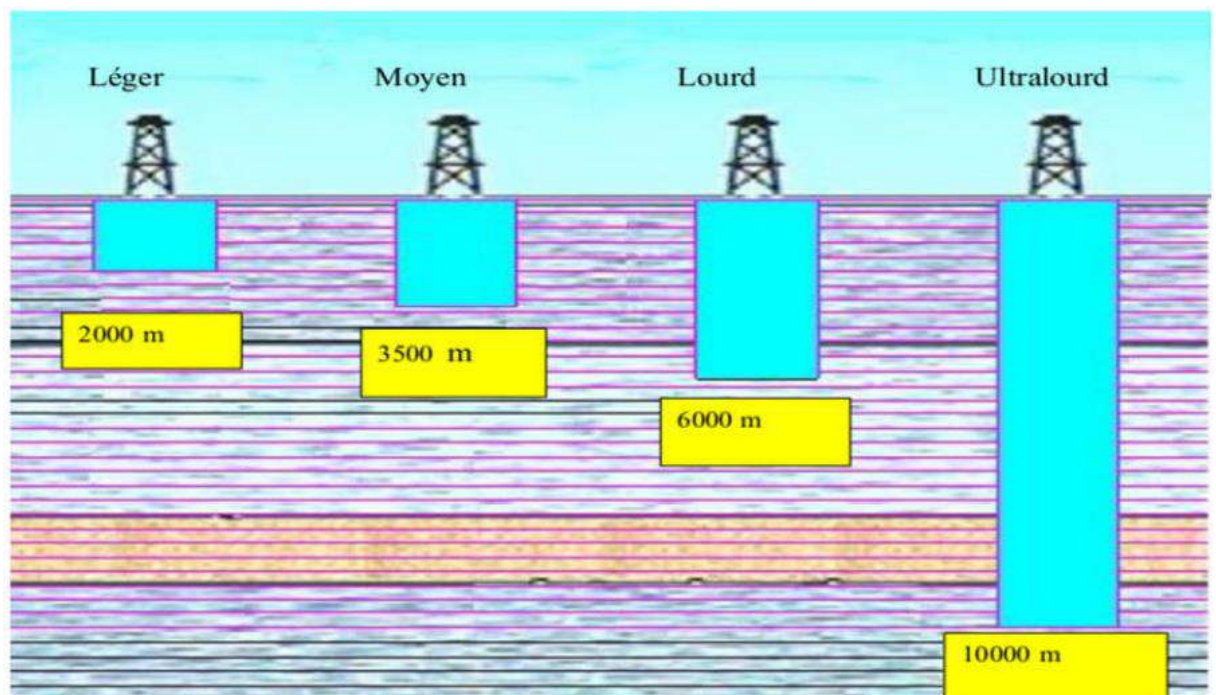


Figure 1.5: Classification des appareils de forage [4]

5. L'Installation de forage

C'est la partie visible, située sur la surface du sol, elle atteint jusqu'à 80 m de hauteur et comporte plusieurs systèmes qui assurent diverses fonctions :

5.1. Le système de suspension

La tâche dédiée au système de suspension réside dans les déplacements du processus de forage (montée, descente) et dans le contrôle du poids appliqué sur l'outil. Il dispose d'un derrick, pouvant présenter une hauteur de plus de 80m, un crochet et un treuil motorisé. Le derrick représente le point culminant de la plateforme. C'est une tour métallique qui soutient une tige au bout de laquelle se situe le trépan. La tige est rallongée au fur et à mesure que le trépan opère. [6]

5.2. Le système d'alimentation

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : pompe de rotation, treuil, et la table de rotation. [6]

5.3. Le système de rotation

Pour faire tourner l'outil, on visse au sommet des tiges, de forme cylindrique, une autre de section carrée ou hexagonale, appelée tige d'entraînement, et on l'introduit dans un moyeu appelé table de rotation.

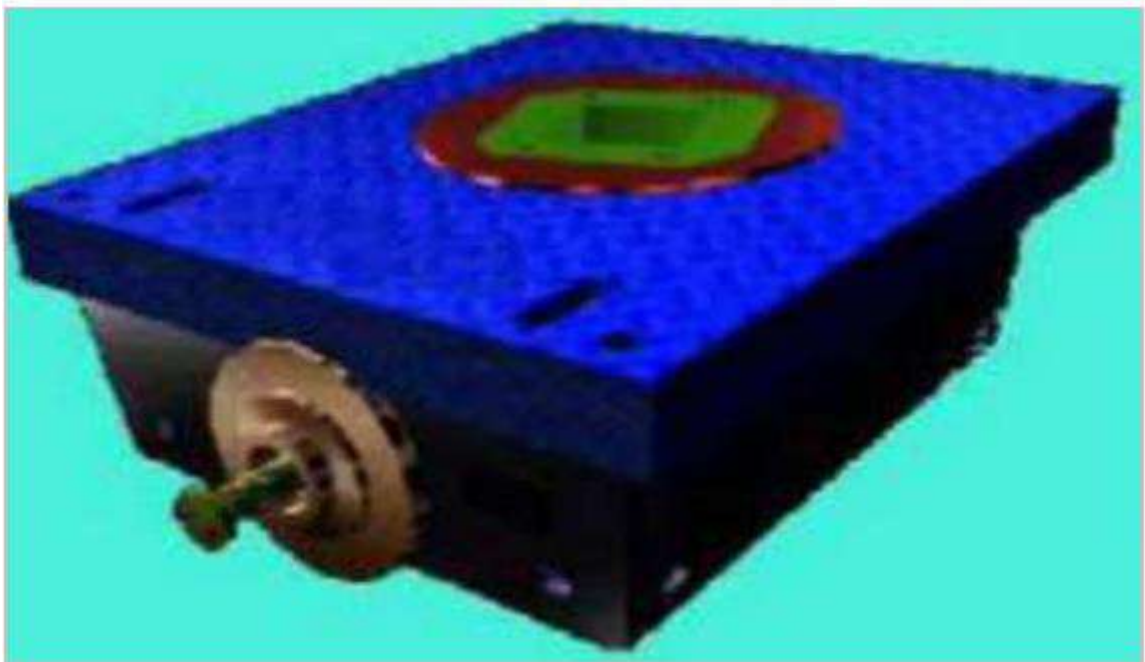


Figure 1.6 : *Table de rotation.* [2]

Cette table est placée sur un carré d'entraînement, qui comporte des rouleaux épousant la forme de la tige d'entraînement. [2]

5.4. Le système hydraulique

Cette fonction est assurée par une pompe de circulation. La boue est fabriquée dans des bassins de grande capacité. Elle est ensuite aspirée par des pompes et refoulée dans des tiges creuses. Elle descend le long de la garniture de forage, sort par les orifices de l'outil, remonte dans l'espace annulaire entre la garniture de forage et le puits jusqu'en surface.

6. FONCTIONS D'UN APPAREIL DE FORAGE

Les installations de forage employées pour le forage rotary des puits profonds représentent un ensemble de différentes machines, mécanismes et bâtiments.

Au cours de forage rotary d'un puits profond, à l'aide d'une installation de forage, on réalise les opérations suivantes :

- Descente de la colonne de tige de forage dans le puits.
- Rotation d'un outil de forage.
- Injection du liquide de forage dans le puits afin de remonter les déblais de terrain découpés, refroidir le trépan et consolider les parois du puits.
- Rallongement de la colonne de tiges de forage par la mesure de l'augmentation de la profondeur du puits.
- Montée de la colonne des tiges pour remplacer un outil de forage usé.
- Evacuation de déblais du terrain par le liquide de forage et préparation d'un nouveau liquide.
- Descente des colonnes de tubage. [7]

L'ensemble de tous ces équipements qui travaillent au-dessus de la surface permettent d'assurer trois fonctions principales :

6.1. Fonction rotation

Pour faire tourner l'outil, on visse au sommet des tiges, de forme cylindrique, une autre tige de section carrée ou hexagonale, appelée tige d'entraînement [Kelly], et on l'introduit dans un moyeu appelé table de rotation [rotary table]. [7]

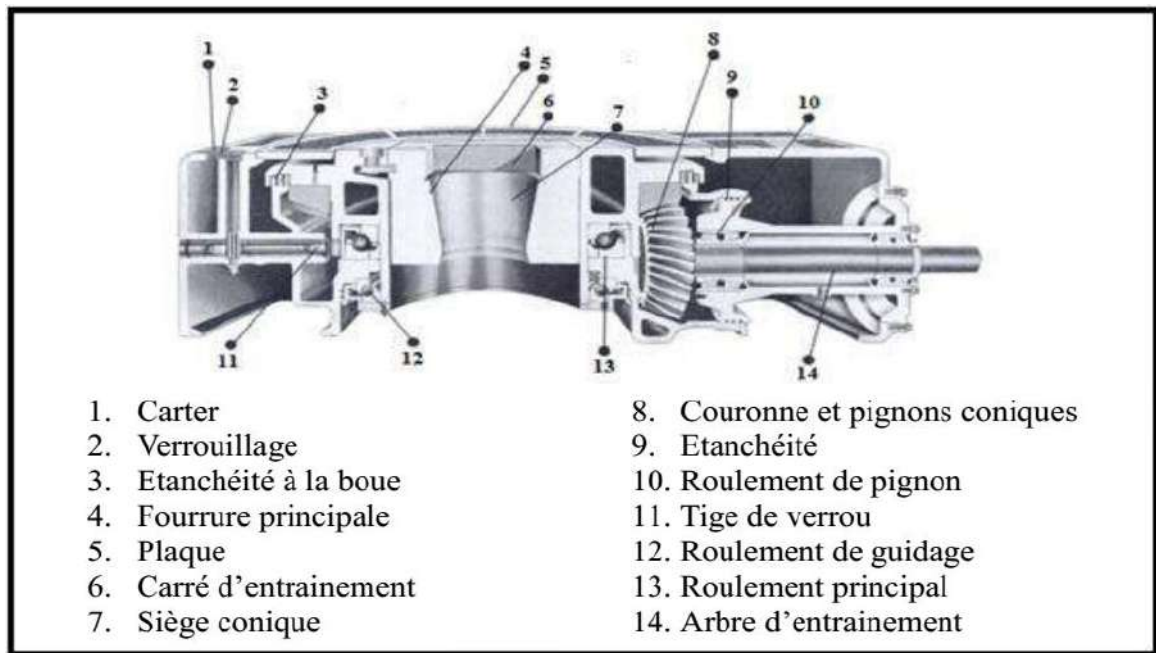


Figure 1.7 : Table de rotation [3]

6.2. Fonction levage

Pour soulever la garniture de forage (ensemble tiges - tiges lourdes – masse-tiges), il faut utiliser une grue de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes ou plus. Cette grue est constituée :

- d'un mât.
- d'un treuil.
- d'un palan comprenant les moufles fixe et mobile et le câble. [7]

6.2.1. Le mât de forage

C'est le « trépied » qui supporte le palan. Il a remplacé la tour pour la rapidité de son montage et démontage.

A son sommet est placé le moufle fixe. Une passerelle d'accrochage est placée à son milieu ; elle sert de lieu de travail pour l'accrocheur, qui accroche ou décroche les « longueurs » de tiges lors de la remontée ou la descente de l'outil dans le puits. Une autre passerelle de hauteur ajustable, placée plus bas, sert à guider le tubage pour le visser et le descendre dans le puits.

Un plancher de travail est aménagé aux pieds du mât. Il sert d'aire de travail pour l'équipe. Une cabine est aménagée sur ce plancher pour permettre aux ouvriers de se reposer.

Le plancher est surélevé de quelques mètres au-dessus du sol, pour permettre l'introduction des éléments de la tête de puits et des obturateurs.

Les toutes repose sur une substructure robuste, formée de caissons en treillis de fer soudés. Un plan incliné est conçu pour faire remonter les tiges sur le plancher pour les descendre dans le puits. L'ensemble est posé sur une plate-forme en béton armé, préalablement aménagée sur le sol. [7]

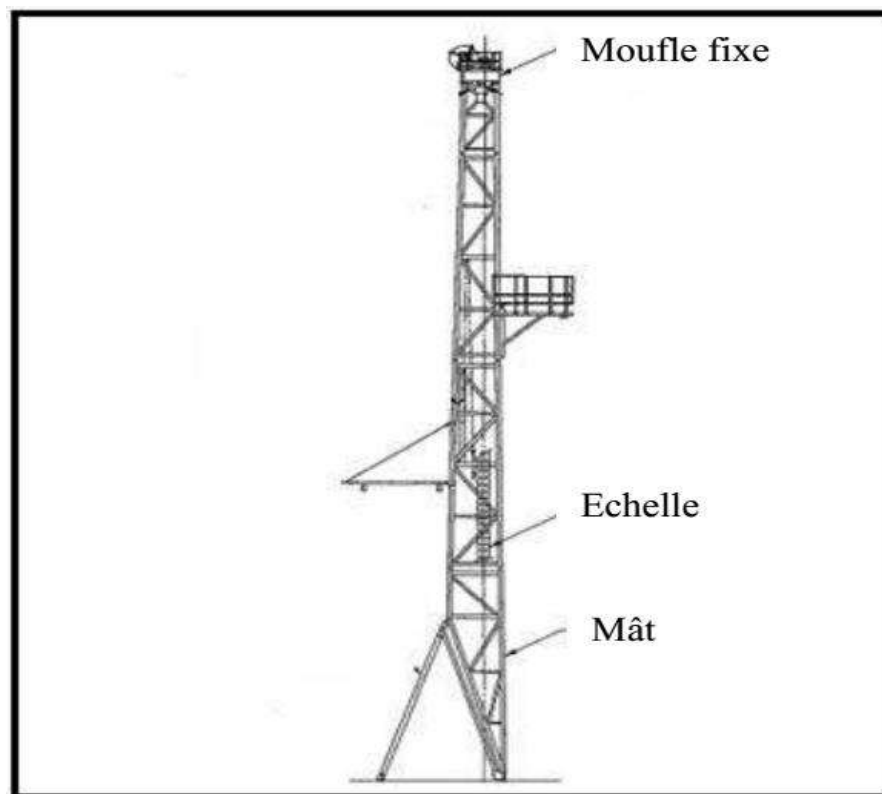


Figure 1.8 : Mât de forage [3]

6.2.2. Le mouflage

Le mouflage est l'enroulement du câble de forage entre les poulies des moufles fixe et mobile en plusieurs brins (jusqu'à 14 brins). Le mouflage permet de démultiplier le poids de la garniture de forage et diminuer la vitesse de son déplacement. En négligeant les frottements, la charge au crochet est divisée par le nombre de brin. [7]

6.2.2.1. Moufle fixe

C'est l'ensemble des poulies sur lequel passe le câble. Il est supporté par la plateforme supérieure de la tour de forage. [3]

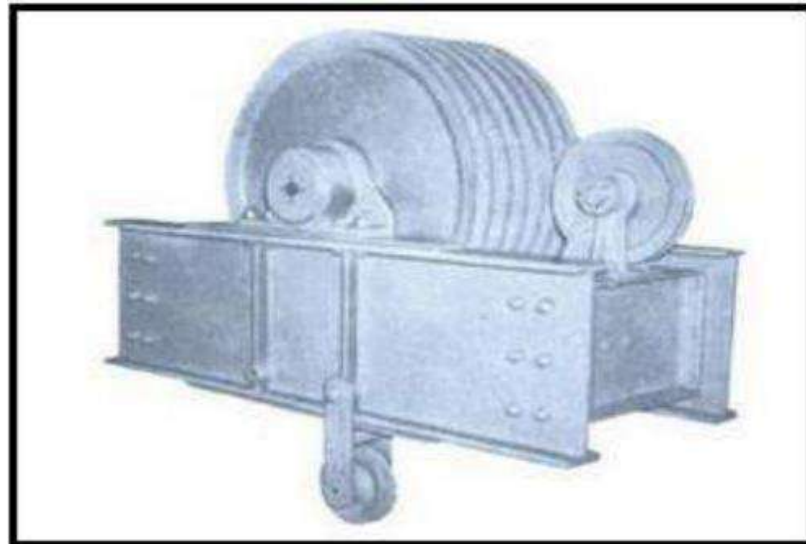


Figure 1.9 : *Moufle fixe* [3]

6.2.2.2. Moufle mobile et crochet

Ils sont en général (Figure 1.10), c'est-à-dire que l'ensemble des poulies et du crochet sont assemblés d'une manière compacte. Le crochet comporte un amortisseur pour limiter les chocs à la reprise de la charge et faciliter le vissage des connexions. Aux deux oreilles latérales sont suspendus les bras de l'élévateur [3].



Figure 1.10 : *Moufle mobile et crochet* [3]

6.2.3. Le treuil de forage

Le treuil de forage est l'organe principal de la sonde; par sa capacité il caractérise le rig (sonde de forage) en indiquant la profondeur de forage que peut atteindre l'appareil de forage.

Le treuil regroupe un ensemble d'éléments mécaniques et assure plusieurs fonctions :

- Les manœuvres de remontée et de descente (levage) du train de sonde à des vitesses rapides et en toute sécurité, ce qui constitue sa principale utilisation.
- L'entraînement de la table de rotation quand celle-ci n'est pas entraînée par un moteur indépendant.
- les visages et dévisages du train de sonde ainsi que les opérations de curage. [7]

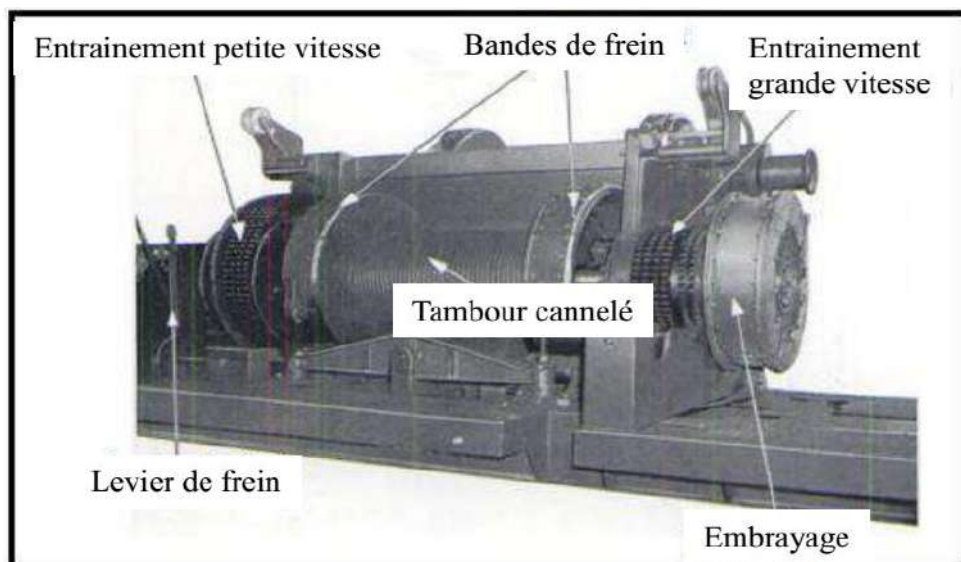


Figure 1.11 : Le treuil de forage [3]

6.2.4. Câble de forage

Les câbles utilisés sur l'installation de sondage sont des câbles en acier mais dont l'âme peut parfois être en chanvre. Autour de l'âme sont enroulés des torons, chacun de ces torons étant composés d'un certain nombre de fils d'acier. [3]

6.3. Fonction pompage

La fonction pompage assure l'acheminement du fluide de forage depuis l'aspiration de la pompe jusqu'au retour aux bassins.

La boue [mud] est fabriquée dans des bassins de grande capacité. Elle est ensuite aspirée par des pompes [mud pumps] et refoulée dans les tiges creuses. Elle descend le long de la garniture de forage [drilling string], sort par les orifices de l'outil, remonte dans l'espace annulaire entre la garniture de forage et le puits jusqu'en surface. Là, elle est recueillie dans un tube vertical (tube fontaine), puis acheminée par un autre horizontal (goulotte) vers des tamis vibrants, pour être débarrassée des déblais [cuttings], avant d'être réinjectée dans le puits [well]. [7]

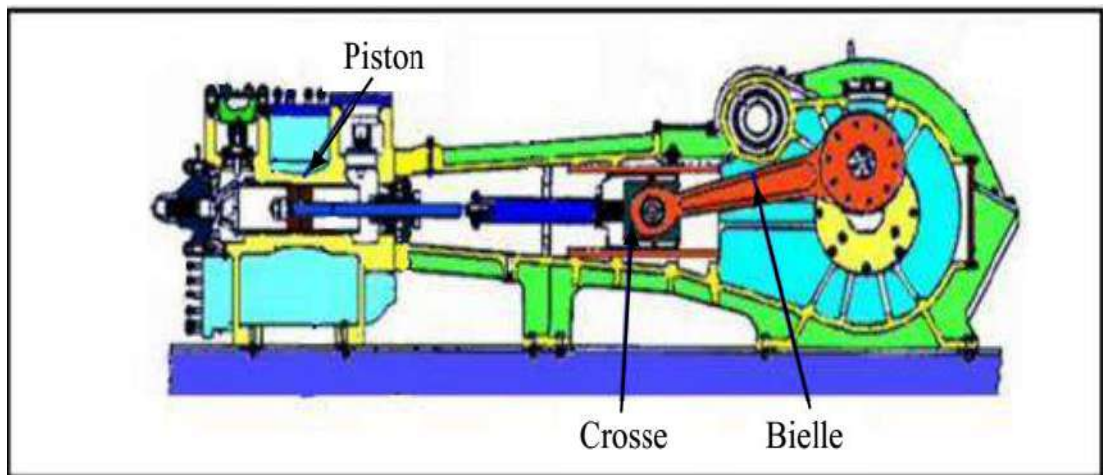


Figure 1.12 : Pompe de forage [3]

6.3.1. Cycle de la boue de forage

Le départ de ce cycle, quand le foreur démarre les pompes à boue, ces pompes aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à la tête d'injection, cette dernière reliant la tige carrée au moufle, on injecte la boue de forage à l'intérieur des tiges. Elle débouche de l'outil par des trous aménagés dans le corps même de l'outil. Elle permet également, en remontant, d'entraîner avec elle par l'espace compris entre l'extérieur des tiges et la paroi du trou les débris de roche broyée. Ces débris sont évacués en surface sur des tamis vibrants ; la boue ainsi libérée de ces débris revient vers des bassins à boue et sera de nouveau injectée à l'intérieur des tiges.

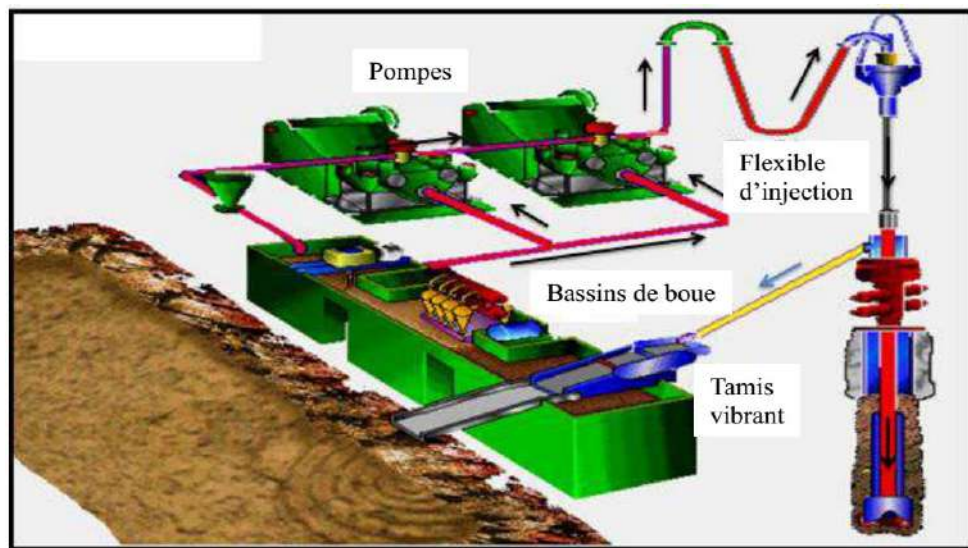


Figure 1.13 : Cycle du fluide sur le site de forage [3]

7. Répartition des équipements de l'appareil de forage

7.1. Les équipements de fond

C'est l'ensemble des outils de forage et garniture qui travaillent au-dessous de la surface et sont en général : [7]

7.1.1 .Le trépan

C'est l'outil qui assure sous l'effet du poids du train de sonde et de rotation la destruction des roches.

7.1.2. Les tiges de forage

Ce sont des tiges qui descendent le long du puits et qui transmettent le mouvement de rotation de l'outil (Trépan). Celles-ci permettent aussi le passage de la boue de forage.

7.1.3. Tiges carrées

C'est une tige installée entre la tête d'injection et les tiges de forage transmettent Le mouvement de rotation de la table de rotation au train de tige. [7]

7.2. Les Equipements de surface

Cette catégorie est répartie en plusieurs groupes mettant en œuvre l'outil de forage et assurant la sécurité du puits. [8]

7.2.1. Les équipements de levage

Ils permettent :

- le contrôle du poids sur l'outil (WOB).
- les changements d'outils (manœuvre de garnitures).
- la descente des colonnes de casing (tubage).
- les levées et les descentes du mât (DTM).

Ils sont principalement composés de :

- la structure de la tour de levage (mât et ossature).
- les moufles fixe et mobile.
- le treuil de forage.
- le crochet de levage.
- le câble de forage.
- le poste de commande et de contrôle.

7.2.2. Les équipements de rotation

Ils sont principalement composés de :

- la table de rotation.
- les fourrures.
- le carré d'entraînement.
- la tige d'entraînement.
- raccord d'usure de la tige d'entraînement.
- la tête d'injection.

7.2.3. Les équipements de pompage et de circulation :

ils sont principalement composés de :

- bacs à boue plus équipements.

- mixeurs.
- agitateur (hélico mélangeurs).
- mitrailleuses de fond et de surface (agitateurs hydrauliques).
- tamis vibrants (shak shakers).
- dessaleurs.
- mud cleaner.
- centrifugeuses.
- dégazeur.
- les Clay -jeteurs.
- les goulottes.
- les pompes à boues plus accessoires.
- soupapes de décharges (ou de sécurité).
- Les conduites d'aspiration et vannes.
- Le flexible d'injection.

Ces équipements assurent la fabrication, le pompage et la circulation ainsi le traitement mécanique des fluides de forage.

7.2.4. Les équipements de sécurité

Les équipements de sécurité sont constitués de :

- La tête du puits.
- L'accumulateur de pression.
- Le manifold de dusses.

Ils assurent la sécurité du puits en cas de venue de gaz.

7.2.5. Les équipements mécaniques

Ils fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement de la sonde de forage

On distingue :

- Les moteurs de sonde ou groupe de force.
- Les groupes électrogènes.
- Les compresseurs. . [8]

8. Conclusion

Dans cette chapitre, nous avons donné un aperçu des types et des tailles de machines de forage pétrolier, de leurs composants, et la méthode d'installation des appareille et tout qui concerne le forage pétrolier.

Chapitre II

Les effets des paramètres mécaniques sur le ROP

1. Introduction

Les entreprises pétrolières cherchent à réduire le temps à travers des modèles d'optimisations appropriés. Pour trouver un (ROP) optimal il faut tirer les meilleurs avantages que possible sur les paramètres mécaniques et hydrauliques c'est-à-dire d'avoir les paramètres optimaux. Mais ceux-ci relèvent un défi technique majeur car les paramètres du forage sont donnés et mesurés instantanément par des capteurs durant toute l'opération de forage. Ces paramètres sont nombreux, ils sont classés en deux catégories :

- Les paramètres mécaniques qui concernent le type et la forme d'outil, le poids et la vitesse de rotation.
- Les paramètres hydrauliques qui sont le débit, la pression, la nature du fluide de forage et ses caractéristiques. [10]

L'optimisation des paramètres de forage contribue à augmenter (améliorer) la vitesse d'avancement (ROP), donc un temps de forage plus réduit ce qui en résulte un prix de revient de mètre foré plus faible et ceci est le plus important objectif de l'optimisation des paramètres de forage.

Ses objectifs sont :

- ✓ Faire en sorte que l'outil de forage atteigne sa cible ;
- ✓ Augmenter la vitesse d'avancement (ROP) ;
- ✓ Augmenter la durée de vie de l'outil ;
- ✓ Minimiser la consommation de l'énergie et de la puissance. [12]

2. Les paramètres de forage

Ce sont les paramètres mécaniques et hydrauliques pouvant agir sur la vitesse de progression du forage, traduite dans le métier par le ROP (Rate of Pénétration) ainsi que sur le comportement directionnel du système de forage. L'optimisation du ROP est l'un des aspects les plus importants dans l'économie du forage car environ la moitié du coût total du puits est directement proportionnelle au temps de forage. Augmenter le ROP, donc augmenter l'efficacité du processus de forage, permet de réduire significativement le coût de réalisation du puits. [3]

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage. Ils peuvent être classés en deux catégories :

➤ Les paramètres mécaniques :

- ✓ Poids sur l'outil.
- ✓ Vitesse de rotation.
- ✓ La nature de la roche.

➤ Les paramètres hydrauliques :

- ✓ Débit ;
- ✓ Nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité et filtrat).

Pour obtenir une bonne performance, il faut réagir avec les deux types de paramètres de forage ; les paramètres mécaniques (WOB et RPM) et les paramètres hydrauliques (FLW et les caractéristiques de la boue).

2.1. 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 :

2.1.1. Vitesse d'avancement (ROP)

La vitesse d'avancement des trépan est fonction de la nature des terrains et varie de 1 à 2 m par heure dans les terrains durs à 30 m par heure et plus dans les terrains tendres. La durée de vie des tricônes à molettes dentées est de l'ordre de 40 heures ; le travail du trépan a pour conséquences: une usure des dents qui peut aller jusqu'à disparition complète. Une usure des roulements qui peut causer la perte d'une molette au fond du trou ; une perte de diamètre dans les terrains abrasifs. Pour améliorer la durée de vie des tricônes, les paliers des molettes sont lubrifiés et éventuellement lisses. Dans ce cas, la durée de vie de l'outil peut dépasser 150 heures. [5]

2.1.2. Le type des outils de forage

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. [11]

2.1.2.1. Les outils à molettes

Le tricône (outil à 3 molettes) est le plus utilisé dans le domaine de forage pétrolier. Les éléments de coupe font partie de la molette, ils ce sont :

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

Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures, là où les outils à dents ne pouvaient forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible. Les picots de carbure et les paliers de friction ont permis d'appliquer des poids de plus en plus importants sur l'outil et d'augmenter la durée de vie des outils dans les formations dures (la durée de vie de ces outils est pratiquement trois fois plus longue que celle des outils à dents et à roulements à rouleaux).

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du type de 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 et plus courts, des roulements plus gros et des corps plus solides. [9]

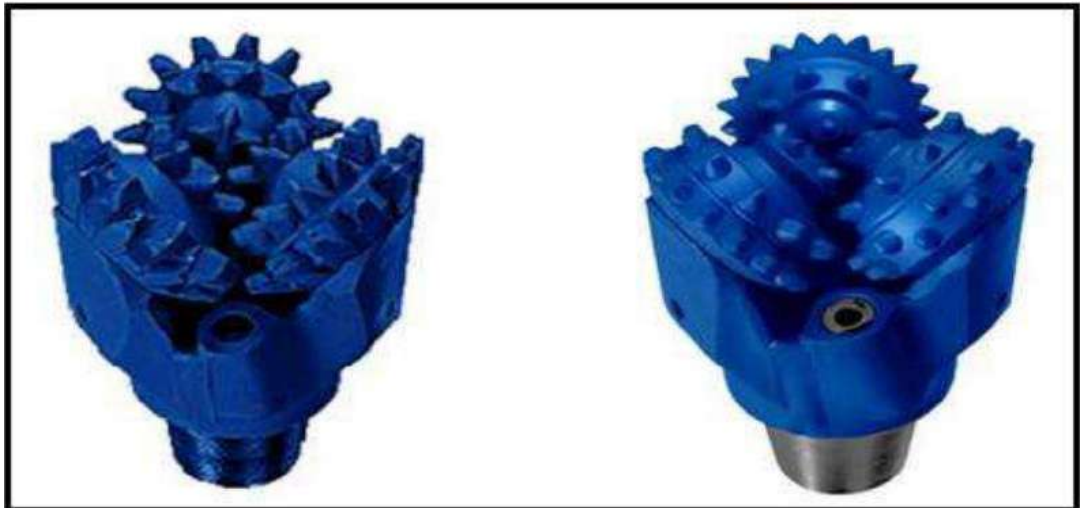


Figure 2.1: *Les outils à molettes.* [3]

2.1.2.1.1. Les dents

Les outils à dents acier sont utilisés en début de trou, dans les formations tendres, avec de grandes vitesses de rotation, ainsi que dans les zones où l'épaisseur des couches rend les outils à picots non économiques.

Les dents de la rangée de talon ont des profils de crête adaptés aux formations à forer; le but étant de limiter leur usure et ainsi de réduire la perte de diamètre de l'outil.

Les outils pour formations tendres sont conçus avec des dents longues, largement espacées, de façon à favoriser la pénétration dans le terrain et l'arrachement de fragments plus importants. Les dents des outils pour ce type de formation peuvent être conçues pour s'auto affûter en s'usant. Cela est réalisé en rechargeant seulement un côté de la dent.

Les outils pour formations moyennes et mi-dures présentent des dents plus rapprochées. La dent a également des angles légèrement plus grands pour supporter la charge nécessaire pour vaincre la résistance de la formation.

Les formations dures ont de fortes résistances à la compression et sont habituellement très abrasives. Les outils conçus pour forer ces formations sont munis de dents solides et peu espacées ainsi que des cônes de molette épais de manière à supporter des poids importants. [9]

2.1.2.1.2. Les picots de carbure

L'outil à picots (insert bit) de carbure de tungstène fut initialement conçu pour forer les formations très dures et abrasives composées de silice ou de quartzite qui, du fait de la durée de vie relativement courte des outils à dents, se révélaient très onéreuses à forer.

Les picots cylindriques en carbure de tungstène fritté sont sertis dans des trous usinés dans les cônes. Cet assemblage donne une structure de coupe présentant une grande résistance à l'usure par abrasion ainsi qu'aux efforts de compression.

Grâce aux progrès de la métallurgie, différentes formes de picots sont actuellement disponibles, ce qui permet d'utiliser ce type d'outil pratiquement dans tous les types de terrain.

- La forme ovoïde est la plus résistante et est dessinée pour l'action d'écrasement et d'éclatement nécessaire au forage des formations très dures.
- Les ogives présentent un peu plus de proéminence pour forer des formations un peu plus tendres.
- Le cône est également un profil solide convenant parfaitement à une action de forage du type écrasement et éclatement. Il est utilisé avec une action de raclage pour le forage des formations mi-dures. [9]

2.1.2.2. Les outils diamants

2.1.2.2.1. Les outils à diamant naturelle

Ils proviennent de mines et les pierres employées pour la fabrication des outils de forage sont des diamants industriels de très bonne qualité. Des pierres de différentes structure et forme sont utilisées.

Le diamant est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80000 bar (carbure de tungstène : 50000 ; acier : 15000). Son point de fusion est très élevé (3650°C). Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0.2 gramme). [3]

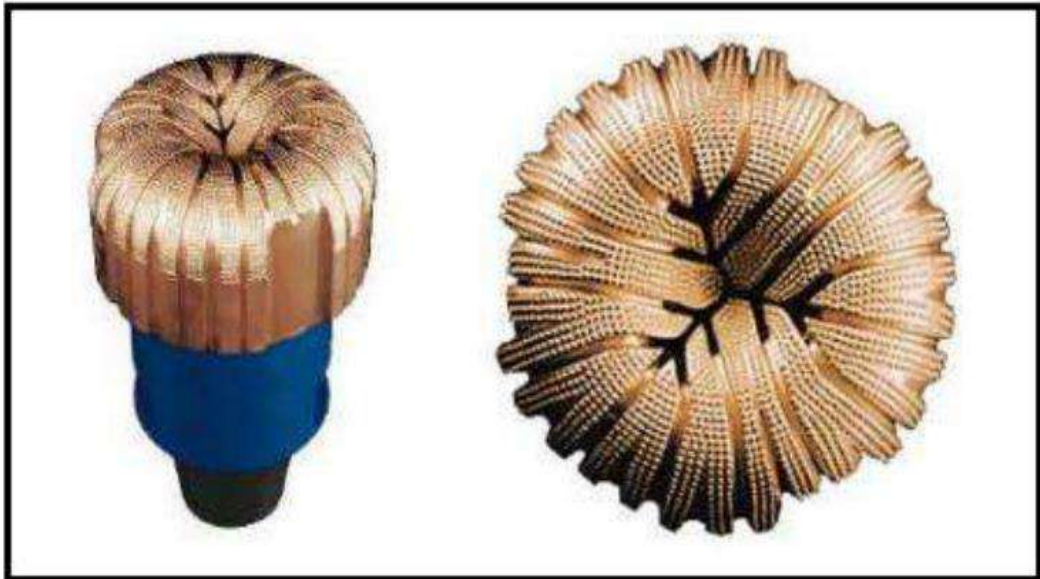


Figure 2.2 : *Outil à diamant naturel* [3]

2.1.2.2.2. Les outils PDC (Polycrystalline Diamond Compact)

Les outils à Poly cristalline Diamant Compact sont des outils à pastilles de diamant poly cristallin existent soit avec corps acier, soit avec une 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.

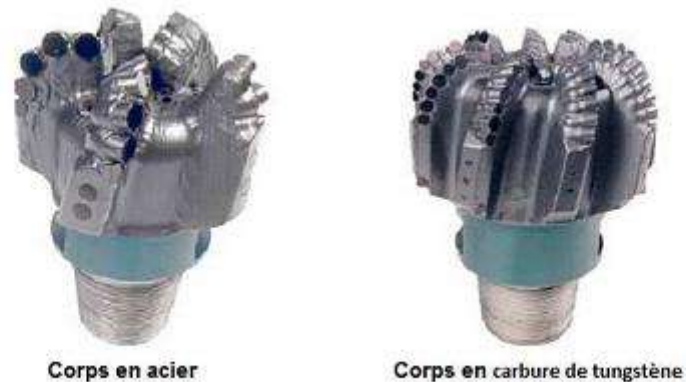


Figure 2.3 : *Types des outils PDC* [14]

C'est General Electric qui a mis au point la synthèse de ces pastilles diamantées constituées d'un dépôt de quelques dixièmes de millimètres 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. [14]

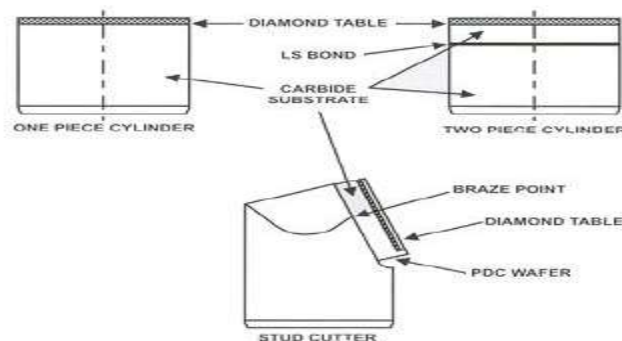


Figure 2.4: *structures des PDC* [14]

2.1.2.2.1. Mode de travail des outils PDC

Les outils PDC forent en coupant la formation par cisaillement.

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 de tungstène qui est directement derrière la couche de diamant s'use plus rapidement que le diamant du poly cristalline, dû à sa résistance à l'abrasion plus faible. Cela a pour résultat la formation d'une lèvre de diamant qui reste tranchant durant la vie du PDC, cet effet est appelé auto-affûtage des cutters PDC. Par conséquent les outils PDC maintiennent une vitesse d'avancement relativement élevée dans l'intervalle total foré. [14]

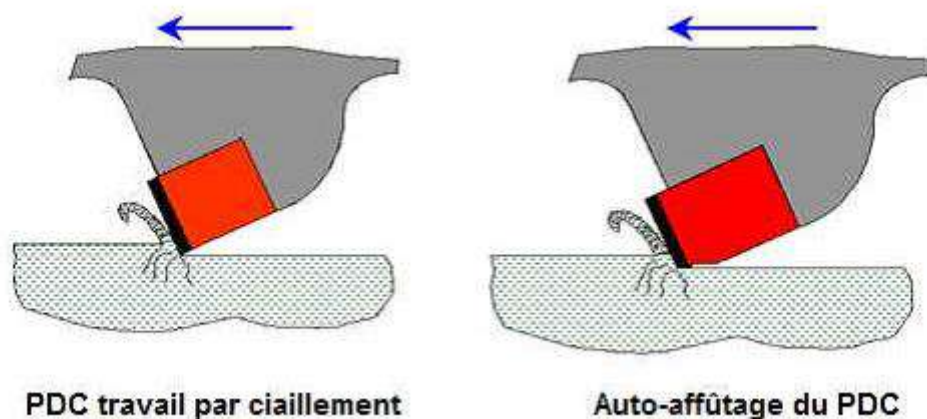


Figure 2.5: mode de travail d'un PDC [14]

2.1.2.2.3. Les outils TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Contrairement au PDC les TSP ont subi un traitement thermique pour éliminer les éléments incompatibles d'un point de vue dilatation thermique ils pourront donc supporter des températures de fabrication d'une matrice carbure. Leur forme triangulaire présente des arêtes agressives pour le cisaillement de la roche. Leur utilisation est souvent associée à l'action de diamants naturels. [3]

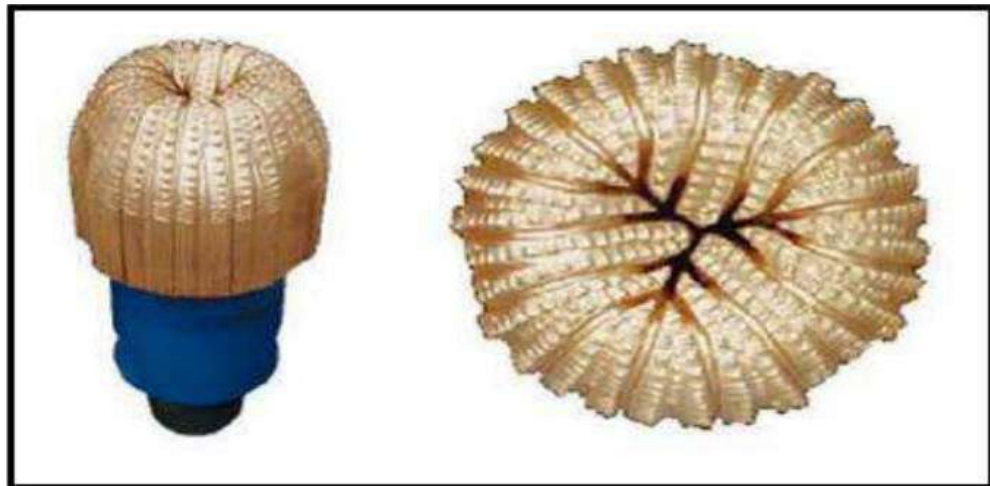


Figure 2.6 : *Les Outils TSP* [3]

2.1.2.2.4. Les outils imprégnés

Le corps est composé d'une matrice en carbure de tungstène imprégné de diamants synthétiques à l'intérieur. La structure abrasive est résistante aux hautes pressions et températures, et par conséquent ces outils sont utilisés dans les formations très dures à faible formabilité et haute abrasivité, Au fur et à mesure de l'usure de la matrice, les diamants exposés se déchaussent et de nouveaux taillants apparaissent.

En raison de la petite taille des diamants synthétiques imprégnés, la vitesse d'avancement obtenu par cet outil est très faible. [9]



Figure 2.7 : *Les Outils imprégnés* [3]

2.1.3. Le poids sur l'outil (WOB, Weight On Bit)

Il correspond à la force appliquée par la garniture sur l'outil de forage suivant son axe de révolution pour qu'il puisse pénétrer la roche. C'est en fait la différence entre le poids au crochet outil suspendu et outil posé sur le front de taille. Cette valeur dépend du type d'outil et de la trajectoire du puits. Des différences entre la valeur effective du poids sur l'outil et sa valeur mesurée en surface peuvent être enregistrées lorsque des frottements interviennent notamment dans le cas du forage dévié. [1]

2.1.4. Vitesse de rotation ou RPM (révolution per minute)

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 croît en proportion directe de la vitesse de rotation dans les terrains tendres, mais pas dans les terrains durs. Pour ces derniers, il existe une vitesse optimum au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus. Cette vitesse maximale de rotation décroît à mesure que la dureté de la formation augmente et la vitesse optimale de rotation décroît quand on augmente le poids sur l'outil. [10]

2.1.5. La nature de la roche

La notion de dureté d'une roche, sur un chantier de forage, traduit en fait pour l'opérateur la résistance que celle-ci offre à l'avancement de l'outil et ceci de façon tout à fait empirique.

Il existe cependant une définition de la dureté des roches : celle de l'échelle de MOHS, telle que chaque minéral de roche soit rayé par le minéral de roche de degré supérieur. Dans cette échelle, quartz qui est l'une des roches les plus dures que l'on rencontre effectivement dans les forages, a le degré de dureté 7 alors que le diamant a le degré le plus élevé égal à 10.

La dureté suivant MOHS traduit une résistance de la roche à la pénétration, par rayage. Il est rare qu'un outil réel détruise la roche uniquement par rayage (sauf parfois avec l'emploi d'outils diamant). Il est rare également qu'une roche soit

pratiquement composée d'un seul minéral, la notion de rayage devient beaucoup plus compliquée dans le cas de roches constituées des plusieurs minéraux de dureté différentes.

La dureté d'une roche suivant MOHS ne peut pas donc traduire la résistance à la pénétration d'un outil, par contre la dureté MOHS d'un minéral de roche a une influence directe sur l'effet abrasif de la roche sur l'outil. [14]

2.2. Les paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques sont tous les facteurs liés au fluide de forage tel que : le débit, la pression, type du fluide de forage et les caractéristiques du fluide forage (densité, viscosité) qui jouent les rôles de lubrification, refroidissement et le nettoyage du fond par conséquent ils affectent sur la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil.

2.2.1. 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 forme et diamètre équivalent des déblais, régime d'écoulement du fluide et la quantité de la sédimentation, paramètre rhéologie du fluide. Donc le débit a une influence sur l'avancement mais jusqu'à une certaine valeur limite selon la formation traversée au de-là de laquelle il risque au contraire d'être nuisible par la formation de caves et d'érosion des parois au droit des masse tige. [10]

2.2.2. 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.. [11]

2.2.3. 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 forer, on sera exposé à d'énormes problèmes qui résultent soit de sa composition (contamination), soit de ses caractéristiques (pertes et venues). [11]

2.2.4. Caractéristiques du fluide du forage

2.2.4.1. Densité

La densité est l'une des facteurs de boue agissant sur le transport des cuttings puisqu'elle représente la capacité de soulever le déblais du fond vers la surface qu'on peut le modifier selon les circonstances sans pour autant dépasser certaines limites afin d'assurer un bon nettoyage du fond.

2.2.4.2. Viscosité

Des essais ont mis en évidence l'influence néfaste de la viscosité 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 aider à la destruction de la formation. [10]

3. Influence des paramètres mécanique sur la vitesse d'avancement

La manière classique pour déterminer comment la ROP répond au changement de WOB et/ou RPM est de réaliser un test de formabilité, le test est réalisé en changeant un paramètre, WOB ou RPM, tout en gardant l'autre constante, la ROP mesurée est ainsi tracée contre le paramètre qui a été changés.

3.1. Le poids sur l'outil

La figure ci-dessous montre, pour un débit et une vitesse de rotation donnés, la variation de la vitesse d'avancement en fonction du poids appliqué sur l'outil et de la dureté de la formation.

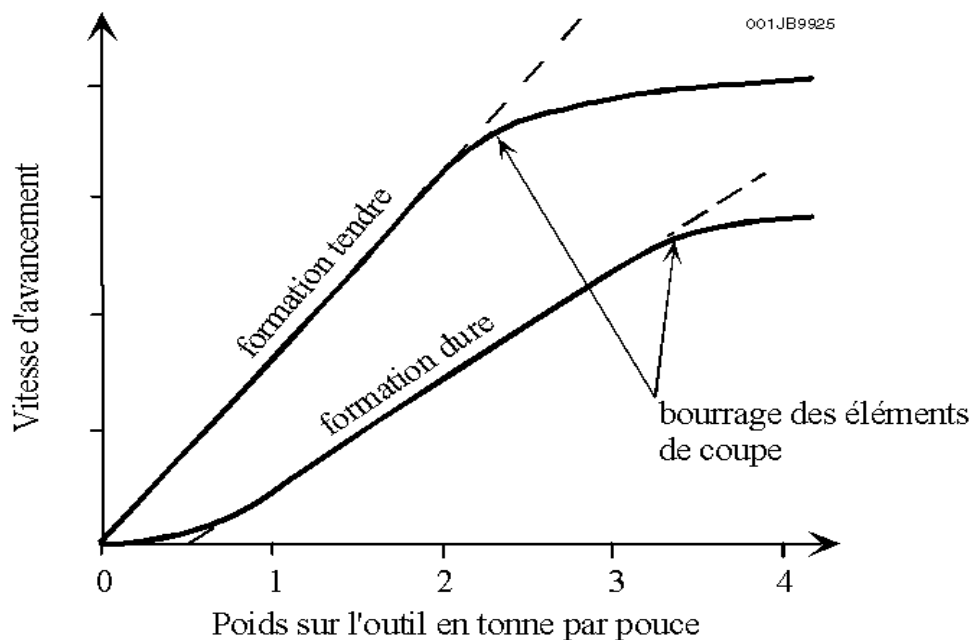


Figure .28 : Effet du poids sur la vitesse d'avancement. [12]

On constate sur cette figure que :

Dans une certaine gamme de poids, l'augmentation de la vitesse d'avancement est proportionnelle à l'augmentation du poids. A partir d'une certaine valeur de poids, l'augmentation de la vitesse d'avancement diminue rapidement et devient quasiment nulle (environ 2 k N pour les formations tendres et 3 pour les formations dures).

La raison de cette très faible variation de la vitesse d'avancement, lorsque le poids devient important, peut être due au fait que :

- Le débit n'est pas suffisant pour évacuer tous les déblais du front de taille, les déblais non éliminés sont broyés de nouveau diminuant l'efficacité des éléments de coupe. Si la quantité de déblais produite est supérieure à la quantité évacuée, il se produit un bourrage de l'outil.
- Les éléments de coupe pénètrent complètement dans la formation (roche plus lit de déblais), il se produit un bourrage des éléments de coupe.

Suivant la dureté de la formation, l'allure de la courbe varie lorsque le poids appliqué est faible :

- Dans un terrain tendre, l'outil avance dès que l'on applique du poids (si la formation est suffisamment tendre et/ou peu consolidée et le débit élevé, on obtient un avancement sans appliquer de poids sur l'outil).
- Dans un terrain dur, il faut appliquer un certain poids pour que l'outil avance. Le seuil se trouve aux environs de 0,5 k N par pouce d'outil.

L'augmentation du poids a plus d'effet sur les formations tendres que sur les formations dures (pente de variation de la vitesse d'avancement plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

Le poids, que l'on peut appliquer sur l'outil, est fonction de la garniture de forage utilisée et du profil du puits (dans les puits faiblement déviés, le poids sur l'outil est obtenu en mettant les masse-tiges en compression ; dans les puits horizontaux, le poids est obtenu en mettant les tiges en compression). Le poids appliqué va agir sur la durée de vie de l'outil.

Le poids appliqué sur l'outil a une influence sur la trajectoire du puits, il modifie la position des points de contact entre la garniture et la paroi du trou. Il sera généralement nécessaire de contrôler ce poids pour réaliser la trajectoire désirée. [12]

3.2. La vitesse de rotation

La figure ci-dessous montre, pour un débit et un poids sur l'outil donnés, la variation de la vitesse d'avancement en fonction de la vitesse de rotation.

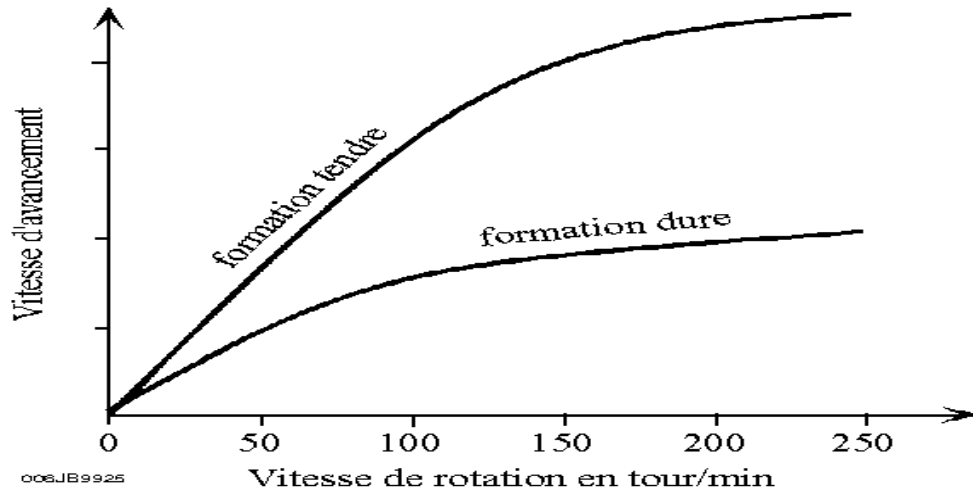


Figure 2.9 : Effet de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement. [12]

On constate sur cette figure que :

Dans une certaine gamme de vitesse de rotation, l'augmentation de la vitesse d'avancement est proportionnelle à l'augmentation de la vitesse de rotation. A partir d'une certaine valeur de la vitesse de rotation, l'augmentation de la vitesse d'avancement diminue fortement et devient quasiment nulle (environ 100 tr/min pour les formations dures et 200 pour les formations tendres).

La raison de cette faible augmentation de l'avancement, lorsque la vitesse de rotation devient relativement importante, le temps entre les impacts des éléments de coupe sur la roche est de plus en plus court. Ce temps devient insuffisant pour permettre aux éléments de coupe de pénétrer suffisamment dans la formation, de la fissurer (ce dernier point est supporté par le fait que l'augmentation de la vitesse de rotation produit une diminution du couple à l'outil) et pour évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille.

Contrairement au poids, il n'existe pas de seuil de vitesse pour les formations dures, l'outil avance dès qu'il commence à tourner.

L'augmentation de la vitesse de rotation a beaucoup plus d'effet sur les formations tendres que sur les formations dures (pente de variation de la vitesse d'avancement plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

La vitesse de rotation joue sur la durée de vie de l'outil (usure des roulements) et sur la trajectoire du puits. [12]

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous décrivons les paramètres de forage mécaniques et hydrauliques et mentionnons les différents types d'outils de forage avec le concept de la façon dont les paramètres mécaniques qu'affectent sur la vitesse de progression.

Chapitre III

L'optimisation des processus de forage

1 .INTRODUCTION

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $y=f(x_i)$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimentale celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées. [17]

2. Objectif des plans d'expérience dans l'optimisation

L'objectif principal des plans d'expérience peut être résumé par la devise: "obtenir un maximum d'information en un minimum d'expériences". Une autre vision du problème est la recherche de variations simultanées pour toutes les variables contrôlées afin, une nouvelle fois, d'extraire un maximum d'information en un minimum d'essais. Une telle problématique est primordiale dans le milieu industriel où minimiser le nombre d'expériences ` réaliser est synonyme de gain de temps et de productivité. Réaliser des productions de la meilleure qualité possible au coût le plus bas est de plus une quête universelle pour tous les fabricants. [16]

3. Méthodes composites centré (RSM)

3.1. Définition

Les plans composites centrés font appel à la méthodologie des surfaces de réponses, leur construction consiste à ajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ils sont cependant assez "gourmands" en termes de nombre d'essais par rapport à d'autres types de plans mais ce nombre reste raisonnable lorsque le nombre de facteurs étudiés est faible (entre 2 et 4). Le nombre d'expériences dans un plan composite centré est donné par la relation suivante :

$$N = 2^k + 2K + n_0 \quad (I)$$

Où k est le nombre de facteurs d'entrée. Un plan composite centré se décompose en somme de trois quantités :

- Un plan factoriel complet 2^k .
- Deux points en étoile par facteur qui sont positionnés sur les axes de chacun de ceux-ci à une distance α du centre du domaine, nous verrons par la suite que: $\alpha = 4\sqrt{2^k}$. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.
- n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique. Dans le cas où les expériences sont des simulations numériques, le nombre de répétitions au centre du domaine expérimental est égal à 1 (pas d'erreur expérimentale). [15]

3.2. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 3.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

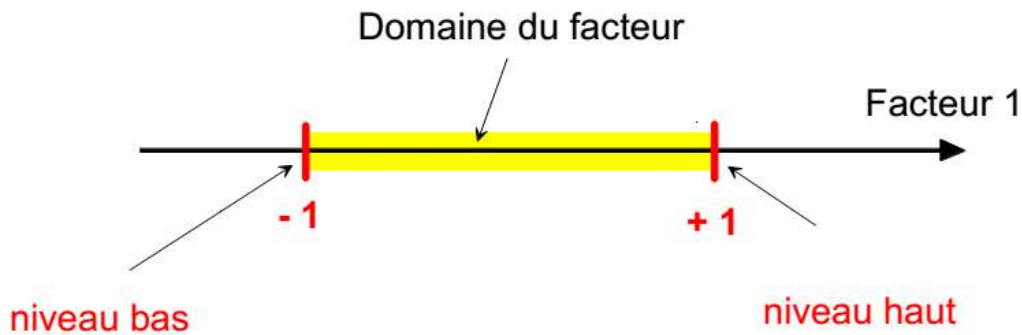


Figure .31: Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par $+1$. [17]

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure 3.2).



Figure .32: l'espace expérimental. [17]

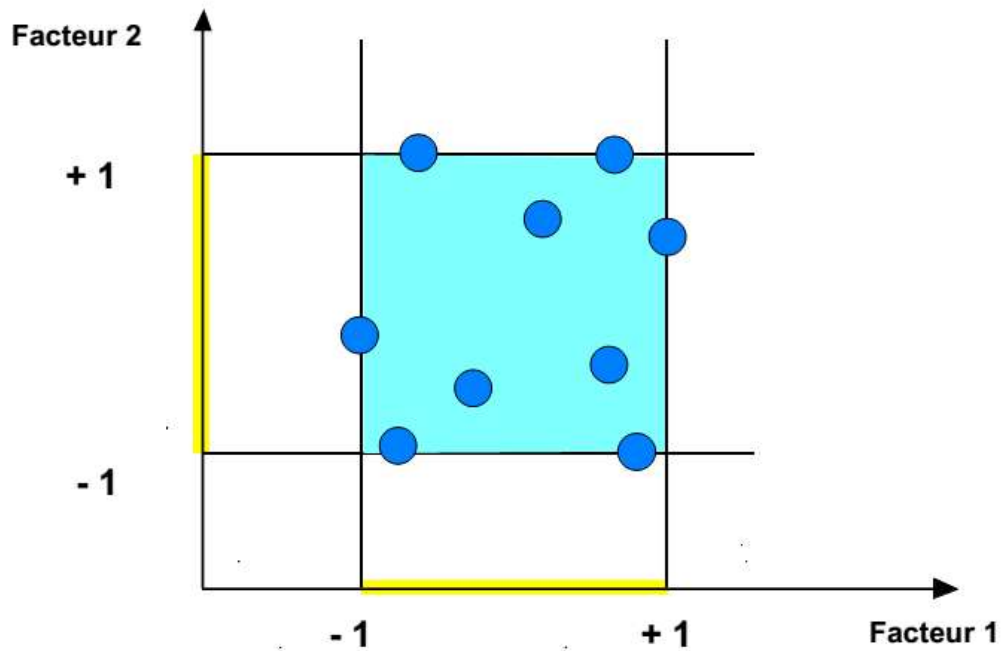


Figure .33: *Les points expérimentaux* [17]

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure 3.3). Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude. [17]

3.3. Principe

Un plan composite est constitué de trois parties :

- Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
- Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
- Des points axiaux. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs.

La Figure 3.4 représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan 2^2 . Le point E est le point central. Ce point peut avoir été répliqué une ou plusieurs fois. Les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle le plan en étoile. On réalise 9 essais et 6 coefficients doivent être déterminés. Il faut donc résoudre un système de 9 équations à 6 inconnues.

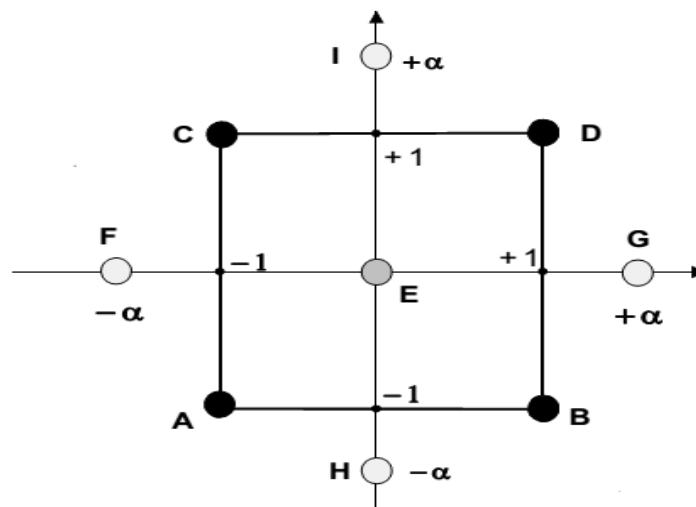


Figure 3.4: Plan composite pour deux facteurs.

Les coordonnées des points en étoile dépendent du critère d'optimalité choisi. En général, on retient le critère de presque orthogonalité ou le critère d'iso variance par rotation.

Les plans composites prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont insuffisamment expliqués par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondant aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de

toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à une acquisition progressive des résultats. [17]

3.4. Avantages de la méthode

- Méthode a cout raisonnable
- Bonne propriété statistique (estimation)

4. Matériel

4.1. Expérimentation

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un appareil de forage qui présente des caractéristiques similaires à une foreuse rotative. Les caractéristiques de l'appareil de forage sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 1:caractéristiques de l'appareil de forage.

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

Dans cette expérience nous avons utilisé deux types de roches calcaires. Une roche dure dont sa Résistance à la compression est $RC = 1550 \text{ kg/cm}^2$, et une roche tender avec une Résistance à la compression de $RC= 640 \text{ kg/cm}^2$.

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 2 : Les valeurs choisies pour chaque paramètre d'études

Paramètre	Unité	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
WOB	kgf	80	120	160
RPM	tr/min	118	135	152

5. Application de la méthode

5.1. Traitement des données

Le nombre d'expériences dans un plan composite centré : $N = 2^k + 2K + n_0$ (II)

$N=2^2+2(2) +5=13$ essais (III)

Les résultats des essais qui donnent les valeurs de la réponse ROP1 et ROP2 selon la méthode composite centrée en utilisant le logiciel DESIGN EXPERT11, sont montrées sur les tableaux 3 et 4

5.1.1 Pour une roche dure (RC = 1550 kg/cm²)

Tableau 3 : présentation des valeurs de la réponse ROP1

	Factor 1	Factor 2	Response 1
	A:wob	B:rpm	rop
	kgf	tr/mn	mm/s
1	160	118	1.61
2	120	135	1.71
3	63.4315	135	0.79
4	120	159.042	1.86
5	120	110.958	1.58
6	80	152	1.13
7	80	118	0.85
8	160	152	2.18
9	120	135	1.71
10	120	135	1.71
11	120	135	1.71
12	120	135	1.71
13	176.569	135	1.91

5.1.2 Pour une roche tender (RC= 640 kg/cm²)

Tableau4 : présentation des valeurs de la réponse ROP2.

	Factor 1	Factor 2	Response 1
	A:WOB	B:RPM	ROP
	kgf	tr/min	mm/s
1	63.4315	135	1.32
2	160	118	1.34
3	120	135	1.88
4	120	135	1.88
5	80	152	2.02
6	176.569	135	3.61
7	120	135	1.88
8	120	110.958	1.39
9	120	135	1.88
10	80	118	0.96
11	160	152	3.48
12	120	159.042	2.92
13	120	135	1.88

5.2. Analyse statistique des données

L'analyse statistique des données est se fait par l'approche ANOVA (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : Analysais Of Variance) qui base sur l'analyse de la variance.

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le modèle proposé, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value d'ANOVA [15].

5.2.1 Réponse 1 (ROP1) pour une roche dure (RC = 1550 kg/cm²)

Tableau5: les résultats de traitement statistique des données pour ROP1.

Source	Somme des carrés	df	Moyen des Carré	p-value	
Model	1.94	5	0.3885	< 0.0001	signifiant
A-WOB	1.44	1	1.44	< 0.0001	signifiant
B-RPM	0.1941	1	0.1941	0.0012	signifiant
AB	0.0210	1	0.0210	0.1276	
A ²	0.2870	1	0.2870	0.0004	signifiant
B ²	0.0023	1	0.0023	0.5866	
Résiduel	0.0493	7	0.0070		
Manque d'ajustement	0.0493	3	0.0164		
Pure Erreur	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	1.99	12			

Les p-valeurs inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A(WOB), B(RPM), A²(WOB²) sont des termes de modèle significatifs c.à.d. sont les facteurs qui ont un impact plus important sur la réponse ROP1. Les valeurs supérieures à 0,1000 indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs,

5.2.2 Réponse 2 (ROP2) pour une roche tender (RC= 640 kg/cm²)**Tableau6:** les résultats de traitement statistique des données pour ROP2

Source	Somme des carrés	df	Moyen des Carré	p-value	
Model	7.40	5	1.48	0.0010	signifiant
A-WOB	3.22	1	3.22	0.0006	signifiant
B-RPM	3.60	1	3.60	0.0004	signifiant
AB	0.2916	1	0.2916	0.1168	
A ²	0.2853	1	0.2853	0.1202	
B ²	0.0157	1	0.0157	0.6906	
Résiduel	0.6379	7	0.0911		
Manque d'ajustement	0.6379	3	0.2126		
Pure Erreur	0.0000	4	0.0000		
Cor Total	8.04	12			

D'après le tableau6 les p-valeurs inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A(WOB), B(RPM) sont des termes de modèle significatifs. Les valeurs supérieures à 0,1000 (AB), A², B² indiquent que les termes du modèle ne sont pas significatifs.

Statistiques d'ajustement ROP1

Tableau7 : Statistiques d'ajustement pour ROP 1

R²	0.9753
Ajusté R²	0.9576
Prédite R²	0.8241
C.V. %	5.33

Statistiques d'ajustement ROP2

Tableau8 : Statistiques d'ajustement pour ROP 2

R²	0.9206
Ajusté R²	0.8640
Prédite R²	0.4356
C.V. %	14.84

R^2 est la valeur du coefficient de corrélation linéaire multiple (R^2). R^2 est un facteur indiquant que le modèle est adéquat, plus R^2 est proche de 1, plus le modèle est meilleur, D'après le résultat dans les tableaux 7 et 8 que nous avons pour ROP1 $R^2=0.9753$ et pour ROP2 $R^2=0.9206$, cela indique que l'expérience a donné bons résultats.

D'après le tableau7 Le prédit de $R^2= 0,8241$ est en accord raisonnable avec le ajusté R^2 de 0,9576; c'est-à-dire que la différence est inférieure à 0,2.

D'après le tableau8 Le prédit $R^2= 0,4356$ n'est pas aussi proche du ajusté $R^2= 0,8640$ que l'on pourrait normalement s'y attendre ; c'est-à-dire que la différence est supérieure à 0,2. Cela peut indiquer un effet de bloc important ou un problème possible avec le modèle et / ou vos données.

C.V est coefficient de variation, plus le coefficient CV inférieure de 10 plus le résultat est adéquat, d'après le tableau7 le $CV=5.33$ indique a bon résultat et le tableau8 le $CV= 14.84$ indique ne pas adéquat

5.3. 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 :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 \quad (\text{IV})$$

Y : est la réponse (ROP).

$x_1; x_2$: Sont les valeurs des paramètres

$a_0; a_1; a_2; a_3; a_4$: sont les coefficients du modèle mathématique

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

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{a} + \mathbf{e} \quad (\text{V})$$

Y : est le vecteur des réponses.

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

a : est le vecteur des coefficients.

e : est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a p équations et $p + 1$ inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note : \hat{a} [18]

Le résultat de ce calcul est :

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}' \mathbf{y} \quad (\text{VI})$$

Formule dans laquelle la matrice \mathbf{X}' est la matrice transposée de \mathbf{X} . Le logiciel DESIGN EXPERT11 exécute ce calcul et donne directement les valeurs des coefficients comme dans les tableaux suivant.

5.4 Coefficients en termes des Paramètres codés

Les coefficients du model développé ont été calculées à l'aide du logiciel pour les réponses ROP1 et ROP2, sont classées sur les tableaux suivants :

Pour le ROP1

Tableau9 : les valeurs des coefficients pour ROP1.

Paramètre	Coefficient Estimation	df	Standard Erreur	95% CI min	95% CI max	VIF
Intercepter	1.71	1	0.0375	1.62	1.80	
A-WOB	0.4242	1	0.0297	0.3541	0.4944	1.0000
B-RPM	0.1557	1	0.0297	0.0856	0.2259	1.0000
AB	0.0725	1	0.0419	-0.0267	0.1717	1.0000
A ²	-0.2031	1	0.0318	-0.2783	-0.1279	1.02
B ²	-0.0181	1	0.0318	-0.0933	0.0571	1.02

Pour le ROP2

Tableau10 : les valeurs des coefficients pour ROP2.

Paramètre	Coefficient Estimation	df	Standard erreur	95% CI min	95% CI max	VIF
intercepter	1.88	1	0.1350	1.56	2.20	
A-WOB	0.6348	1	0.1067	0.3824	0.8872	1.0000
B-RPM	0.6705	1	0.1067	0.4181	0.9228	1.0000
AB	0.2700	1	0.1509	-0.0869	0.6269	1.0000
A ²	0.2025	1	0.1145	-0.0681	0.4731	1.02
B ²	0.0475	1	0.1145	-0.2231	0.3181	1.02

L'estimation du coefficient représente le changement attendu de la réponse par unité de changement de la valeur du facteur lorsque tous les facteurs restants sont maintenus constants. L'interception dans un plan orthogonal est la réponse moyenne globale de toutes les analyses. Les coefficients sont des ajustements autour de cette moyenne en fonction des paramètres de facteur.

VIF (variance inflation factor) il basée sur la valeur de VIF pour s'assurer qu'il n'y a pas de forte corrélation entre les variables indépendantes. Chaque fois que la valeur de VIF est supérieure à 3, alors il y a une possibilité de multiplicité linéaire, et si elle est supérieure à 10, cela confirme l'existence de multiplicité linéaire. D'après les tableaux 9 et 10 on remarque que les valeurs de VIF est inférieure à 3, ce qui indique l'absence de multiplicité linéaire entre les facteurs.

5.5 Équation finale en termes des facteurs réels

Les modèles mathématiques réels pour la progression ROP1 et ROP2 sont donnés par les équations développées suivante :

$$\text{Rop1} = -2.04346 + 0.0266814 * \text{WOB} + 0.0133009 * \text{RPM} + -0.000126953 * \text{WOB}^2 \text{ (VII)}$$

$$\text{ROP2} = 5.90155 + -0.0681075 * \text{WOB} + -0.0525849 * \text{RPM} \text{ (VIII)}$$

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. Cette équation ne doit pas être utilisée pour déterminer l'impact relatif de chaque facteur car les coefficients sont mis à l'échelle pour tenir compte des unités de chaque facteur et l'intersection n'est pas au centre de l'espace de conception.

5.6 Équation finale en termes des facteurs codés

Les modèles mathématiques codés pour la progression ROP1 et ROP2 sont donnés par l'équation développée suivante :

$$\text{Rop1} = 1.71 + 0.42424 * \text{A} + 0.155747 * \text{B} + -0.203125 * \text{A}^2 \text{ (IX)}$$

$$\text{ROP2} = 1.88 + 0.634819 * \text{A} + 0.670468 * \text{B} \text{ (X)}$$

L'équation en termes de facteurs codés peut être utilisée pour faire des prédictions sur la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Par défaut, les niveaux élevés des facteurs sont codés comme +1 et les niveaux bas sont codés comme -1. L'équation codée est utile pour identifier l'impact relatif des facteurs en comparant les coefficients des facteurs.

5.7 Validation des résultats obtenus

Les figures 3.5 et 3.6 suivantes représentent le modèle qui montre les données expérimentales obtenues. La ligne droite représente la vraie réponse de ROP et les points colorés représentent les valeurs de ROP obtenues à partir de l'expérience. Les données montrent le modèle dans un bien ajusté état, plus les valeurs obtenues à partir de l'expérience sont proches de la ligne droite, plus les résultats sont précis.

Pour le ROP1

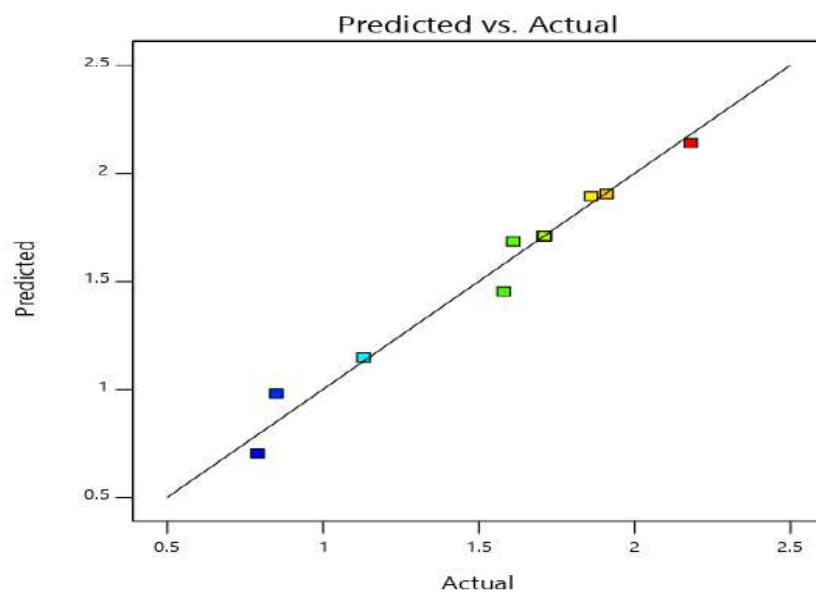


Figure 3.5: les valeurs réelles de ROP1 à propos des valeurs prédites de ROP1

On remarque sur la figure 3.5 que les points colorés sont presque appliqués à la ligne droite, ce qui indique que les résultats prédits sont proches des résultats réels.

Pour le ROP2

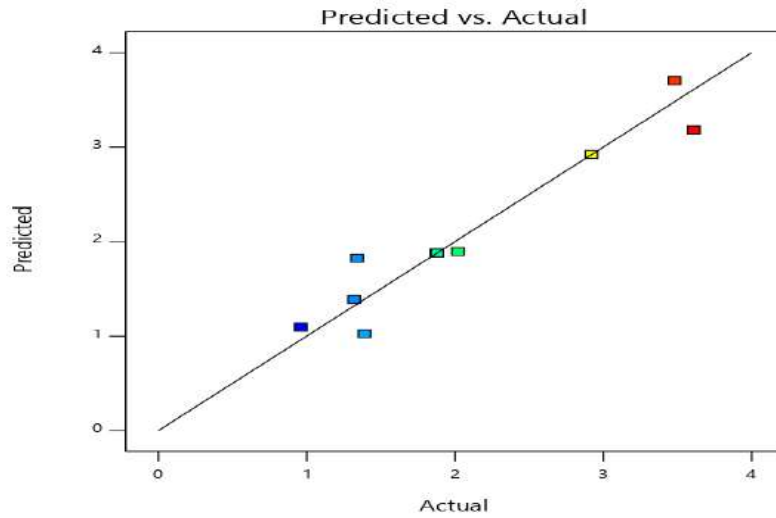


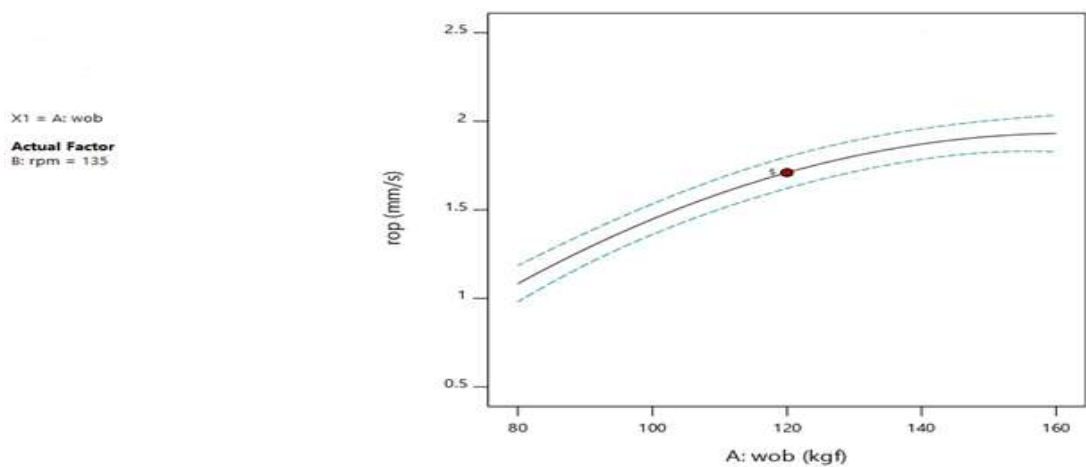
Figure 3.6: les valeurs réel de ROP2 à propos les valeurs Prédite de ROP2.

D'après les deux figures que les résultats de l'expérience de la première figure 3.5 sont plus précis que la seconde figure 3.6.

6. Influence des paramètres étudiés sur le ROP

6.1 L'effet de WOB sur le ROP1 pour une roche dure (RC = 1550 kg/cm²)

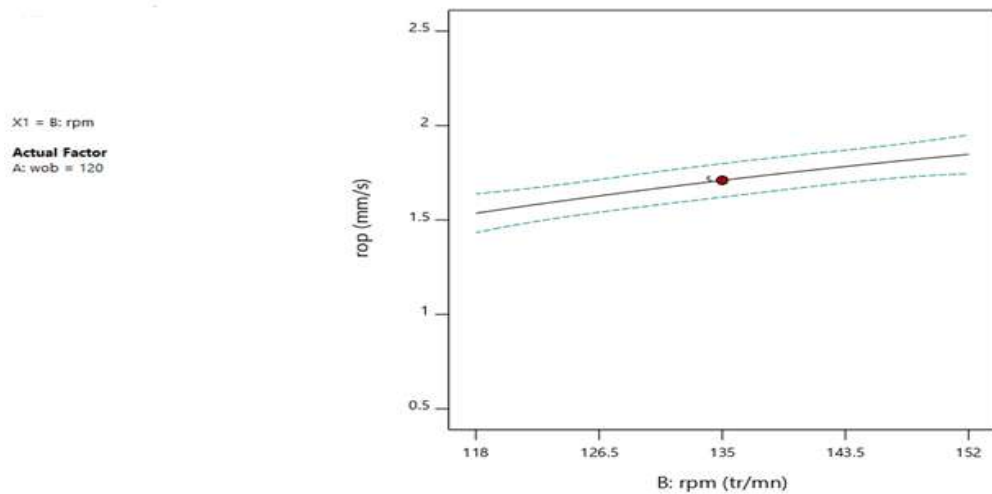
On remarque d'après la courbe que lorsque le de WOB augmente, la valeur de ROP1 augmente aussi. À la valeur de WOB= 160(kgf) la valeur de ROP est à peu près constante à la valeur 2 (mm/s).



La figure 3.7 : présente l'effet de WOB sur le ROP1.

6.2 L'effet de RPM sur le ROP1 pour une roche dure (RC = 1550 kg/cm²)

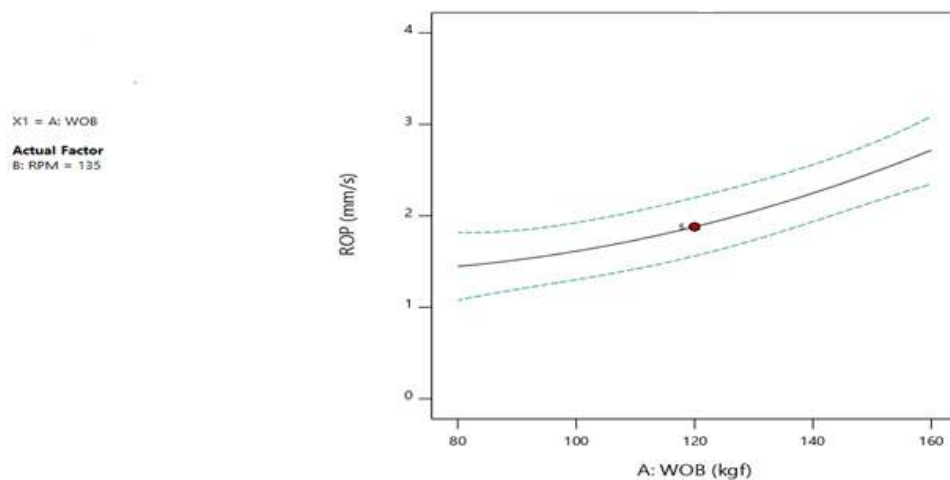
A partir de la courbe on remarque qu'à mesure que la valeur RPM augmente, l'augmentation est lente et graduelle de la valeur ROP, de sorte que de 118 à 152 (tr/mn) de RPM, le pourcentage de ROP augmente en valeur de seulement 0,5(mm/s).



La figure 3.8 : présente l'effet de RPM sur le ROP1.

6.3 L'effet de WOB sur le ROP2 pour une roche tendre (RC= 640 kg/cm²)

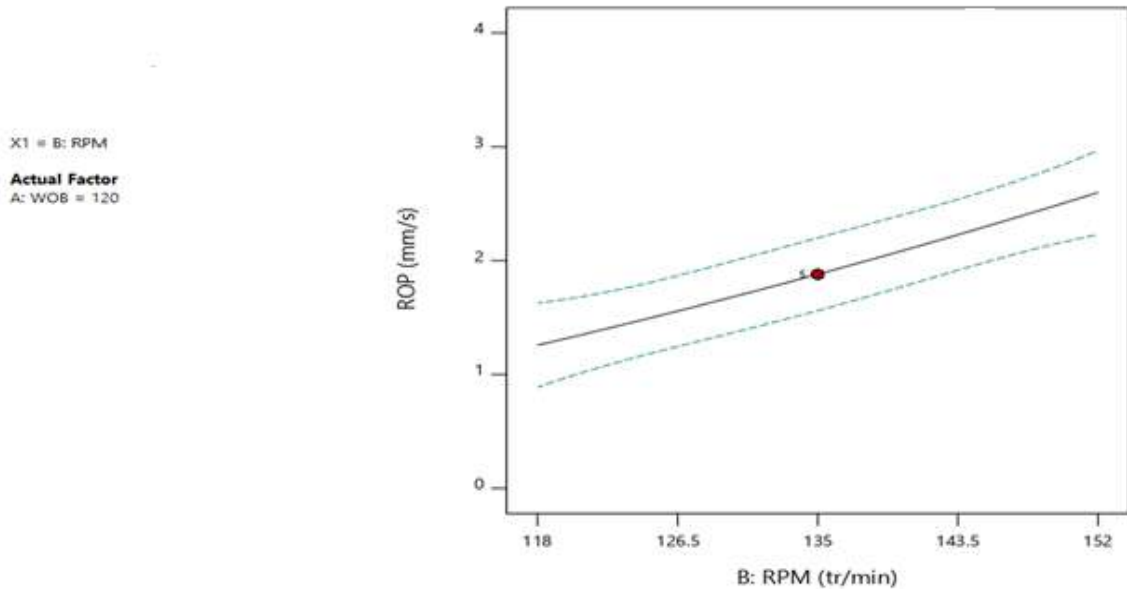
D'après la courbe on remarque que lorsque la valeur de WOB augmente il y a une augmentation assez rapide de la valeur ROP2 jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur la plus élevée d'environ ROP2= 2,8 (mm/s) à la valeur WOB =160 (kgf).



La figure 3.9 : présente l'effet de WOB sur le ROP2.

6.4 L'effet de RPM sur le ROP2 pour une roche tendre (RC= 640 kg/cm²)

D'après la courbe la valeur ROP2 augmente avec l'augmentation de la valeur RPM jusqu'à atteindre 2,8 (mm/s) à la valeur RPM=150 (tr/mn).



La figure 3.10 : présente l'effet de RPM sur le ROP2.

6.5 Les effets de WOB et RPM sur le ROP1 pour une roche dure (RC = 1550 kg/cm²)

La figure 3.11 représente les valeurs des paramètres RPM et WOB en fonctionnée de la ROP1. On remarque peut-être que lorsque la valeur de RPM augmente, elle est suivie d'une lente augmentation de la valeur de ROP. Comme pour le WOB, la valeur de ROP augmente assez rapidement avec une augmentation de la valeur de WOB jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur la plus élevée de 2,3 (mm/s) lorsque les facteurs RPM=152(tr/mn) et WOB=160(kgf).

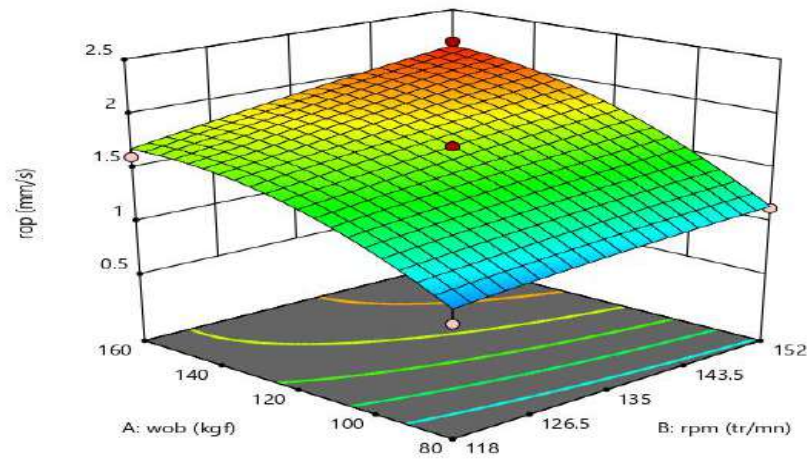


Figure 3.11 : présente l'effet de RPM et WOB sur le ROP1.

6.6 Les effets de WOB et RPM sur le ROP2 pour une roche tendre (RC= 640 kg/cm2)

La figure 3.12 représente les valeurs des paramètres RPM et WOB en fonction de ROP2. On remarque la valeur de ROP est directement proportionnelle aux valeurs des paramètres RPM et WOB jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur maximale de ROP=3,8 (mm/s) aux valeurs RPM=152 (tr/s) et WOB=160 (kgf).

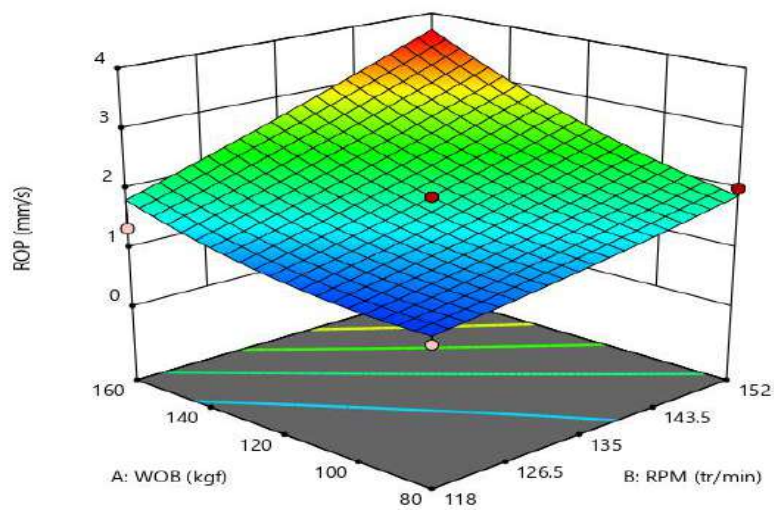


Figure 3.12 : présente l'effet de RPM et WOB sur le ROP2.

On remarque à partir de la figure .311 que cela n'a peut-être pas important d'effet sur la vitesse d'avancement ROP1 contrairement à la figure 3.12, où la valeur de ROP2 était plus importante à la valeur de ROP 1 en raison de la nature des roches. Plus la résistance des roches est faible, plus la vitesse d'avancement est élevée, c'est-à-dire que la vitesse d'avancement est inversement proportionnelle à la résistance des roches.

7. Les valeurs optimales

La dernière étape consiste à trouver les valeurs optimales pour le poids et la vitesse de rotation qui conduisent à maximiser la vitesse à l'avance. Afin de trouver le maximum d'une fonction de plusieurs variables, vous devez trouver tout point qui annule les dérivées partielles. Si nous attribuons \hat{y} la réponse attendue et les facteurs x_1, x_2 , nous obtenons le système de fonctions suivant :

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}(x_1, x_2) = 0 \quad (\text{XI})$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}(x_1, x_2) = 0 \quad (\text{XII})$$

Les solutions de ce système sont les valeurs optimales qui conduisent à maximiser le ROP1 et le ROP2. Les tableaux suivant montrent les résultats de la résolution des équations par le logiciel utilisé.

Pour le ROP1

Tableau11 : les valeurs optimales des paramètres pour le ROP1.

WOB	RPM	ROP
<i>108.724</i>	<i>124.872</i>	<i>1.487</i>

Pour le ROP2**Tableau12** : les valeurs optimales des paramètres pour le ROP2.

WOB	RPM	ROP
<i>130.364</i>	<i>133.788</i>	2.006

Nous remarquons dans les tableaux ci-dessus que la valeur de la ROP2 est plus importante à la valeur de la ROP1. La raison est due à la nature de la roche, ce qui signifie que moins la résistance des roches est faible, augmenter la vitesse d'avancement.

8. Conclusion

D'après l'analyse des données en utilisant la méthodologie des plans d'expériences, 'composite centré', basé sur l'approche ANOVA, on a obtenu le modèle mathématique qui explique la relation entre la réponse (ROP) et les paramètres d'étude. ce modèle permet de prédire avec précision les valeurs de la vitesse d'avancement (ROP), ainsi que de déterminer les points optimaux des différents paramètres (WOB, RPM, et ROP), Les résultats obtenu montre que plus la roche est tendre, la ROP est plus avancement.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de travail est rationaliser le régime de forage en améliorant le taux de pénétration et augmenter l'efficacité du forage et ainsi profit de temps et réduire les coûts.

Cette étude, basée sur l'analyse des effets de facteurs d'étude (le poids sur l'outil et la vitesse de rotation, et la nature des roches), sur le développement du taux de pénétration. L'application de la méthode 'composite centre' de plans d'expérience, permet de trouver la relation mathématique qui explique la relation entre les différents facteurs d'étude (WOB, RPM) et la réponse (ROP), ce qui nous a permis de trouver les valeurs optimales des facteurs mécaniques.

Le traitement des données à l'aide de la méthode composite centré montres la nature des roches a une plus grande influence sur le taux de pénétration, car la vitesse d'avancement dans la roche tendre est meilleure que la roche dure, Et nous avons conclu que le paramètre de WOB a un effet plus important que le paramètre de RPM sur le ROP.

Les résultats montrent que le modèle choisit est bien ajusté et par conséquent il est bien utile pour la détermination de la réponse prévue.

Références

- [1] Abdessalem BELAID, (APPLICATION A LA PREDICTION DES FROTTEMENTS GARNITURE-PUITS), doctorat, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS, 2005.
- [2] Dyhia OUMESSAOUD,(Elaboration et caractérisation d'un matériau composite en Carbure de Tungstène-Alliage utilisé dans la fabrication des outils de forage), Mémoire de master, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, 2017/2018.
- [3] GABOUSSA Boubaker et LAHLALI Mohammed Amine, (Optimisation des Paramètres Mécanique des Machines de Forage Pétrolier), Mémoire de master, UNIVERSITÉ KASDI MERBBAH OUARGLA,2018.
- [4] negadi ali, (la maintenance des équipements des forage cas tp127 Hassi Messaoud), Mémoire de master, UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen ,2014.
- [5] Bebboukha Meriem et Bouta Hadjer, (Prédiction de coincement de la garniture de forage par les techniques des fouilles des Données), Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED,2015/2016.
- [6] ABDOULAYE, (A. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier), Thèse de doctorat, ParisTech-Institut de sciences et technologies, 2010.
- [7] CHERIFI MAHFOUDH, (Etude et maintenance de treuil de forage Oil well 840 E), Mémoire de Master, UNIVERSTE HASSIBA BENBOUALIDE CHLEF, 2012.
- [8] TEMACINI Djaber, (Etude et dimensionnement d'une pompe à boue), Mémoire de Master, Université Mohamed khider – Biskra, 2019.
- [9] GHALEM Khaled (Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage.), UNIVERSITE KASDI MERBAH –OUARGLA, MAGISTER, 2014/2015.
- [10] DJELAILA Brahim Ali DADI SIDI BOUAZA Kheireddine, (OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUES DU FORAGE HORIZONTAL APPLICATION SUR LES PUITTS (MDZ491-MDZ492-MDZ501)), Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2013.

- [11] CHEFFAH SALIM, (Amélioration des paramètres mécaniques du forage horizontal), Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [12] HENKA Amir et DEGHRANE Lamine (Étude des performances de l'outil MI 813 dans la phase 121/4" dans les puits Al 82 et Al 6bis dans le champ d'Alrar), Mémoire de Master, Université M'hamed Bouguerra Boumerdes ,2010
- [13] Gilles PELFRENE, (Rôle du processus de forabilité des roches dans les vibrations de torsion des systèmes de forage pétrolier), doctorat , l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010.
- [14] NACEF Ali, “Modélisation de la Vitesse D'avancement de L'outil de Forage ” Memoire De Magister, Université M'hamed Bougara- Boumerdes, 2014/2015.
- [15] ABDERRAHIM Zakariya et HACHEMI Abdelaziz, Optimisation des paramètres géotechnique des sols par la méthode des surfaces de réponse, Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, Juin 2019.
- [16] W.Tinsson, Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques, Mathématiques et Applications 67, DOI 10.1007/978-3-642-11472-41, c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [17] Jacques GOUPY, Tutoriel, LES PLANS D'EXPERIENCES, Revue MODULAD, 2006

ANNEXE

Central Composite Design

Each numeric factor is set to 5 levels: plus and minus alpha (axial points), plus and minus 1 (factorial points) and the center point. If categorical factors are added, the central composite design will be duplicated for every combination of the categorical factor levels.

Numeric factors: 2 (2 to 50) Horizontal Enter factor ranges in terms of ± 1 levels

Categorical factors: 0 (0 to 10) Vertical Enter factor ranges in terms of alphas

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A (Numeric)	WOB	kgf	80	160	63.4315	176.569
B (Numeric)	RPM	tr/min	118	152	110.958	159.042

Type: Full Blocks: 1

Points

Non-center points: 8

Center points: 5

alpha = 1.41421 Options... 13 Runs

Move the cursor to where you want to enter text.

Cancel << Back Next >> Finish

Design Layout

Std	Run	Factor 1 A/WOB kgf	Factor 2 B/RPM tr/min	Response 1 ROP mm/s
5	1	63.4315	135	1.32
2	2	160	118	1.34
12	3	120	135	1.88
10	4	120	135	1.88
3	5	80	152	2.02
6	6	176.569	135	3.61
13	7	120	135	1.88
7	8	120	110.958	1.39
11	9	120	135	1.88
1	10	80	118	0.96
4	11	160	152	3.48
8	12	120	159.042	2.92
9	13	120	135	1.88

Move the cursor to where you want to enter text.

C:\Users\Orangee\Downloads\Documents\opt\rop2.dpx - Design-Expert 11

File Edit View Display Options Design Tools Help

Navigation Pane

- Design (Actual)
 - Information
 - Notes
 - Summary
 - Graph Columns
 - Evaluation
 - Analysis
 - R1:ROP (Analyzed)
 - Optimization
 - Numerical
 - Graphical
 - Post Analysis
 - Point Prediction
 - Confirmation
 - Coefficients Table

ANOVA for Quadratic model

Response 1: ROP

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	7.40	5	1.48	16.24	0.0010	Significant
A-WOB	3.22	1	3.22	35.38	0.0006	
B-RPM	3.60	1	3.60	39.46	0.0004	
AB	0.2916	1	0.2916	3.20	0.1168	
A ²	0.2853	1	0.2853	3.13	0.1202	
B ²	0.0157	1	0.0157	0.1722	0.6906	
Residual	0.6379	7	0.0911			
Lack of Fit	0.6379	3	0.2126			
Pure Error	0.0000	4	0.0000			
Cor Total	8.04	12				

Factor coding is Coded.
Sum of squares is Type III - Partial

The **Model F-value** of 16.24 implies the model is significant. There is only a 0.10% chance that an F-value this large could occur due to noise.

P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case A, B are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant. If there are many insignificant model terms (not counting those required to test for curvature), they may be deleted from the model.

Fit Statistics

	Std. Dev.	Mean	C.V. %	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	Adeq Precision
	0.3019	2.03	14.84	0.9206	0.8640	0.4356	13.0602

The Predicted R² of 0.4356 is not as close to the Adjusted R² of 0.8640 as one might normally expect; i.e. the difference is more than 0.2. This may indicate a large block effect or a possible problem with your model and/or data. Things to

Final Equation in Terms of Coded Factors

ROP	=
	+1.88
	+0.6348 * A
	+0.6705 * B
	+0.2700 * A*B
	+0.2025 * A ²
	+0.0475 * B ²

On-Screen Keyboard

For Help, press F1

C:\Users\Orangee\Downloads\Documents\opt\rop2.dpx* - Design-Expert 11

File Edit View Display Options Design Tools Help

Navigation Pane

- Design (Actual)
 - Information
 - Notes
 - Summary
 - Graph Columns
 - Evaluation
 - Analysis
 - R1:ROP (Analyzed)
 - Optimization
 - Numerical
 - Graphical
 - Post Analysis
 - Point Prediction
 - Confirmation
 - Coefficients Table

Constraints

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:WOB	is in range	80	160	1	1	3
B:RPM	is in range	118	152	1	1	3
ROP	none	0.96	3.61	1	1	3

Solutions

100 Solutions found

Number	WOB	RPM	ROP	Desirability	Selected
1	154.792	136.009	2.639	1.000	Selected
2	80.000	152.000	1.896	1.000	
3	80.000	118.000	1.095	1.000	
4	160.000	118.000	1.824	1.000	
5	160.000	152.000	3.705	1.000	
6	118.673	134.735	1.864	1.000	
7	88.890	148.447	1.903	1.000	

Factors Tool

Solution: 1 of 100

Jump to run: Run #

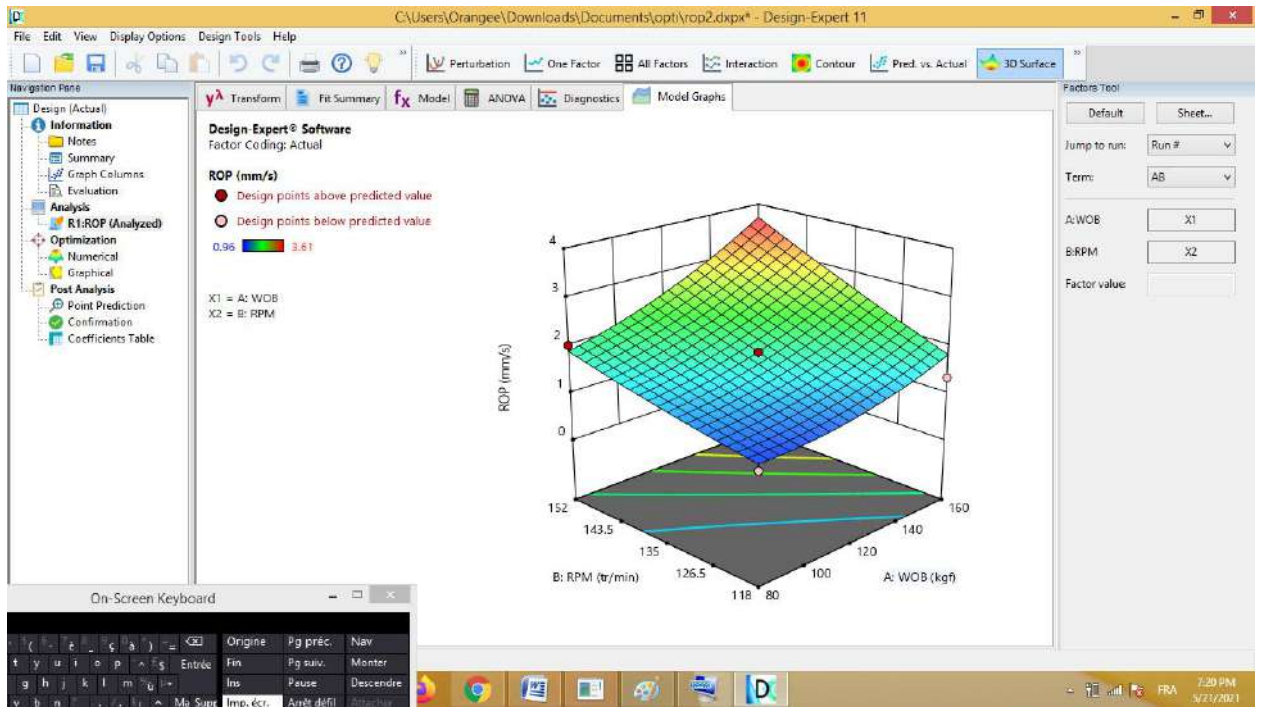
A:WOB

B:RPM

Factor value

On-Screen Keyboard

For Help, press F1



Caractéristique de logiciel

Build Information

File Version 11.1.0.1

Study Type Réponse Surface **Subtype** Randomized

Design Type Central Composite **Runs** 13

Design Model Quadratic **Blocks** No Blocks

Build Time (ms) 1.0000

rop1

Factors

Factor Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean	Std. Dev.
A	WOB kgf	Numeric	63.43	176.57	-1 ↔ 80.00	+1 ↔ 160.00	120.00	32.66
B	RPM tr/min	Numeric	110.96	159.04	-1 ↔ 118.00	+1 ↔ 152.00	135.00	13.88

Responses

Response Name	Unit	Observations	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Transform	Model
R1	ROP	mm/s	13 Polynomial	0.96	3.61	2.03	0.8184	3.76	None	Quadratic

Report

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residuals	Externally Studentized Residuals	Cook's Distance	Influence on Fitted Value DFFITS	Standard Order
1	1.32	1.39	-0.0672	0.625	-0.364	-0.340	0.037	-0.439	5
2	1.34	1.82	-0.4844	0.625	-2.620	-17.446 ⁽¹⁾	1.907 ⁽²⁾	-22.522 ⁽²⁾	2
3	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	12
4	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	10
5	2.02	1.90	0.1244	0.625	0.673	0.644	0.126	0.831	3
6	3.61	3.18	0.4272	0.625	2.311	4.395	1.484 ⁽²⁾	5.674 ⁽²⁾	6
7	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	13
8	1.39	1.03	0.3632	0.625	1.965	2.716	1.072 ⁽²⁾	3.506 ⁽²⁾	7
9	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	11
10	0.9600	1.09	-0.1347	0.625	-0.729	-0.702	0.148	-0.906	1
11	3.48	3.71	-0.2253	0.625	-1.219	-1.271	0.413	-1.641	4
12	2.92	2.92	-0.0032	0.625	-0.017	-0.016	0.000	-0.021	8
13	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	9

⁽¹⁾ Observation with |External Stud. Residuals| > 4.56

⁽²⁾ Exceeds limits.

rop2

Factors

Factor Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Coded Low	Coded High	Mean	Std. Dev.
A	WOB kgf	Numeric	63.43	176.57	-1 ↔ 80.00	+1 ↔ 160.00	120.00	32.66
B	RPM tr/min	Numeric	110.96	159.04	-1 ↔ 118.00	+1 ↔ 152.00	135.00	13.88

Responses

Response Name	Units	Observations	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Transform	Model
R1	ROP mm/s	13	Polynomial	0.96	3.61	2.03	0.8184	3.76	None	Quadratic

Responses

Response Name	Units	Observations	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Transform	Model
R1	ROP mm/s	13	Polynomial	0.96	3.61	2.03	0.8184	3.76	None	Quadratic

Report

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residuals	Externally Studentized Residuals	Cook's Distance	Influence on Fitted Value DFFITS	Standard Order
1	1.32	1.39	-0.0672	0.625	-0.364	-0.340	0.037	-0.439	5
2	1.34	1.82	-0.4844	0.625	-2.620	-17.446 ⁽¹⁾	1.907 ⁽²⁾	-22.522 ⁽²⁾	2
3	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	12
4	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	10
5	2.02	1.90	0.1244	0.625	0.673	0.644	0.126	0.831	3
6	3.61	3.18	0.4272	0.625	2.311	4.395	1.484 ⁽²⁾	5.674 ⁽²⁾	6
7	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	13
8	1.39	1.03	0.3632	0.625	1.965	2.716	1.072 ⁽²⁾	3.506 ⁽²⁾	7
9	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	11
10	0.9600	1.09	-0.1347	0.625	-0.729	-0.702	0.148	-0.906	1

11	3.48	3.71	-0.2253	0.625	-1.219	-1.271	0.413	-1.641	4
12	2.92	2.92	-0.0032	0.625	-0.017	-0.016	0.000	-0.021	8
13	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	9

⁽¹⁾ Observation with |External Stud. Residuals| > 4.56

⁽²⁾ Exceeds limits.

Report

Run Order	Actual Value	Predicted Value	Residual	Leverage	Internally Studentized Residuals	Externally Studentized Residuals	Cook's Distance	Influence on Fitted Value DFFITS	Standard Order
1	1.32	1.39	-0.0672	0.625	-0.364	-0.340	0.037	-0.439	5
2	1.34	1.82	-0.4844	0.625	-2.620	-17.446 ⁽¹⁾	1.907 ⁽²⁾	22.522 ⁽²⁾	2
3	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	12
4	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	10
5	2.02	1.90	0.1244	0.625	0.673	0.644	0.126	0.831	3
6	3.61	3.18	0.4272	0.625	2.311	4.395	1.484 ⁽²⁾	5.674 ⁽²⁾	6
7	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	13
8	1.39	1.03	0.3632	0.625	1.965	2.716	1.072 ⁽²⁾	3.506 ⁽²⁾	7
9	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	11
10	0.9600	1.09	-0.1347	0.625	-0.729	-0.702	0.148	-0.906	1
11	3.48	3.71	-0.2253	0.625	-1.219	-1.271	0.413	-1.641	4
12	2.92	2.92	-0.0032	0.625	-0.017	-0.016	0.000	-0.021	8
13	1.88	1.88	0.0000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.000	9

⁽¹⁾ Observation with |External Stud. Residuals| > 4.56

⁽²⁾ Exceeds limits.

الملخص

يهدف العمل إلى دراسة تطور معدل اختراق الأداة في الصخر، وفقاً لتغير معاملات الحفر الميكانيكية المختلفة، مثل الوزن (WOB)، والسرعة الدوران (RPM)، هذه العوامل متعلقة بنوعين من الصخور (صلبة وهشة)، للحد من تكاليف التشغيل وزيادة كفاءة الحفر. تحليل و معالجة البيانات التجريبية للتكوين التجريبي لتأثير المعلمات الميكانيكية المختلفة على معدل التقدم. يسمح تطبيق الطريقة المركبة المركزية للتصميم التجريبي علاقة رياضية بين عوامل الحفر ، ويحدد المعدل الأمثل للتقدم الذي يضمن عملية حفر أكثر كفاءة.

الكلمات المفتاحية: معاملات الحفر - أداة PDC - معدل الاختراق - الطريقة المركبة المركزية.

Abstract

The work aims to study the development the rate of penetration of the tool in the rock (ROP: Rate Of Penetration), according to the variation of the various mechanical drilling parameters, such as the weight (WOB: weight on bit), the speed of rotation (RPM: Rotation per minute), these parameters are concerned with two types of rocks (hard and tender), to limit operating costs and increase drilling efficiency. Analysis and processing of empirical data to the experimental configuration to influencing the different mechanical parameters on the rate of penetration, applying the central composite method experimental design establishes the mathematical relationship between the drilling parameters, and determines the optimal rate of penetration that ensures a more efficient drilling process.

Key words: drilling parameters-the PDC tool-rate of penetration-the centered composite method.

Résumé

Le travail vise à étudier le développement du taux de pénétration de l'outil dans la roche (ROP: Rate Of Pénétration), en fonction de la variation des différents paramètres mécaniques de forage, tels que le poids (WOB: weight on bit), la vitesse de rotation (RPM: Rotation par minute), ces paramètres sont concernée de deux types des roches (dure et tendre), pour limiter les coûts d'exploitation et augmenter l'efficacité de forage. L'analyse et le traitement des données empiriques la configuration expérimentale de l'influence des différents paramètres mécaniques sur le taux d'avancement. L'application de la méthode de composite centrée des plans d'expérience permet d'établir la relation mathématique entre les paramètres du forage, et de déterminer le taux d'avancement optimal qui assure un processus de forage plus performant.

Mots clés: paramètres de forage -l'outil PDC-taux de pénétration-la méthode composite centrée.