

**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 technologies**

**Option : Électromécanique**

**Spécialité : Maintenance industrielle**

**Présenté Par :**

MAHDJOUBI Abdelbari

BENAMOR Lahcene

**-Thème-**

Étude statistique des paramètres du processus de  
forage pétrolier

**Soutenu Publiquement Le : / / 2023**

*Devant le jury :*

Mis. KHETTABI Rym

Encadreur

UKM Ouargla

ROUAGDIA Karim

Président

UKM Ouargla

BENADDI Hadda

Examineur

UKM Ouargla

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2022 / 2023**

## Remercîment

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à Dieu, le Tout-Puissant, pour avoir permis la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre encadrant, Madame Khettabi Rym, pour son suivi attentif, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de notre travail.

Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont encouragés et soutenus dans nos études, depuis nos enseignants de la première année primaire jusqu'à ceux du Master. Vos encouragements ont été essentiels pour notre réussite.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Votre soutien a été précieux et nous vous en sommes très reconnaissants

### Dédicace

Je dédie humblement ce travail à ma chère mère et à mon cher père. À mes frères, mes sœurs et ma famille, ainsi qu'à mes amis pour leur soutien constant et leur encouragement.

Je souhaite également remercier tous ceux qui m'ont enseigné, qui ont pris ma main et éclairé mon chemin vers la science et la connaissance. Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je voudrais également remercier tous les membres du corps enseignant du département de [Génie Mécanique] qui ont contribué à ma formation universitaire. Merci à tous.

M. Abdelbari

### Dédicace

Je dédie humblement ce travail à ma chère mère et à mon cher père. À mes frères, mes sœurs et ma famille, ainsi qu'à mes amis pour leur soutien constant et leur encouragement.

Je souhaite également remercier tous ceux qui m'ont enseigné, qui ont pris ma main et éclairé mon chemin vers la science et la connaissance. Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je voudrais également remercier tous les membres du corps enseignant du département de [Génie Mécanique] qui ont contribué à ma formation universitaire. Merci à tous

B. Lahcene

Remercîment .....	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	IV
Liste des symboles.....	...IV
Résumé.....	XI
Introduction générale .....	..1

### Chapitre I : Techniques fondamentaux de forage

1. Introduction .....	3
2. Types des appareils de forage pétrolière .....	3
2.1. Appareil Leger .....	4
2.2. Appareil moyen .....	4
2.3. Appareil lourd .....	4
2.4. Appareil super lourd .....	4
3. Caractéristiques d'un appareil de forage .....	5
4. Répartition des équipements de l'appareil de forage .....	6
4.1. Les équipements de surface .....	6
4.1.1. Système de levage (Hoisting system) .....	6
4.1.1.1. Le mat de forage .....	6
4.1.1.2. La substructure .....	7
4.1.1.3. Le Mouflage .....	7
4.1.1.3.1. Le moufle fixe .....	7
4.1.1.3.2. Le moufle mobile .....	7
4.1.1.3.3. Le câble de forage .....	8
4.1.2. System de rotations (Rotating system) .....	9
4.1.2.1. Table de rotation .....	9
4.1.2.3. Rôles du Top Drive .....	11
4.1.3. Système de circulation .....	12
4.1.3.1 Rôle de la boue de forage .....	12
4.1.4. Le système de sécurité .....	13
4.1.4.1. Principales fonctions du BOP .....	14
4.2. Les équipements de fond .....	15
4.2.1. La garniture de forage .....	15

---

4.2.1.1. Les tiges de forage (drill-pipes)	15
4.2.1.1.1. Rôles	15
4.2.1.1.2 Caractéristiques	16
4.2.1.2. Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly)	17
4.2.1.2.1. Les masses tiges (drill-collars)	17
3. Conclusion	20

## Chapitre II : Paramètres de forage

1. Introduction	20
2. Paramètres de forage	20
2.1. Les paramètres mécaniques	20
2.1.1 vitesse d'avancement (ROP)	20
2.1.2. Poids sur l'outil (weight on bit (WOB)	20
2.1.3 La vitesse de rotation (RPM)	21
2.1.4. Outils de forage	22
2.2. Les paramètres hydrauliques	27
2.2.1. Débit et pression d'injection	27
2.2.2. Vitesse minimale aux dusses	27
2.2.3. La nature de fluide de forage	28
2.2.4 Les caractéristiques de la boue	28
3. Conclusion	29

## Chapitre III : Méthodes les plans d'expériences

1. Introduction	30
2. Objectives	30
3. Vocabulaire des plans d'expériences	30
3.1. Notion d'espace expérimental	31
3.2. Notion de surface de réponse	33
3.3. Notion de modélisation mathématique	33
3.4. Le modèle de l'expérimentateur	34
3.5. Système d'équations	34
4. Les plans experiences	35
4.1. Plans factoriels	35
4.2. Le plan de Taguchi	36
4.3. Plans de surfaces et de réponse RSM (response surface méthodologie)	36
4.4. Plans de Box-Behnken	38
4.5. Les plans composites	39

<b>5. Les Avantages de Plans (RSM)</b>	<b>40</b>
<b>6. Conclusion</b>	<b>41</b>

**Chapitre IV : Optimisation des paramètres de forage**

<b>1. INTEDECTION</b>	Error! Bookmark not defined.
<b>2. Matériels et methods</b>	<b>42</b>
<b>3. Traitement statistique des données</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Statistiques d'ajustement ROP</b>	<b>45</b>
<b>3.2. Équation de la réponse ROP</b>	<b>46</b>
<b>3.3. Validation des résultats obtenus</b>	<b>47</b>
<b>4. Influence des paramètres étudiés sur le ROP</b>	<b>47</b>
<b>6. Les valeurs optimales</b>	<b>54</b>
<b>7. Conclusion</b>	<b>54</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>55</b>
<b>Références</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXE</b>	<b>58</b>

## Liste des figures

### Chapitre I : Techniques fondamentaux de forage

Figure I. 1: Plateforme pétrolière Onshore .....	3
Figure I.2: Plateforme pétrolière Offshore. ....	3
Figure I.3: Appareil de forage .....	6
Figure I.4: Mofle fixe .....	7
Figure I. 5: Mofle mobil .....	7
Figure I.6: Câble de forage .....	8
Figure I.7: Le treuil (draw work) .....	8
Figure I.8: Table de rotation .....	9
Figure I.9: Tope Drive .....	11
Figure I.10: Circuit de la boue de forage. ....	13
Figure I.11: Le système B.O.P .....	14
Figure I.12: Tige de forage .....	15
Figure I.13: Tools-joints .....	17
Figure I.14: Masses tiges .....	17
Figure I.15: Masse tiges lisses .....	18
Figure I.16: Masse tiges spiralées. ....	18
Figure I.17: Stabilisateurs .....	19
Figure I.18: Le trépan .....	19

### Chapitre II : Paramètres de forage

Figure II 19: Poids sur l'outil .....	21
Figure II 20: Capteur de fréquence RPM .....	22
Figure II 21: Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes .....	23
Figure II 22: Outil à diamant naturel .....	24
Figure II 23: Les Outils PDC .....	25
Figure II 24: Les dents (Cutters) des Outils PDC .....	26
Figure II 25: Outils TSP .....	26
Figure II 26: Les Outils imprégnés .....	27

### Chapitre III : Méthodes les plans d'expériences

Figure III.27: Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1) .....	31
--	----



<b>Figure III.28: Représentation de l'espace expérimental .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure III.29: Les points expérimentaux .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure III.30: Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface</b>	<b>33</b>
<b>Figure III.31: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs .....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.32: Plan composite pour deux facteurs .....</b>	<b>40</b>
<b>Chapitre IV : Optimisation des paramètres de forage</b>	
<b>Figure IV 33: Roche calcaire. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figure IV 34: ROP prévu en fonction de ROP réel. ....</b>	<b>47</b>
<b>Figure IV 35: L'effet de RPM sur le ROP.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure IV 36: L'effet de <math>\beta</math> (<math>^{\circ}</math>) sur le ROP. ....</b>	<b>50</b>
<b>Figure IV 37: L'effet de RPM et WOB sur le ROP. ....</b>	<b>51</b>
<b>Figure IV 38: L'effet de <math>\beta</math> (<math>^{\circ}</math>) et WOB sur le ROP. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figure IV 39: L'effet de <math>\beta</math> (<math>^{\circ}</math>) et RPM sur le ROP.....</b>	<b>53</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1: Types d'appareils de forage et leurs avantages .....</b>	<b>5</b>
<b>Tableau I 2: Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage .....</b>	<b>16</b>
<b>Tableau III 3: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs .....</b>	<b>39</b>
<b>Tableau IV 4: Caractéristiques de la foreuse. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau IV 5: Valeurs des paramètres. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau IV 6: Présentation des valeurs de la réponse ROP. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau IV 7: Les résultats de traitement statistique des données pour ROP1. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tableau IV 9: Les valeurs optimales des paramètres pour le ROP. ....</b>	<b>54</b>

## Liste des symboles

**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).

**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.

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination.

**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<sup>-1</sup>** : est la matrice inversée de X.

**X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>** : Sont les valeurs des paramètres.

**a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>**: sont les coefficients du modèle mathématique.

**Kgf** : est une ancienne unité de force, n'appartenant pas au système international, qui relie les notions de masse et de poids. On utilise maintenant : 1 kgf = 9,806 65 N.

**Tr/min** : est nombre des tours par minute.

## Résumé

L'optimisation du taux de pénétration (ROP) est essentielle pour réduire les coûts de forage. Cette étude utilise la méthode RSM pour analyser l'impact des paramètres mécaniques tels que le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et angle de coupe( $\beta$ ) sur le ROP. L'objectif est de développer un modèle mathématique en utilisant les données expérimentales afin de comprendre la relation entre ces paramètres et le taux de pénétration.

Les résultats montrent que le modèle développé est bien ajusté et qu'il existe une corrélation significative entre les prédictions du modèle et les données expérimentales. Cela permet d'identifier les paramètres les plus influents sur le ROP et de déterminer les conditions optimales pour maximiser les performances de forage. Le modèle développé est bien ajusté et permet de prévoir avec précision le comportement de ROP.

**Les mots-clés :** plans expériences, méthode de réponse de surface, forage, optimisation, modélisation.

## Abstract

The optimization of the rate of penetration (ROP) is essential for reducing drilling costs. This study uses the Response Surface Methodology (RSM) to analyze the impact of mechanical parameters such as Weight on Bit (WOB), Rotations Per Minute (RPM), and cutter angle ( $\beta$ ) on ROP. The objective is to develop a mathematical model using experimental data to understand the relationship between these parameters and the rate of penetration.

The results demonstrate that the developed model is well-adjusted, and there is a significant correlation between the model predictions and the experimental data. This enables the identification of the most influential parameters on ROP and the determination of optimal conditions to maximize drilling performance. The developed model is well-fitted and accurately predicts ROP behavior.

**The keywords:** experimental designs, response surface methodology, drilling, optimization, modeling.

## ملخص

يعد تحسين معدل الاختراق (ROP) أمرًا ضروريًا لتقليل تكاليف الحفر. تستخدم هذه الدراسة منهجية سطح الاستجابة (RSM) لتحليل تأثير المعلمات الميكانيكية مثل الوزن على البت (WOB)، الدوران في الدقيقة (RPM)، وزاوية القاطع ( $\beta$ ) على ROP. الهدف هو تطوير نموذج رياضي باستخدام البيانات التجريبية لفهم العلاقة بين هذه المعلمات ومعدل الاختراق. توضح النتائج أن النموذج المطور تم تعديله جيدًا، وأن هناك ارتباطًا كبيرًا بين تنبؤات النموذج والبيانات التجريبية. يتيح ذلك تحديد أكثر المعلمات تأثيرًا في ROP وتحديد الظروف المثلى لزيادة أداء الحفر إلى أقصى حد. النموذج المطور مناسب بشكل جيد ويتنبأ بدقة بسلوك ROP.

**الكلمات المفتاحية:** النمذجة التجريبية، منهجية سطح الاستجابة، الحفر، التحسين، النمذجة

## Introduction générale

L'optimisation des paramètres du processus de forage pétrolier est une étape cruciale pour améliorer les performances globales de forage. Les variables opérationnelles telles que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, les propriétés de la boue de forage et la nature de la formation géologique ont un impact direct sur le taux de pénétration. La compréhension des relations entre ces paramètres permet de développer des stratégies théoriques et pratiques pour mieux contrôler les opérations de forage.

Les paramètres de forage peuvent être classés en deux catégories principales, les paramètres mécaniques et les paramètres hydrauliques. Les paramètres mécaniques concernent le type d'outil de forage utilisé et sa forme, le poids appliqué, la vitesse de rotation. Les paramètres hydrauliques sont les facteurs liés aux caractéristiques du fluide de forage, tels que le débit de la boue de forage, la pression exercée, et la nature de la boue.

Cette étude se concentre principalement sur l'optimisation du de taux de pénétration face aux variations des paramètres mécaniques, notamment le poids (Weight on the bit : WOB), la vitesse de rotation (Rotation per minute :RPM), l'angle de coupe ( $\beta$ ). Pour atteindre cet objectif, une approche basée sur l'analyse des données expérimentales est adoptée.

La méthodologie de surface de réponse (Response Surface Method : RSM) est utilisée pour modéliser la relation entre les différents paramètres de forage et le taux de pénétration. Cette méthode basée sur l'analyse statistique des données expérimentales, pour obtenir le modèle mathématique qui relie les différents paramètres étudiés et de déterminer le taux d'avancement optimal qui assure un processus de forage plus performant. Le travail est divisé en quatre grandes parties. La première partie a été consacrée à la description de l'installation de l'appareil de forage. La deuxième partie a été portée sur une explication détaillée des différents paramètres de forage qui influent sur le taux de pénétration (le type d'outil utilisé, le poids et la vitesse de rotation, les caractéristiques du fluide de forage). Les méthodes d'amélioration des paramètres de forage, notamment les méthodes des plans d'expériences, ainsi que les solutions proposées par les chercheurs pour résoudre les problèmes liés à l'optimisation de l'exploration pétrolière, y compris la modélisation mathématique utilisée pour décrire la relation entre les paramètres, ont été présentées à la troisième partie. La quatrième partie a été consacrée à l'application de la méthode d'optimisation choisie, ainsi que l'interprétation les résultats obtenus du traitement statistique des données expérimentales.

*Chapitre I :*  
*Techniques fondamentales de*  
*forage*

## **1. Introduction**

L'exploration pétrolière est un processus complexe qui implique l'utilisation de techniques et d'équipements de forage sophistiqués pour extraire les produits pétroliers des réserves souterraines profondes.

Le système de forage le plus utilisé aujourd'hui est le forage rotatif, qui fonctionne sur le principe de la rotation d'un outil à travers lequel une force est dirigée dans le sens de la marche. Cela permet de percer un trou de rayon égal à celui de l'outil. Au fur et à mesure que l'outil détruit les roches au fond de la fosse, des copeaux ou des morceaux sont générés, et ceux-ci sont remontés à la surface grâce à la circulation du fluide de forage.

Le fluide de forage, qui est généralement de l'eau ou de l'huile de bentonite, est pompé de la surface vers l'intérieur des tiges de forage et injecté à travers le tranchant de l'outil. L'argile remonte alors dans l'espace annulaire entre les barreaux et les parois du puits, entraînant à la surface des éclats de roche. Le poids sur l'outil est obtenu en introduisant des tiges lourdes appelées poids sur l'outil (WOB), tandis que le couple est obtenu à partir du couple de surface transmis à l'outil par un train de forage ou à partir d'un moteur dans le trou au sommet de l'outil, qui est contrôlé par l'espace.

Dans les sections suivantes, nous approfondirons les termes techniques et les processus impliqués dans le forage pétrolier [1].

## **2. Types des appareils de forage pétrolière**

Il existe différents types d'appareils de forage pour extraire le pétrole, que ce soit sur terre ou en mer selon le processus de forage requis [2].



Figure I.1: Plateforme pétrolière Onshore [2].



Figure I. 2:Plateforme pétrolière Offshore. [2].

Les machines de forage pétrolier classées aussi selon la profondeur forée, en quatre catégories.

### **2.1. Appareil Leger**

La plateforme de forage pétrolier léger est une unité de petite taille utilisée pour les opérations de forage à faible profondeur.

Comprend un mât, un système de levage, une table rotative et une unité de puissance telle qu'un moteur diesel ou un moteur électrique.

La plateforme est généralement utilisée pour forer des puits de petit diamètre et est portable, souvent montée sur un camion ou une remorque [3].

### **2.2. Appareil moyen**

La plateforme de forage pétrolier moyen est une unité de taille moyenne utilisée pour les opérations de forage peu profondes et profondes.

Il comprend un mât, un système de levage, une table rotative et une unité d'alimentation comme une plate-forme légère. Cependant, il a une plus grande capacité de creusement et peut forer à de plus grandes profondeurs.

Il est souvent monté sur un patin ou une remorque pour un transport facile et peut être utilisé pour le forage à terre et en mer [3].

### **2.3. Appareil lourd**

La plateforme de forage pétrolier lourd est une unité à grande échelle conçue pour les opérations de forage profond, capable de forer à des profondeurs de plusieurs milliers de mètres. Il comprend un mât, un système de levage, une table rotative, une unité motrice et des équipements auxiliaires tels que des pompes à boue, des obturateurs anti-éruptions et des déménageurs aériens. Il est généralement utilisé pour les opérations de forage complexes et est souvent monté sur une plate-forme en acier ou un navire de forage pour les opérations de forage en mer [3].

### **2.4. Appareil super lourd**

L'appareil de forage pétrolier super lourd est l'appareil de forage le plus grand et le plus puissant utilisé dans l'industrie pétrolière et gazière, conçu pour des opérations de forage très profondes jusqu'à 12 000 mètres ou plus. Il comprend un énorme mât ou tour de levage, un système de levage puissant, une grande plaque tournante, une unité motrice de grande capacité et une gamme d'équipements auxiliaires. Ce type de plate-forme est généralement utilisé dans les opérations de forage en eau très profonde et est monté sur



une grande plate-forme de forage. Sa construction et son exploitation nécessitent des investissements importants en ressources et constituent l'une des plates-formes de forage les plus sophistiquées et les plus avancées de l'industrie [3].

Tableau I.1: Types d'appareils de forage et leurs avantages [4].

Types	distance d'excavation (ft)	distance d'excavation (m)	Capacité
Appareil Leger	4921 ft-6561 ft	1500m-2000m	650 HP
Appareil moyen	11482 ft	3500m	1300 HP
Appareil lourd	19685 ft	6000m	2000 HP
Appareil super lourd	26246 ft-3280 ft	8000m-10000m	3000HP

### 3. Caractéristiques d'un appareil de forage

Avec le développement de l'industrie pétrolière et l'évolution constante de la demande pétrole, plusieurs types de plates-formes ont été construits, mais toutes les foreuses rotatives ont le même équipement de forage de base.

Les principaux composants des équipements tournants sont :

- Système de levage.
- Système de circulation.
- Système de rotation.
- Système de contrôle du puits (well control).
- Système de surveillance de puits (mudlogging).

Une plateforme de forage se compose essentiellement d'un derrick et d'un treuil (treuil) avec perceuses à fil, blocs fixes et mobiles.

Un système de circulation de fluide de forage, comprenant une conduite verticale (support tuyaux), flexibles rotatifs, réservoirs de fluide de forage et pompes. Les composants fonctionnent ensemble pour remplir les trois fonctions principales d'un composant [1].

Plate-forme de forage rotatoire :

- System de levage (Hasting system).
- System de rotations (Rotating system).
- System de circulation (circulation system).
- System de securities.

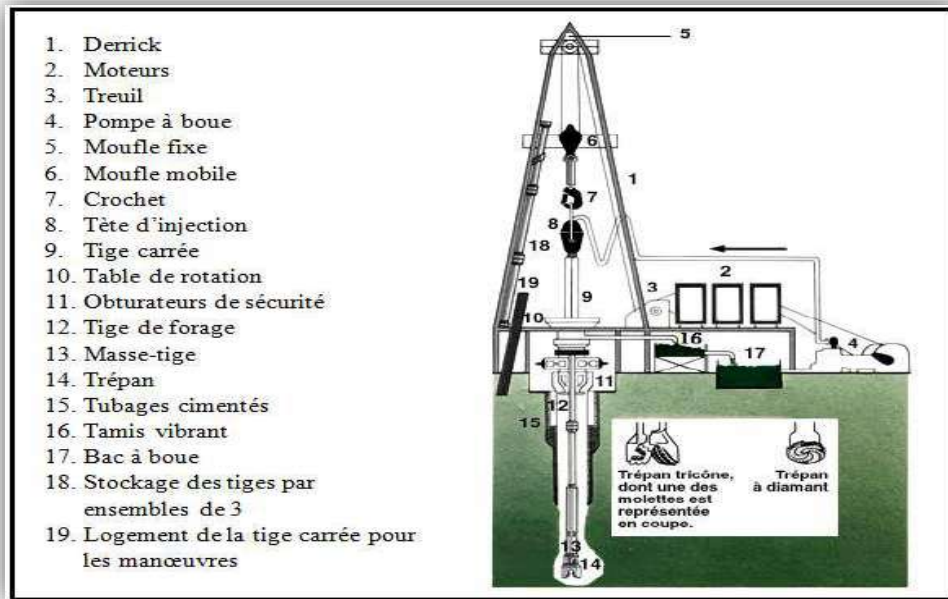


Figure I.3:Appareil de forage [5].

#### 4. Répartition des équipements de l'appareil de forage

L'appareil de forage peut être décrit sous forme de deux catégories de matériel :

- Le matériel de fond.
- Le matériel de surface.

##### 4.1. Les équipements de surface

Les équipements de surface, font référence à l'ensemble des installations et des dispositifs situés à la surface du puits de forage. Cela se résume à suivant :

##### 4.1.1. Système de levage (Hoisting system)

Ils servent à suspendre la garniture de forage et la faire monter et descendre dans le puits, ils permettent aussi d'ajuster le poids sur le trépan qui est nécessaire pour que dernier puisse forer[6].

##### 4.1.1.1. Le mat 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[6].

#### **4.1.1.2. La substructure**

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[6].

#### **4.1.1.3. 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 [6].

En négligeant les frottements, la charge au crochet est divisée par le nombre de brin, et sa vitesse est multipliée par ce nombre [6].

##### **4.1.1.3.1. Le moufle fixe**

Est formé d'un certain nombre de poulies et placé au sommet du mât, il possède une poulie de plus que le moufle mobile [6].

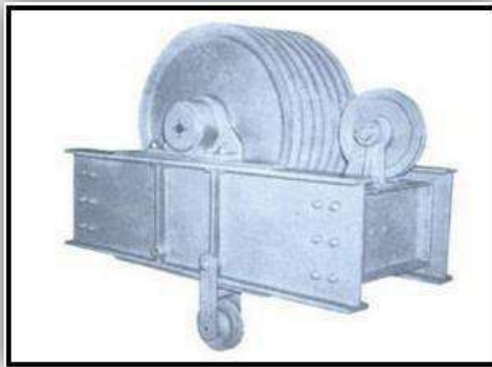


Figure I.4: Moufle fixe [5].

##### **4.1.1.3.2. Le moufle mobile**

Est formé également d'un certain nombre de poulies par lesquelles passe le câble de forage, il se déplace sur une certaine hauteur entre le plancher de travail et le moufle fixe [6].



Figure I.5: moufle mobil [5].

#### 4.1.1.3.3. Le câble de forage

Les câbles des appareils de forage sont ensemble de qualité métallique sur laquelle sont entourés de six torons constitués en fil d'acier[6].

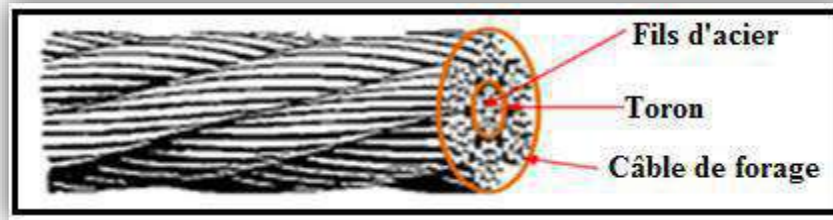


Figure I.6: câble de forage [5].

#### 4.1.1.3. 4. Le treuil

C'est un fût (tambour) autour duquel s'enroule le câble de forage. Aux bouts de ce fût sont fixées des jantes qui servent au freinage, au contact de bandes en acier contenant des patins en fer do, actionnées par un levier. Le treuil est le cœur de l'appareil de forage, donc c'est la capacité du treuil qui caractérise un appareil de forage et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer [6].

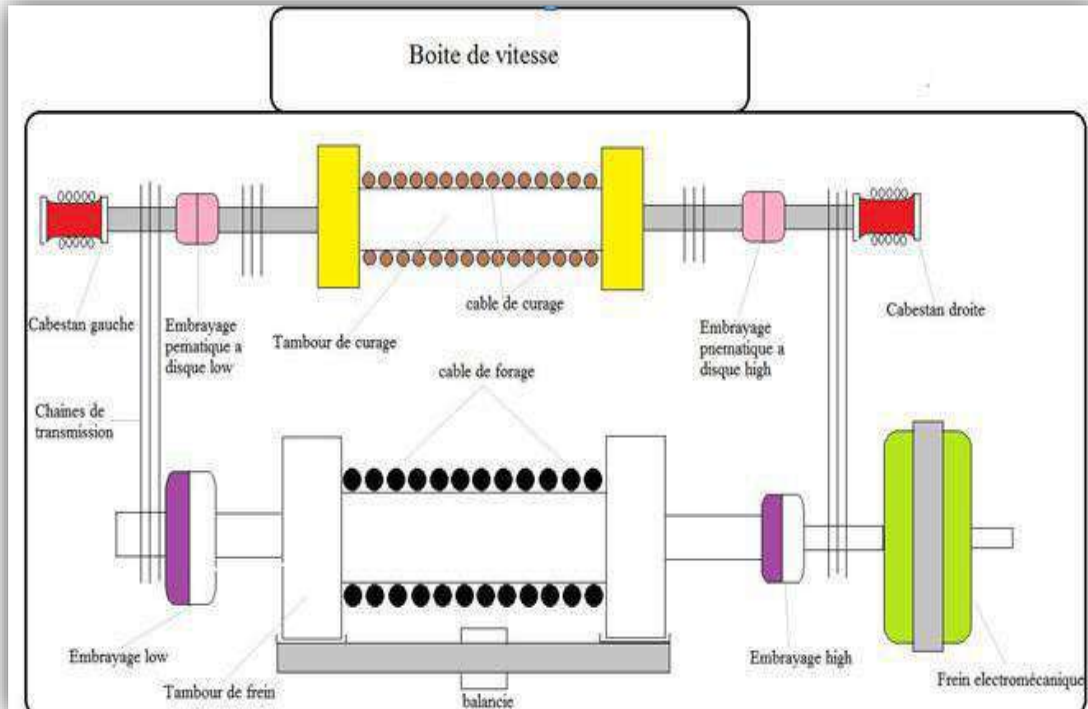


Figure I.7: Le treuil (draw work) [4].

#### **4.1.2. System de rotations (Rotating system)**

Le système de rotations est une composante clé du processus de forage d'un puits de pétrole. Il fait référence à l'ensemble des équipements et des procédures utilisés pour faire tourner la colonne de forage pendant le processus de pénétration dans le sol.

Le système de rotations comprend généralement les éléments suivants :

Moteur de rotation, Train de transmission, Tige de forage, Tête de forage.

Lors du processus de forage, le système de rotations est généralement combiné avec d'autres systèmes tels que le système de circulation des fluides de forage et le système de levage pour optimiser l'efficacité et la sécurité de l'opération. La rotation constante de la colonne de forage permet de maintenir le trépan en mouvement, de réduire la friction avec les parois du puits et d'assurer une pénétration continue dans le sol.

Il est important de noter que le système de rotations peut varier en fonction du type de forage (terrestre ou offshore) et des conditions géologiques spécifiques du site de forage. Des équipements et des techniques spécialisés peuvent être nécessaires pour faire face à des situations particulières telles que des formations rocheuses dures, des forages directionnels ou des forages en eau profonde [2].

##### **4.1.2.1. Table de rotation**

La table de rotation est un élément essentiel des équipements de forage de puits de pétrole, Elle fait référence à une plateforme rotative robuste et puissante qui permet de faire tourner la colonne de forage et les outils de forage lors de l'opération de forage.

La table de rotation est généralement située à la surface du puits et est fixée sur la plateforme de forage, elle se compose d'un grand disque horizontal en acier, également appelé table de rotation, sur lequel repose la section inférieure de la colonne de forage [8].

Voici les principales caractéristiques et fonctions de la table de rotation :

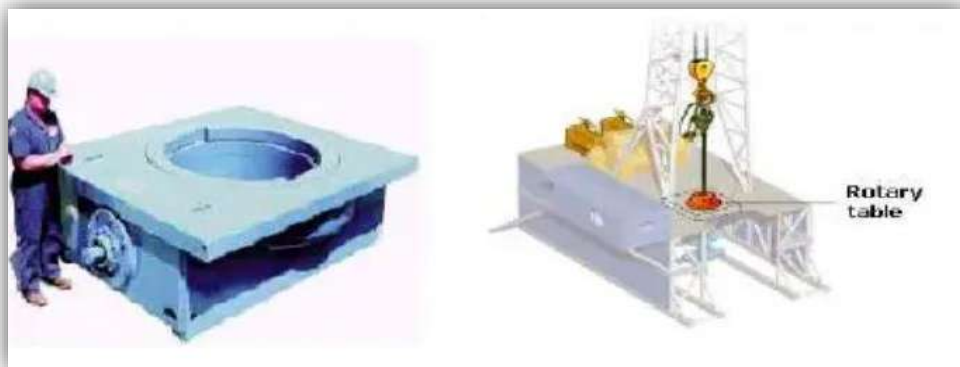


Figure I.8: table de rotation [7].

**a. System de verrouillage**

La table de rotation est équipée d'un système de verrouillage qui maintient la colonne de forage en place pendant la rotation. Cela permet d'éviter tout mouvement indésirable ou glissement de la colonne de forage pendant l'opération [7].

**b. Contrôle de la vitesse de rotation**

La table de rotation permet de contrôler la vitesse de rotation de la colonne de forage. Cela peut être réalisé en ajustant la vitesse du moteur de la table ou en utilisant des dispositifs de réduction de vitesse [7].

**c. Transfert de puissance**

La table de rotation est connectée au train de transmission, qui transmet la puissance du moteur de la table à la colonne de forage. Cela permet de faire tourner la tête de forage et les outils de forage pour creuser le puits [7].

**d. Sécurité**

La table de rotation est équipée de dispositifs de sécurité pour prévenir les accidents pendant l'opération. Cela peut inclure des protections pour empêcher l'accès aux zones de rotation, des systèmes d'arrêt d'urgence et des mécanismes de verrouillage supplémentaires pour maintenir la stabilité de la colonne de forage. La table de rotation est utilisée en combinaison avec d'autres équipements de forage tels que les moteurs de rotation, les systèmes de circulation des fluides de forage et les dispositifs de contrôle de puits pour assurer un forage efficace et sécurisé [7]

**4.1.2.2. Top Drive**

Le top drive est un système de rotation moderne qui est utilisé dans plusieurs appareil de forage.

Il peut être utilisé sur tous les types des appareils de forage, Onshore ou offshore.

Ce système fait la fonction de tout l'assemblage de la tige d'entraînement et la table de rotation.

L'utilisation du top drive montre plusieurs avantages et une réduction dans le type de manœuvre des différents types [7].



Figure I.9:Top Drive [7].

#### **4.1.2.3. Rôles du Top Drive**

**Rotation de la colonne de forage :** Le Top Drive est capable de faire tourner la colonne de forage en utilisant un moteur intégré. Il élimine ainsi le besoin de déployer des treuils et de manipuler manuellement les tiges de forage, ce qui permet un processus de forage plus rapide et plus efficace. **Contrôle de la vitesse et du couple de rotation :** Le Top Drive permet de réguler la vitesse et le couple de rotation de la colonne de forage en fonction des conditions de forage et des exigences spécifiques. Cela permet d'optimiser les performances de forage et de s'adapter aux différentes formations géologiques rencontrées.

**Forage directionnel :** Le Top Drive facilite le forage directionnel, c'est-à-dire la capacité de diriger le tracé du puits dans une direction spécifique. Grâce à sa capacité à pivoter et à incliner la colonne de forage, le Top Drive permet de contrôler précisément la trajectoire du puits, ce qui est essentiel pour atteindre des réservoirs spécifiques ou éviter des obstacles souterrains.

**Récupération des tiges de forage :** Le Top Drive facilite également la récupération des tiges de forage. Il peut être utilisé pour soulever et abaisser la colonne de forage, permettant ainsi de retirer les sections de tiges usées ou endommagées du puits plus facilement.

**Réduction des risques opérationnels :** Le Top Drive offre des avantages en termes de sécurité et de réduction des risques lors du processus de forage. Il élimine le besoin de manipuler manuellement les tiges de forage, ce qui réduit les risques de blessures pour les travailleurs. De plus, le contrôle précis du Top Drive contribue à minimiser les incidents tels que les coincements de tiges ou les déversements [7].

### **4.1.3. Système de circulation**

Durant le forage d'un puits, un fluide (appelé boue de forage), est injecté à haute pression à l'intérieur des tiges de forage. La boue de forage sort au niveau de l'outil de forage à une vitesse suffisante pour pouvoir entraîner les morceaux de roche forés jusqu'en surface dans l'espace annulaire situé entre les tiges de forage et les parois du puits.

En surface, les débris de roches sont séparés de la boue en passant sur des tamis vibrants qui retiennent ces débris en laissant passer le fluide.

Si nécessaire, des traitements complémentaires sont effectués de manière à ce que la boue nettoyée ait retrouvé ses propriétés initiales (viscosité, densité,). Elle est alors envoyée dans les bacs à boue où elle est pompée afin d'être réinjectée dans la garniture de forage.

Elle circule donc en circuit fermé [8].

#### **4.1.3.1 Rôle de la boue de forage**

Elle joue différents rôles dans le déroulement du forage :

1. Elle permet de maintenir le puits en sécurité, en exerçant une pression Suffisante sur le format.
2. Elle nettoie le puits en remontant les déblais, et permet donc d'obtenir des informations importantes sur les couches rencontrées
3. Elle maintient les parois du puits.
4. Elle lubrifie l'outil de forage et le refroidit.

La boue est conçue de manière à remplir tous ces rôles, ses caractéristiques sont donc définies en fonction de celles de la roche forée (nature de la roche, pression Interstitielle, présence de fractures, etc.).

Ainsi, durant un forage, différentes boues sont donc utilisées afin qu'elles soient en adéquation avec les différentes couches de roches traversées.

En pratique, les propriétés de la boue sont régulièrement contrôlées et ajustées par un ingénieur boue afin d'assurer la sécurité et l'efficacité du forage [9].



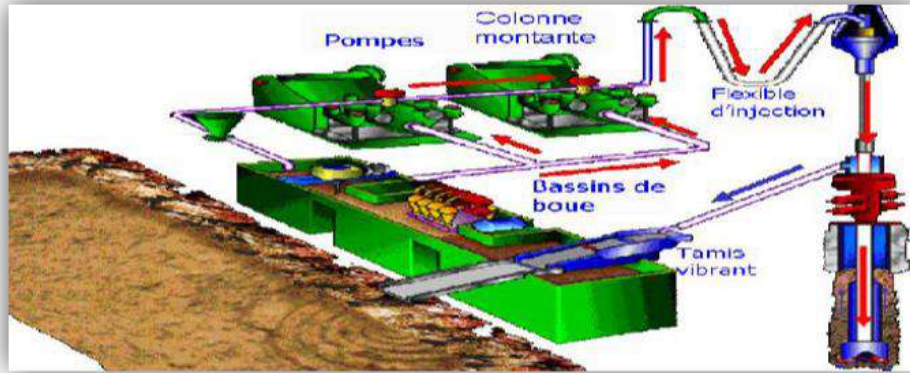
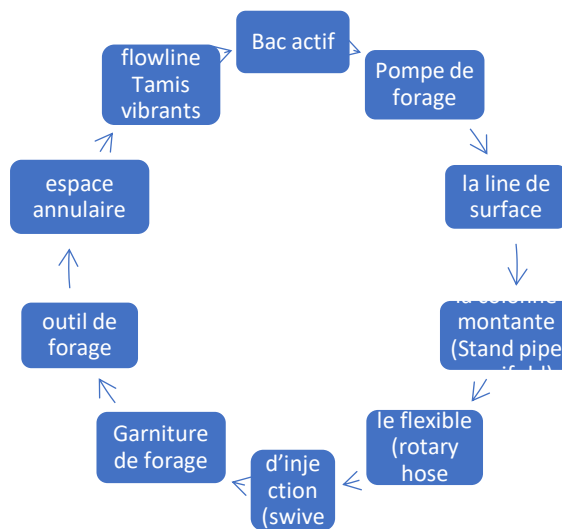


Figure I.10: Circuit de la boue de forage [2].



#### 4.1.4. Le système de sécurité

Le BOP (Blowout Preventer) désigne un équipement de sécurité essentiel utilisé dans le processus de forage d'un puits de pétrole. Son rôle principal est de prévenir les déversements incontrôlés de pétrole et de gaz (également appelés « blowouts ») en cas de surpression ou de défaillance des équipements de forage.

Le BOP est généralement installé à la tête du puits, au niveau de la surface ou submergé en mer, et il est constitué de plusieurs vannes et dispositifs de fermeture. Ces vannes peuvent être actionnées manuellement ou à distance à l'aide de systèmes hydrauliques ou électriques. Le BOP peut être classé en deux catégories principales : le BOP de surface (surface BOP) et le BOP de puits (substa BOP) utilisé en mer [10].

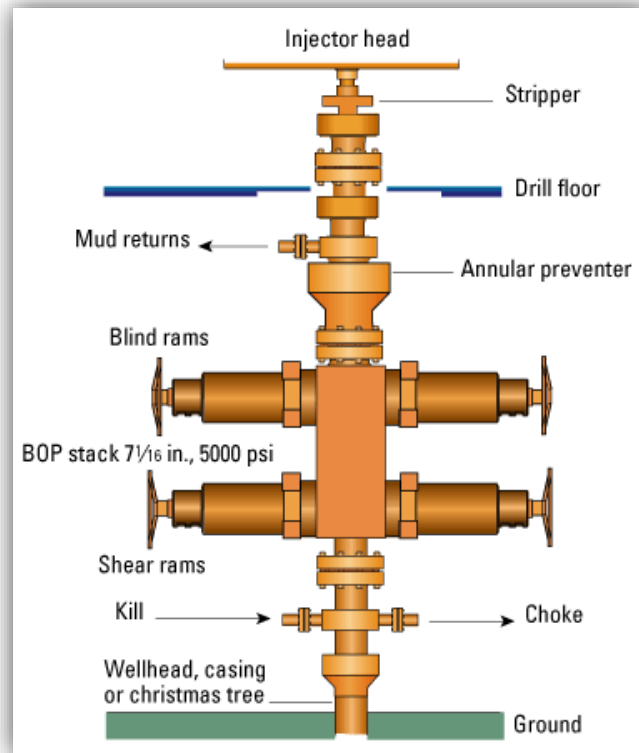


Figure I.11:Le système BOP [11].

#### 4.1.4.1. Principales fonctions du BOP

**Contrôle de la pression :** Le BOP peut fermer hermétiquement le puits pour empêcher la pression élevée du fluide de forage de s'échapper ou de provoquer un Blowout, Il dispose de vanes de fermeture rapide, appelées rams, qui peuvent être activées en cas d'urgence. **Isolement des formations géologiques :** Lors du forage, différentes formations géologiques contenant des fluides sous pression peuvent être rencontrées, le BOP permet d'isoler ces formations et de contrôler le flux des fluides.

**Contrôle des fluides de forage :** Le BOP permet de contrôler le débit des fluides de forage et de les réguler en fonction des besoins de la formation géologique.

**Intervention d'urgence :** En cas d'incident ou d'accident lors du forage, le BOP peut être utilisé pour couper la colonne de forage, sceller le puits et minimiser les risques de fuite de pétrole ou de gaz.

Le BOP est soumis à des réglementations strictes en matière de sécurité et doit être vérifié régulièrement pour s'assurer de son bon fonctionnement. Son utilisation est essentielle pour garantir la sécurité des opérations de forage et la protection de l'environnement [10].

## **4.2. Les équipements de fond**

Les équipements de fond, font référence à l'ensemble des installations et des dispositifs situés dans le fond du puits de forage. Cela se résume à suivant :

### **4.2.1. La garniture de forage**

La garniture de forage est la partie active non visible. Elle assure la liaison entre l'outil de forage et la surface. Elle est constituée, de deux parties principales :

- La partie haute formée de tiges (drill-pipes).
- La partie basse de l'assemblage de fond (Bottom Hole Assembly) [5].

Ses principaux rôles sont :

- Permettre la rotation de l'outil pour détruire la roche.
- Guider et contrôler la trajectoire de l'outil.
- Mettre du poids sur l'outil.
- Permettre la circulation du fluide de forage [5].

#### **4.2.1.1. Les tiges de forage (drill-pipes)**

Les tiges de forage, également appelées drill-pipes en anglais, sont des éléments essentiels dans les opérations de forage pétrolier. Cela se résume à suivant :

##### **4.2.1.1.1. Rôles**

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. Elles doivent travailler en tension pour éviter leur frottement contre les parois du puits, qui peuvent causer leur usure et les éboulements des parois, et la déviation [5].

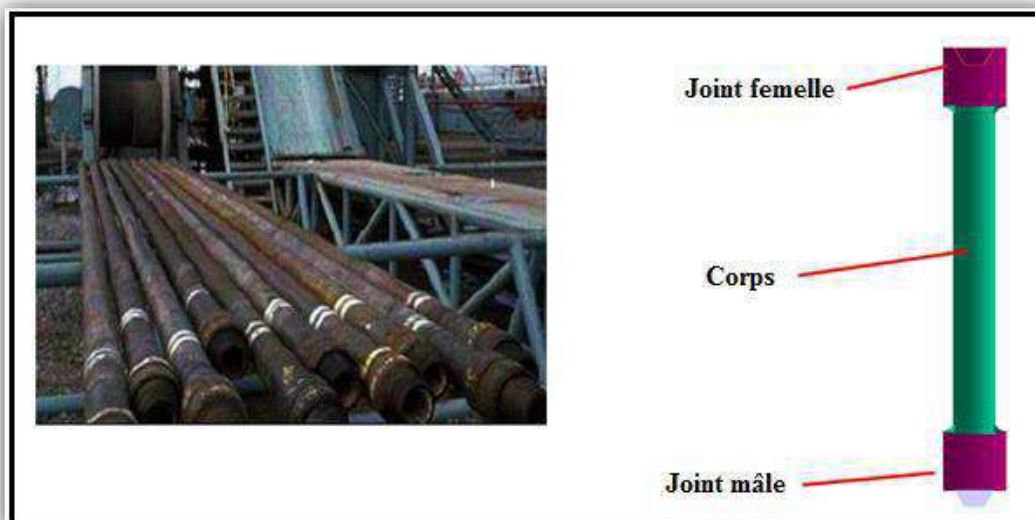


Figure I.12:Tige de forage [5].

#### 4.2.1.1.2 Caractéristiques

Les caractéristiques désignent les propriétés, les attributs ou les qualités distinctives d'un objet, d'un individu ou d'un système. Cela se résume à suivant :

##### a. Le diamètre nominal

C'est le diamètre extérieur du corps de la tige, exprimé en pouces [5].

##### b. Le grade

Détermine la qualité de l'acier et donne la résistance de la tige à la traction et à la torsion. Lorsqu'une tige subit un effort de traction, elle s'allonge ; si on ne dépasse pas une certaine valeur et si on relâche la force, la tige revient à sa position initiale : on dit que l'acier a travaillé dans le domaine élastique [5].

L'API a normalisée quatre grades d'acier pour tous les types de tiges de forage :

Tableau I.2: Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage [5].

	Limite élastique		Charge de rupture
	Minimal	Maximal	Minimal
Grade	Psi (MPa)	Psi (MPa)	Psi (MPa)
E	75 000 (517)	105 000 (724)	100 000 (690)
X-95	95 000 (655)	125 000 (862)	105 000 (724)
G-105	105 000 (724)	135 000 (931)	115 000 (793)
S-135	135 000 (931)	165 000 (1 138)	145 000 (1 000)

##### c. La gamme

Il existe 3 gammes de longueur de tige :

- Gamme 1: 5,50 m à 6,70 m (18ft à 22ft).
- Gamme 2: 8,25 m à 9,15 m (27ft à 30ft).
- Gamme 3: 11,60 m à 13,70 m (38ft à 45ft).

##### d. Le poids nominal

Exprimé en livres par pied, il indique le poids (Weight) du corps de la tige sans les Tools-joints [5].



Figure I.13:Tools-joints [5].

#### 4.2.1.2. Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly)

De longueur entre 200 et 300 mètres, il est constitué de tubes d'acier appelés les masses-tiges(drill-collars), de stabilisateurs et de l'outil de fond.

##### 4.2.1.2.1. Les masses tiges (drill-collars)

Les masses-tiges sont des tubes de fortes sections qui servent à appliquer du poids sur l'outil (Weight On Bit). Les masses tiges sont sollicitées en compression et en torsion [5].

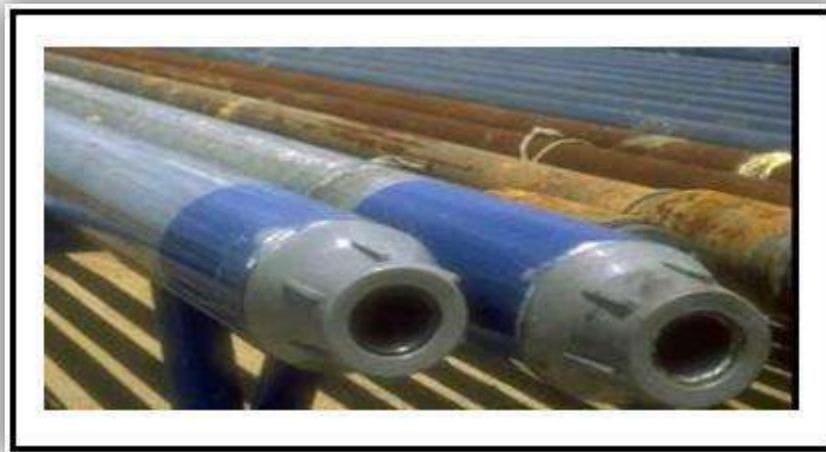


Figure I.14: Masses tiges [5].

##### a. Différents types de masse-tiges

Dans le domaine du forage pétrolier, il existe différents types de masse-tiges utilisés en fonction des besoins spécifiques du forage. Cela se résume à suivant :

- **Masse tiges lisses (slick drill-collars)**

Elles sont lisses sur toute leur longueur

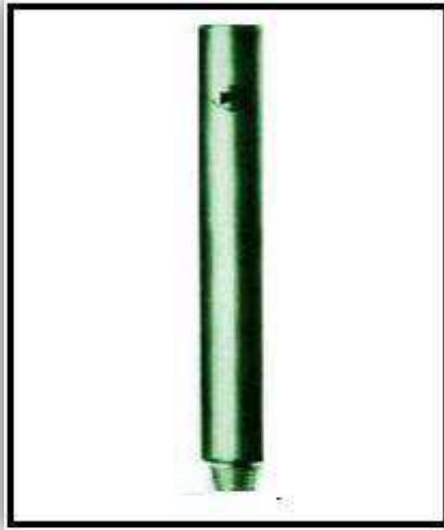


Figure I.15: Masse tiges lisses [5].

- **Masse tiges spiralés (spiral drill-collars)**

Elles réduisent le risque de coincement par pression différentielle en diminuant la surface de contact masse tige/trou [5].



Figure I.16: Masse tiges spiralées [5].

**b. les stabilisateurs**

Comme leur nom l'indique, ils sont incorporés à la garniture de forage et plus précisément au niveau des masses-tiges afin de garder et contrôler la trajectoire de l'outil, qu'elle soit verticale



où inclinée [5].

Figure I.17: Stabilisateurs [5].

**c. Le trépan**

C'est l'outil qui assure sous l'effet du poids du train de sonde et de rotation la destruction Desroches [5].



Figure I.18: Le trépan [5].

### **3. Conclusion**

Le forage pétrolier est une activité vitale pour l'industrie de l'énergie, Cette pratique complexe nécessite une combinaison de techniques avancées telles que le forage rotatif et d'expertise pour atteindre les réserves souterraines, évaluer les formations géologiques et récupérer les hydrocarbures de manière efficace et sécurisée.



*Chapitre II :*  
*Paramètres de forage*

## **1. Introduction**

Les compagnies pétrolières cherchent à améliorer leur processus de forage en optimisant les différents paramètres de forage afin de raccourcir le temps de forage et de réduire les coûts. L'optimisation de ces paramètres à plusieurs objectifs, notamment atteindre la cible de forage, augmenter la vitesse de forage, améliorer la durée de vie de l'outil et réduire la puissance et la consommation d'énergie.

## **2. Paramètres de forage**

Pour une exploration pétrolière réussie, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres essentiels à l'atteinte des objectifs de production d'hydrocarbures.

Il peut être divisé en deux grandes catégories :

Les paramètres hydrauliques et les paramètres mécaniques [12].

### **2.1. Les paramètres mécaniques**

Les paramètres en question résultent des processus mécaniques appliqués à la roche lors du forage, tels que l'exercice de pression et de traction pour progresser.

En d'autres termes, ils sont le résultat d'actions mécaniques sur la formation rocheuse au cours du processus de forage [13].

#### **2.1.1 vitesse d'avancement (ROP)**

Le taux d'avance, également connu sous le nom de ROP (taux de pénétration), mesure la vitesse à laquelle un trépan avance à travers une formation rocheuse. Il est essentiel dans l'industrie du forage car il affecte directement le temps de forage et les coûts associés. Une vitesse d'avancement plus élevée réduit le temps nécessaire pour atteindre une certaine profondeur, ce qui entraîne des économies de coûts importantes. Le taux de progression dépend de facteurs tels que la dureté de la formation rocheuse, les paramètres de forage et les caractéristiques de l'outil de forage. L'optimisation de ces paramètres augmente la vitesse de progression et améliore l'efficacité du processus de forage [14].

#### **2.1.2. Poids sur l'outil (weight on bit (WOB))**

Le Poids sur l'outil représente un effort longitudinal de compression suivant l'axe de révolution du trépan cet effort permet aux taillants de s'incruster dans la roche et il est souvent utilisé de façon à tirer profit du poids des masses tiges. La valeur du poids dépend de la dimension et du type de trépan, de sa vitesse de rotation et du type de formation à forer.

Le poids sur l'outil (WOB) c'est un paramètre calculer selon un principe physique, prend en considération le poids de la garniture libre (WOH<sub>L</sub>) et le poids de la garniture durant le forage (WOH<sub>F</sub>) [12].

$$WOB = WOH_L - WOB_F \dots \dots \dots (II.1)$$

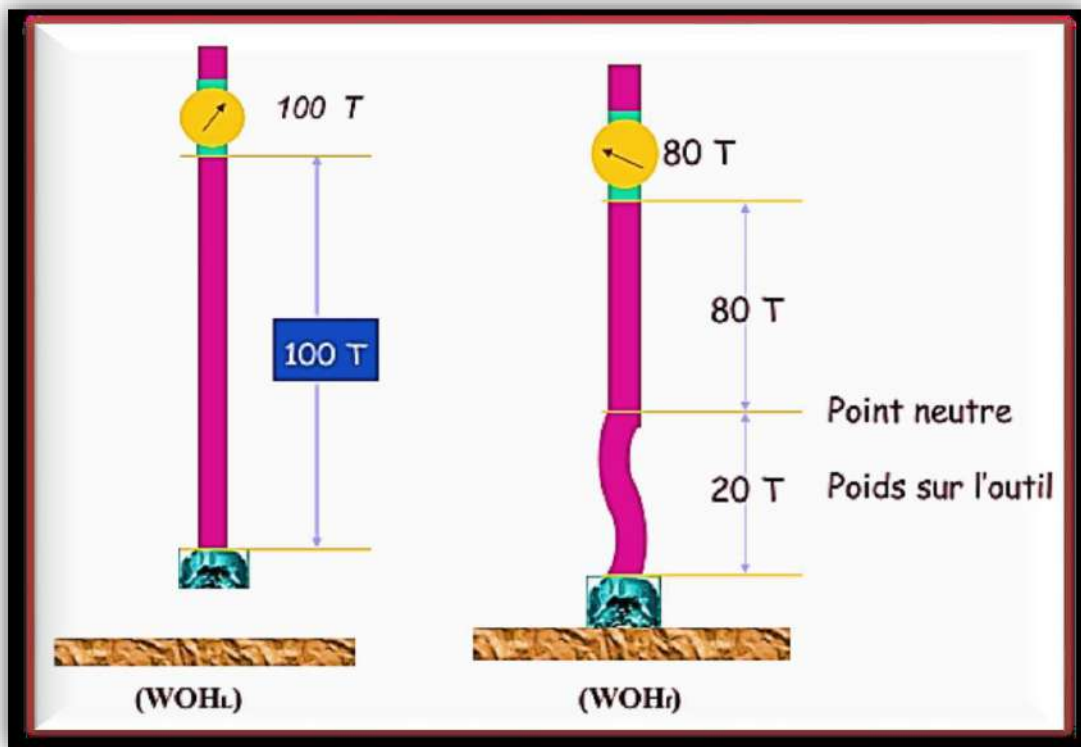


Figure II.19: Poids sur l'outil [12].

### 2.1.3 La vitesse de rotation (RPM)

La vitesse de rotation d'un outil autour de son axe de révolution, qui est appliquée pour rogner une surface, est déterminée par l'option de poids sur le bit (WOB). La vitesse de l'outil peut être différente au fond du puits par rapport à la surface en raison de la grande flexibilité du système. La vitesse de rotation est augmentée en fonction de la dureté de la formation et du paramètre

Découple, mais elle peut également être limitée par les vibrations qui affectent le train de tiges.

Ces vibrations peuvent provoquer des résonances, ce qui peut entraîner fatigue et casse [12].



Figure II.20: Capteur de fréquence RPM [12].

#### 2.1.4. Outils de forage

Les dimensions et l'épaisseur des différents composants de l'outil de forage sont déterminées par le type de formation à forer. Lors du forage de formations molles nécessitant moins de poids, les roulements, les cônes et les pieds de l'outil sont plus petits et plus fins. Cette conception offre plus d'espace pour accueillir des articles de coupe longs et fins. En revanche, les outils de forage pour les formations rigides qui nécessitent des poids plus lourds ont des éléments de coupe plus courts, des roulements plus grands et des corps plus solides [15].

Pour répondre aux différents besoins de forage, les fabricants ont créé plusieurs types d'outils de forage, chacun conçu spécifiquement pour un type de formation particulier.

##### 2.1.4.1. Les outils à molettes (Tricône bit)

Le tricône (outil à 3 molettes)

Les éléments de coupe font partie de la molette, ils ce sont :

- Des dents usinées dans le cône.
- L'outil à picots de carbure de tungstène fut initialement conçu pour forer les formations très dures et abrasives là où les outils à dents ne pouvaient forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible.

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.

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). 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[16].

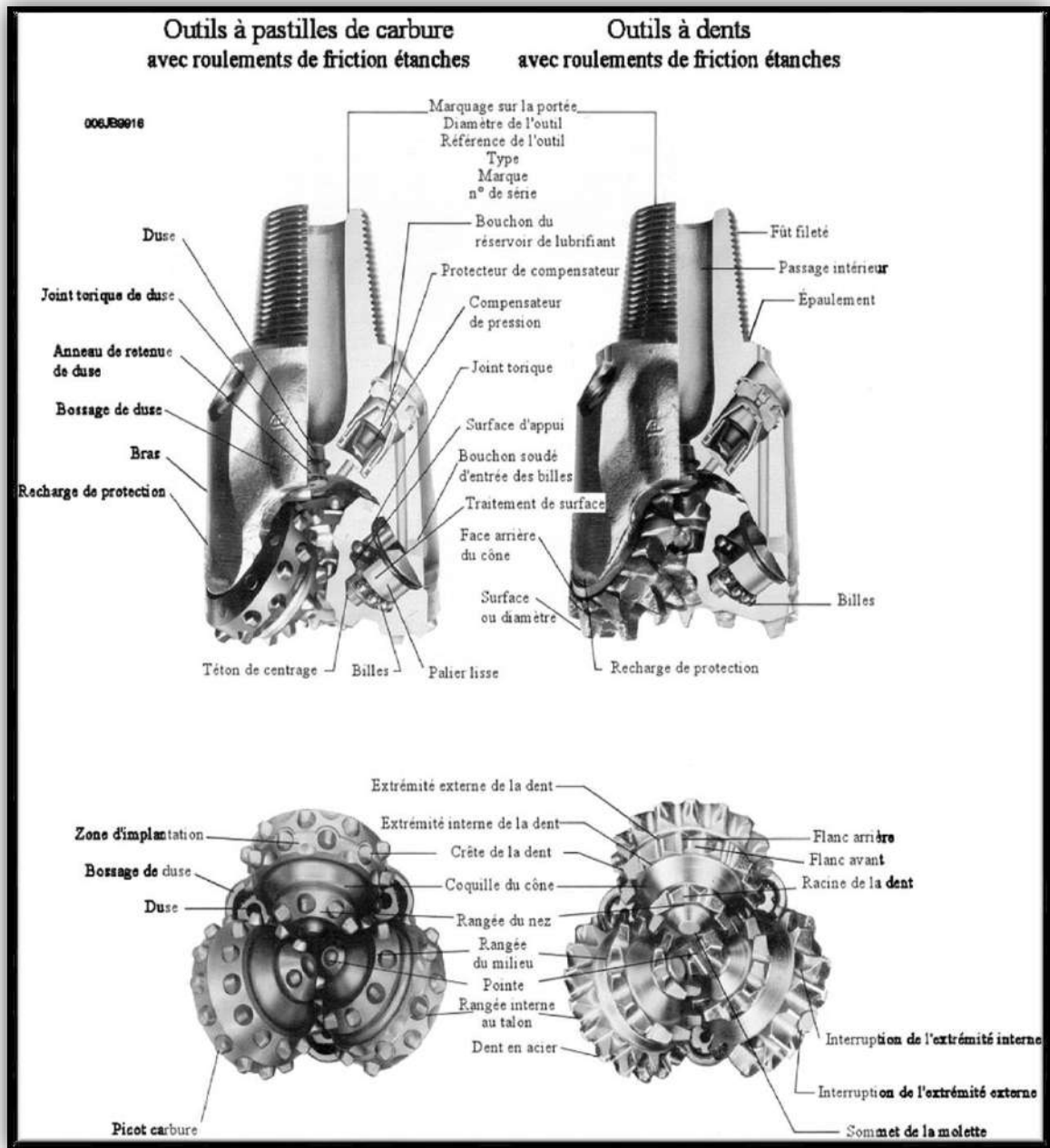


Figure II.21: Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes [16].

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 coté 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 de manière à supporter des poids importants [16].

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.

#### **2.1.4.2. Les outils diamants**

Il existe deux catégories d'outils diamantés cités Cela se résume à suivant :

##### **a. 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 = 0.2gramme) [17].

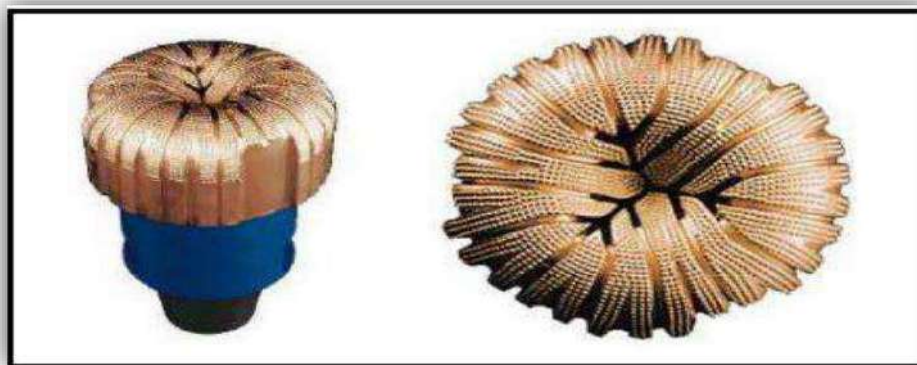


Figure II.22:Outil à diamant naturel [17].

##### **c. Les outils à diamante synthétique**

On distingue deux types. Cela se résume à suivant :

- **Les outils PDC (Poly cristalline Diamant 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 [17].



Figure II.23: Les Outils PDC [12].

C'est General Electric qui a mis au point la synthétisation de ces pastilles diamantée constitués 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 [17].

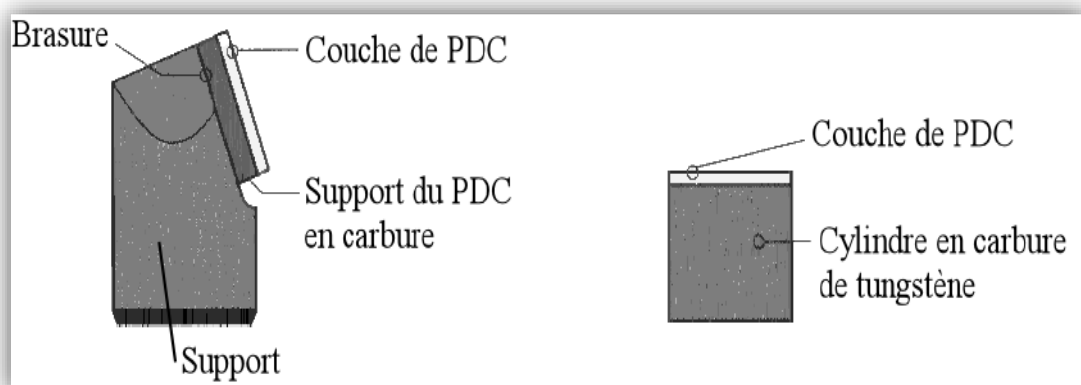


Figure II.24: Les dents (Cutters) des Outils PDC [18].

- **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 [5].

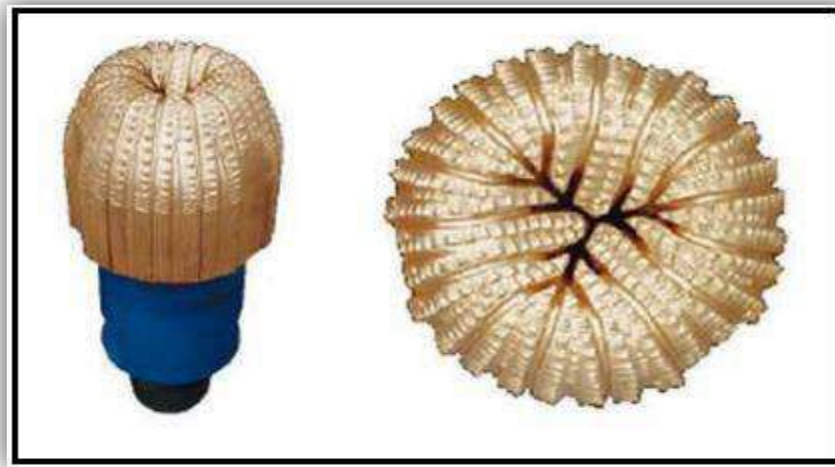


Figure II.25: Outils TSP [5].

- **Les outils imprégnés**

Ce type d'outil comporte des lames en carbure de tungstène imprégnées de petits grains de diamants permettant de creuser à travers des roches très dures. Le carbure de tungstène s'use sur la surface de coupe et les grains de diamants usés tombent, faisant place à des grains non usés. Cette technologie permet de améliorer la durée de vie et le métrage foré de l'outil. Les outils imprégnés nécessitent une grande vitesse de rotation et peu de poids sur l'outil (WOB) pour avoir un avancement acceptable. Pour optimiser la performance des imprégnés il faut les coupler avec des moteurs (PDM) High Speed ou avec des turbines [5].





Figure II.26: Les Outils imprégnés [5].

## **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 [19].

### **2.2.1. Débit et pression d'injection**

Le débit et la pression d'injection de la boue sont des paramètres critiques pour assurer un écoulement adéquat sur l'outil de coupe, refroidir les éléments de coupe et permettre un nettoyage efficace du puits. Un débit insuffisant peut causer une surchauffe de l'outil et une inefficacité de fragmentation, tandis qu'un débit excessif peut entraîner des problèmes de pression et de circulation de la boue. De même, une pression inappropriée peut affecter la circulation de la boue et entraîner des problèmes dans le trou de forage. Il est recommandé de surveiller en continu le débit et la pression d'injection, et de les ajuster en fonction des conditions spécifiques du puits et de la roche à forer. En faisant cela, les opérateurs de forage peuvent optimiser les performances du processus de forage et garantir un refroidissement adéquat de l'outil, un écoulement suffisant et un nettoyage efficace du puits [12].

### **2.2.2. Vitesse minimale aux dusses**

La vitesse minimale du jet de boue est un paramètre important pour assurer un nettoyage efficace du fond du puits et pour créer une turbulence suffisante afin de laver la denture de l'outil de coupe. La détermination de la vitesse minimale du jet de boue peut se faire par des essais sur le terrain, des modèles de calcul ou des recommandations spécifiques du fabricant

de l'outil de coupe. Il est important de noter que cette vitesse peut varier en fonction des conditions de forage spécifiques [12].

### **2.2.3. La nature de fluide de forage**

Le type de boue est choisi en fonction des performances recherchées et désigne les propriétés physico-chimiques du fluide de forage. Trois types de boues sont souvent employés : la boue à base d'eau (Water Based Mud, WBM), la boue à base d'huile (Oil Based Mud, OBM) et la boue synthétique (Synthetic Based Mud, SBM). Une boue synthétique est constituée d'un mélange d'eau et d'additifs chimiques [12].

### **2.2.4 Les caractéristiques de la boue**

La boue de forage, est un fluide utilisé dans les opérations de forage pétrolier. et possède caractéristiques. Cela se résume à suivant :

#### **2.2.4.1. Densité**

La densité de boue est la mesure de la masse de la boue par unité de volume et elle joue un rôle crucial dans le processus de forage. Elle est ajustée en utilisant des additifs appropriés pour répondre aux exigences spécifiques du forage et pour assurer un forage efficace et sécurisé [7].

#### **2.2.4.2. Viscosité**

La viscosité est un paramètre essentiel dans les opérations de forage car elle affecte directement le transport des déblais de forage, la circulation de la boue dans le puits et l'efficacité globale du processus de forage.

La viscosité de la boue est généralement mesurée en unités de poises (P) ou de centpoises (Cp). Elle peut être mesurée à l'aide d'un viscosimètre, un instrument conçu spécifiquement pour évaluer la viscosité des fluides.

Il est important de noter que la viscosité de la boue doit être ajustée en fonction des caractéristiques spécifiques du puits, de la nature de la formation géologique et des objectifs du forage. Les ingénieurs et les opérateurs de forage surveillent et contrôlent régulièrement la viscosité de la boue pour maintenir des conditions optimales de forage [7].

### **3. Conclusion**

Les paramètres de forage jouent un rôle essentiel dans l'industrie du forage, Ces paramètres déterminent l'efficacité et la sécurité du processus de forage, ainsi que la qualité du trou de forage et la récupération des échantillons de terrain, Ces paramètres de forage doivent être ajustés en fonction des conditions géologiques spécifiques du site et des objectifs du projet. Les ingénieurs de forage et les spécialistes utilisent leur expertise et des données géotechniques pour déterminer les meilleurs paramètres de forage afin d'atteindre les résultats souhaités de manière sûre et efficace.

***Chapitre III :***  
***Méthodes les plans d'expériences***

## **1. Introduction**

Les plans d'expérience sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité.

## **2. Objectives**

La méthode des plans d'expériences vise effectivement à minimiser le nombre d'expériences nécessaires tout en maximisant les informations obtenues à partir des données collectées.

Ses principaux :

- Objectifs incluent.
- L'amélioration des processus.
- L'identification des facteurs significatifs.
- La détection des interactions entre les facteurs.

La recherche des paramètres optimaux et la prédiction des valeurs attendues des résultats.

Dans le contexte spécifique de l'optimisation du forage pétrolier, l'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences permet d'améliorer le taux de réussite de l'opération, d'augmenter l'efficacité et de réduire les coûts. En optimisant les paramètres d'excavation, il devient possible de modéliser des phénomènes complexes à travers des expériences contrôlées, ce qui est souvent plus pratique et économique que de les étudier directement sur le terrain.

Les plans d'expériences offrent une approche structurée pour organiser les expérimentations de manière efficace et économique. Ils permettent de déterminer les facteurs ou combinaisons de facteurs influents sur la réponse du système étudié, ce qui permet de focaliser les efforts sur les variables les plus pertinentes.

L'intérêt majeur des plans d'expériences réside dans leur capacité à optimiser le nombre d'expérimentations nécessaires pour obtenir des résultats fiables. En planifiant les expériences de manière adéquate, il devient possible de réaliser une analyse statistique relativement simple des résultats, ce qui facilite leur interprétation et permet de prendre des décisions éclairées[21].

## **3. Vocabulaire des plans d'expériences**

Avant de se lancer dans l'étude de plans d'expériences, il est nécessaire de définir le vocabulaire que nous allons utiliser.

### 3.1. 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 d'un ou de plusieurs facteurs.

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 27). 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 [22].

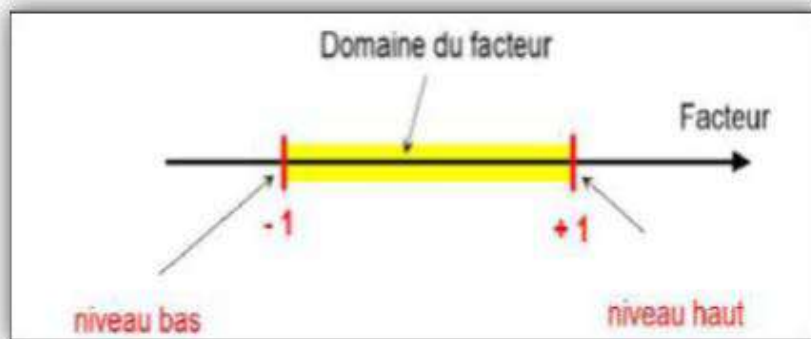


Figure III.27: Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1) [22].

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

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 [22].

Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure 28).

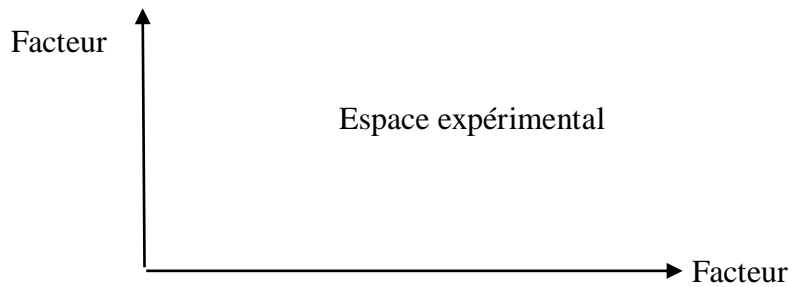


Figure III.28: Représentation de l'espace expérimental [22].

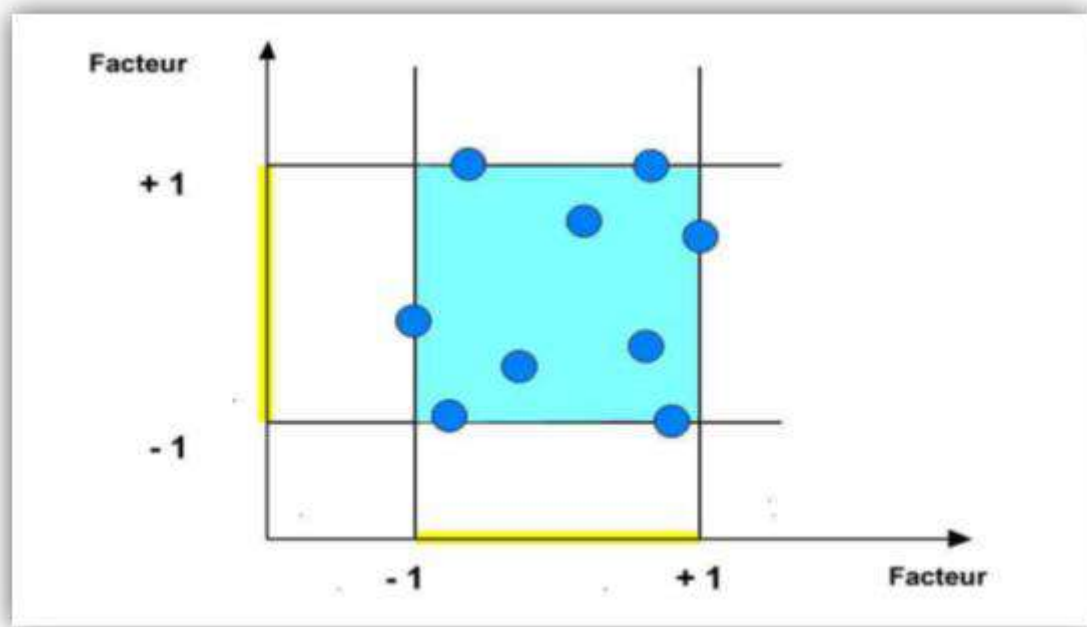


Figure III.29: Les points expérimentaux [22].

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le domaine d'étude (Figure 29). Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs. Supposons que le second facteur soit la surcharge du véhicule définie comme toute masse supplémentaire à celle du véhicule et du chauffeur. Le niveau bas de la surcharge est 0 kg et le niveau haut 300 kg, par exemple.

S'il n'y a pas de contraintes, le domaine d'étude est représenté par tous les points dont les surcharges sont comprises entre 0 et 300 kg et dont les vitesses sont comprises entre 80 et 120 km/h [22].

### 3.2. Notion de surface de réponse

Les niveaux XI représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure30). Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences [22].

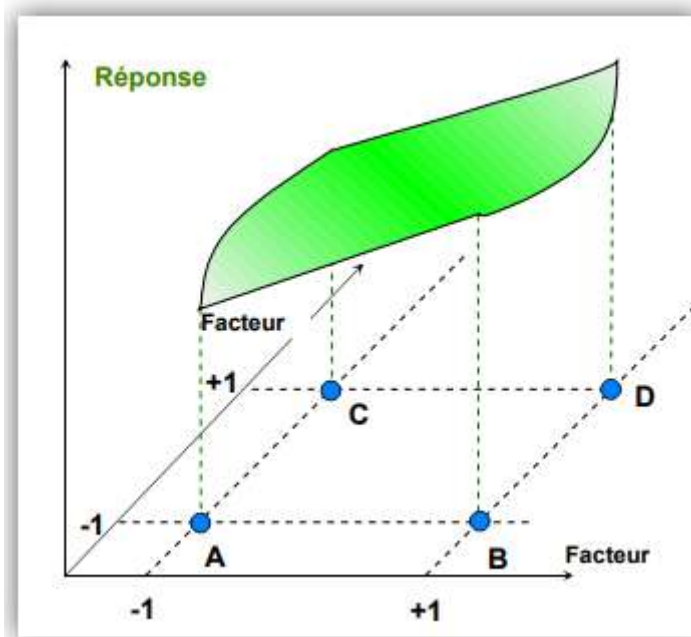


Figure III.30: Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface [22].

### 3.3. Notion de 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 Laurine. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé [22].



$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \dots \dots \dots \text{ (III.2)}$$

Où

- $Y$  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.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

Ce modèle est appelé "**modèle postulé**" ou "**modèle a priori**" [22].

### 3.4. Le modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit.

Le premier complément est le "**manque d'ajustement**". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (**lack of fit** en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée  $e$  [22].

Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \dots \dots \dots \text{ (III.3)}$$

### 3.5. Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, 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). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle [22].

$$y = x_a + e \dots\dots\dots(III.4).$$

Où

**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 à  $p$  inconnues. 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 :  $\hat{a}$

$$\hat{a} = (x'x)^{-1} x'y \dots\dots\dots(III.5).$$

De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients [22].

## **4. Les plans d'expériences**

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent. Il en existe plusieurs types, dont les suivants

### **4.1. Plans factoriels**

Les plans factoriels sont des méthodes statistiques utilisées dans la conception et l'analyse d'expériences pour étudier l'effet de plusieurs facteurs sur une variable de réponse. Ils consistent à manipuler de manière systématique les niveaux des différents facteurs. Un plan factoriel est caractérisé par le nombre de facteurs étudiés, le nombre de niveaux pour chaque facteur et la répartition des différentes combinaisons de niveaux dans l'expérience. Il existe deux types principaux de plans factoriels :

Les plans factoriels complets à deux niveaux : Ces plans utilisent deux niveaux pour chaque facteur, Ils impliquent toutes les combinaisons possibles de niveaux des facteurs, ce qui signifie que chaque combinaison est testée lors de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés pour étudier à la fois des variables continues et des variables discrètes.

Les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux ( $2^{k-p}$ ) : Ces plans sont des versions réduites des plans factoriels complets. Ils permettent d'étudier tous les facteurs, mais avec moins d'essais que les plans complets. Ils utilisent des artifices mathématiques pour regrouper les coefficients de manière à réduire le nombre d'inconnues dans le système d'équations résultant de l'expérimentation. Ces plans sont utiles lorsque le nombre de facteurs est élevé et qu'il est difficile ou coûteux de réaliser un plan factoriel complet.

En résumé, les plans factoriels sont des outils puissants pour la conception et l'analyse d'expériences. Les plans factoriels complets à deux niveaux impliquent toutes les combinaisons possibles de niveaux des facteurs, tandis que les plans factoriels fractionnaires permettent d'étudier tous les facteurs avec moins d'essais. Ces plans peuvent être utilisés pour étudier à la fois des variables continues et des variables discrètes [22].

#### **4.2. Le 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 utilisé.

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 fractions[23].

#### **4.3. Plans de surfaces et de réponse RSM (response surface méthodologie)**

La méthodologie de surface de réponse (RSM) 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.

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 [20].

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 :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \dots\dots\dots(III.6).$$

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

**f:** est l'inconnu fonction de réponse.

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

**k:** est le nombre de variables indépendantes.

**$\varepsilon$ :** est l'erreur statistique qui représente d'autres sources de variabilité non prises en compte par.

Ces sources incluent les effets tels que la mesure erreur. On suppose généralement que  $\varepsilon$  a une distribution normale avec une moyenne nulle et une variance [23].

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 continuées 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.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{j>1}^k a_{ij} x_i x_j \dots\dots\dots (III.7).$$

Où « y » est la réponse et les  $x_i$  (1, 2, ..., k) sont les niveaux codés de k variables quantitatives.

Le coefficient  $a_0$  est le terme libre, les coefficients  $a_i$  sont les termes linéaires, les coefficients  $a_{ii}$  sont les termes quadratiques et les coefficients  $a_{ij}$  sont les termes d'interaction.

Les équations reliant la réponse aux variables sont puis dérivées en déterminant les valeurs des coefficients en utilisant la méthode des moindres carrés (MLS). MLS est une technique de régression multiple [23].

#### **4.4. Plans de Box-Behnken**

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (figure 31). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. La matrice du (Tableau 03) indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre

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'iso variance par rotation

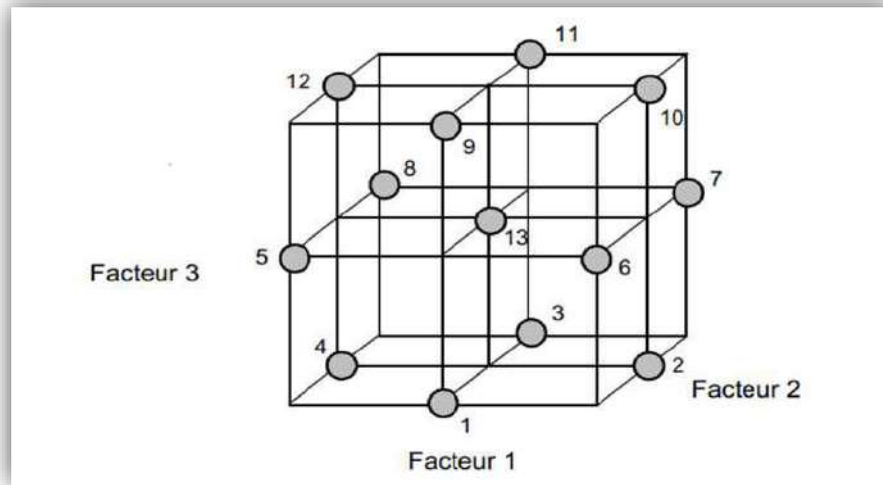


Figure III.31: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [22].

Tableau III.3: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [22].

<i>N essai</i>	<i>Facteur 1</i>	<i>Facteur 2</i>	<i>Facteur 3</i>
<i>1</i>	<i>0</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>
<i>2</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>-1</i>
<i>3</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>-1</i>
<i>4</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>-1</i>
<i>5</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>
<i>6</i>	<i>1</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>
<i>7</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
<i>8</i>	<i>-1</i>	<i>1</i>	<i>0</i>
<i>9</i>	<i>0</i>	<i>-1</i>	<i>1</i>
<i>10</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>11</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>12</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
<i>13</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

#### 4.5. Les plans composites

Un plan composite est constitué de trois parties : 1. Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux. 2. Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude. 3. Des points axiaux. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs. La Fig31 représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan 22. 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 [22].

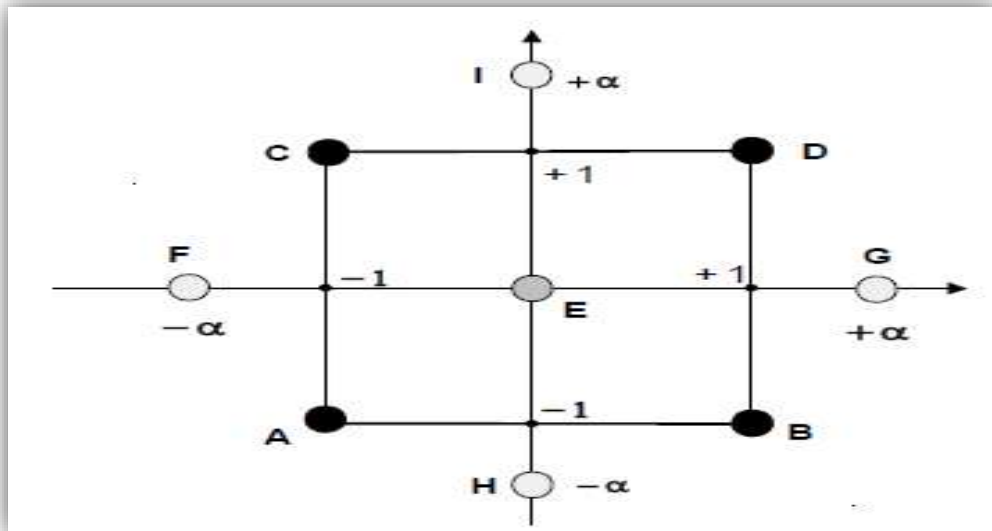


Figure III.32: Plan composite pour deux facteurs [22].

Les coordonnées des points en étoile dépendent du critère d'optimalité choisi (annexe 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 [22].

## 5. 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'information 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 [23].

## **6. Conclusion**

Les plans d'expériences, sont des outils essentiels dans le domaine de la recherche et du développement. Ils permettent de planifier de manière systématique les expériences afin de maximiser l'efficacité des ressources et d'obtenir des résultats précis et significatifs. Au cours de ce chapitre, nous avons exploré les principes fondamentaux des plans d'expériences. Nous avons examiné les différents types de plans d'expériences, tels que les plans factoriels, les plans de surface de réponse, et les plans de Taguchi, et nous avons discuté de leurs avantages et de leurs limitations.



*Chapitre IV :*  
*Optimisation des paramètres de forage*

## 1. Introduction

L'objectif principal de cette étude est d'explorer expérimentalement l'effet des paramètres examinés sur le taux de pénétration, et d'analyser les résultats obtenus à l'aide de la méthode de surface de réponse. Dans ce chapitre, nous présenterons tous les résultats obtenus, ainsi que les discussions qui en découlent. L'utilisation de plans d'expériences était un moyen de minimiser le nombre d'expériences à réaliser, de mettre en évidence l'effet des paramètres étudiés et de déduire les conditions optimales dans le domaine d'étude défini.

## 1. Matériels et methods

Les essais ont été réalisés à l'aide d'une foreuse rotative dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 :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 expériences ont été réalisées sur un type de roche calcaire extrait de la carrière d'El Ghedir de la région de Skikda. Cette roche présente une résistance à la compression de 640 kg/cm<sup>2</sup>. Les échantillons prélevés pour les expériences avaient une taille de 30 cm x 30 cm x 4 cm. La figure 33 montre la roche utilisée lors des tests.



Figure IV.33: Roche calcaire.

L'outil utilisé pour effectuer les tests est un outil de type PDC. Les valeurs pour chaque paramètre d'étude sont données dans le tableau 5 :

Tableau IV.5: Valeurs des paramètres.

Paramètres	Unité	Symbole	Valeurs		
Poids sur l'outil	Kgf	WOB	80	120	160
Vitesse de rotation	Tr/min	RPM	118	135	152
Angle de coupe	Degré	$\beta$	3	8	45

Le nombre d'essais réalisés suivant la méthode RSM est donné par la formule suivante :

$$N = 2^k + 2k + n_0 \dots \dots \dots (IV.8).$$

$$N = 2^3 + 2(3) + 6 = 20 \text{ essais} \dots \dots \dots (IV.9).$$

Avec, k est le nombre des niveaux de chaque facteur, et  $n_0$  est le nombre d'essais des valeurs centrales.

- **Design-Expert 11** est un logiciel de conception et d'analyse des plans d'expériences (DOE), Inc. C'est une large utilisation dans le domaine de la recherche industrielle et scientifique pour planifier, réaliser et analyser des expériences visant à optimiser les processus. Il offre des fonctions pour optimiser le processus, améliorer les produits et prédétermine les décisions prises sur la base de l'analyse statistique des données d'expériences.

Les résultats des essais qui donnent les valeurs de la réponse ROPet selon la méthode choisie en utilisant le logiciel DESIGN EXPERT11, sont montrées sur le tableau 6.

Tableau IV.6: Présentation des valeurs de la réponse ROP.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Response 1
Run	A : WOB	B : RPM	C: $\beta$	ROP
	Kgf	tr/min	°	mm/s
1	120	135	8	2.17
2	80	152	45	2.02
3	80	118	3	0.71
4	160	118	45	1.34
5	160	135	3	2.02
6	120	135	8	2.17
7	120	152	3	2.01
8	120	135	8	2.17
9	80	152	8	1.92
10	120	135	8	2.17
11	120	118	3	1.6
12	160	118	8	2.43
13	160	152	8	3.18
14	80	152	3	1.48
15	80	135	8	1.86
16	160	135	3	2.02
17	120	152	45	3.02
18	160	152	8	3.18
19	160	135	45	3.01
20	80	118	45	0.96

### 3. Traitement statistique des données

L'analyse statistique des données est se fait par l'approche ANOVA (Analysais Of Variance) qui basé 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. Le tableau 7 présente les résultats de traitement statistique des données pour un niveau de signification  $\alpha=5\%$ , et un niveau de confiance 95%[24].

Tableau IV.7: Les résultats de traitement statistique des données pour ROP.

Source	Sum of Squares	Df	Meany Square	P-value	
<b>Model</b>	8.10	9	0.9004	< 0.0001	Significant
A-WOB	3.03	1	3.03	< 0.0001	Significant
B-RPM	3.27	1	3.27	< 0.0001	Significant
C- $\beta$	0.5674	1	0.5674	<0.0106	Significant
AB	0.1540	1	0.1540	0.1337	
AC	0.0277	1	0.0277	0.5043	
BC	0.6167	1	0.6167	<0.0085	Significant
A <sup>2</sup>	0.0068	1	0.0068	0.7392	
B <sup>2</sup>	0.0000	1	0.0000	0.9845	
C <sup>2</sup>	1.03	1	1.03	<0.0018	Significant
<b>Résiduel</b>	0.5780	10	0.0578		
<b>Cor Total</b>	8.68	19			

Le tableau 7 montre que la somme des carrés due à l'erreur (résiduel) 0.5780 est très faible devant la somme totale 8.68. Ceci indique que le modèle semble être maintenant bien ajusté. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par P-value. La valeur P (P-value) du modèle de 0.0001 indique que le modèle est significatif. Les valeurs de p inférieures à 0,0500 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, les termes A, B, C, BC, C- $\beta$  et C<sup>2</sup> sont significatifs. L'analyse de la variance confirme que le modèle est bien ajusté.

### 3.1 Statistiques d'ajustement ROP

Le coefficient de corrélation linéaire multiple quantifie de manière claire la très bonne qualité de l'ajustement, et l'expérience a donné bons résultats, puisque  $R_2 = 0.9334$ .

$R^2$  est un indice qui mesure la qualité du modèle. Une valeur élevée de  $R^2$  indique que le modèle est plus adéquat. En d'autres termes, plus  $R^2$  se rapproche de 1, la qualité du modèle est meilleure.

### 3.2. Équation de la réponse ROP

Le modèle mathématique en terme codés pour la progression de ROP est donné par l'équation développée suivante :

$$\mathbf{ROP} = 3.1528 + 0.534855 * A + 0.573423 * B + 0.231607 * C + 0.139655 * AB + 0.0571642 * AC + 0.275003 * BC + -0.0420713 * A^2 + 0.00244342 * B^2 + (-1.25478 * C^2) \dots\dots\dots$$

(IV.10).

L'équation codée est utile pour identifier l'impact relatif des facteurs en comparant les coefficients des facteurs.

Les modèles mathématiques réels pour la progression ROP sont donnés par les équations développées suivante :

$$\mathbf{ROP} = 0.885339 + -0.00967682 * WOB + -0.0116846 * RPM + 0.035444 * \beta + 0.000205375 * WOB * RPM + 6.80526 * 10^{-5} * WOB * \beta + 0.000770318 * RPM * \beta + -2.62946 * 10^{-5} * WOB^2 + 8.45473 * 10^{-6} * RPM^2 + -0.0028453 * \beta^2 \dots\dots\dots$$

(IV.12).

L'équation en termes de facteurs réels peut être utilisée pour faire des prévisions sur la réponse pour des niveaux donnés de chaque facteur. Ici, les niveaux doivent être spécifiés dans les unités d'origine de 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 prendre en compte les unités de chaque facteur et l'interception ne se situe pas au centre de l'espace de conception.

### 3.3. Validation des résultats obtenus

La figure 33 présente la ROP prévue en fonction de la ROP réelle (mesurée). La ligne de régression droite présente la réponse ROP théorique et le nuage des points présente les valeurs de ROP obtenues (mesurées) à partir de l'expérience.

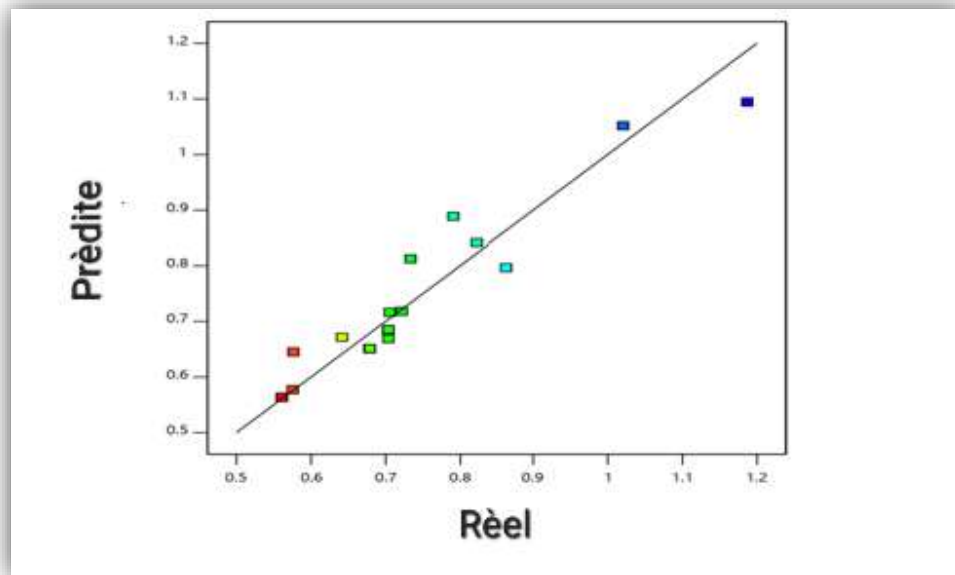


Figure IV.34: ROP prévu en fonction de ROP réel.

D'après la figure ci-dessus on observe que le nuage des points est concentré au tour de la ligne de régression, ce qui indique que des valeurs réelles sont très proches aux valeurs prévues. Ces résultats confirment que le modèle est de bonne qualité d'ajustement, et bien approprié pour prévoir le comportement de la réponse ROP.

## 4. Influence des paramètres étudiés sur le ROP

Pour étudier le développement de ROP face aux variations des différents facteurs, on doit analyser les courbes d'influence de ces facteurs sur le ROP.

- L'effet de WOB sur le ROP

La courbe de la figure 34 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction du Poids sur l'outil (WOB) pour  $RPM=135tr/min$  et  $\beta = 24^{\circ}$ .

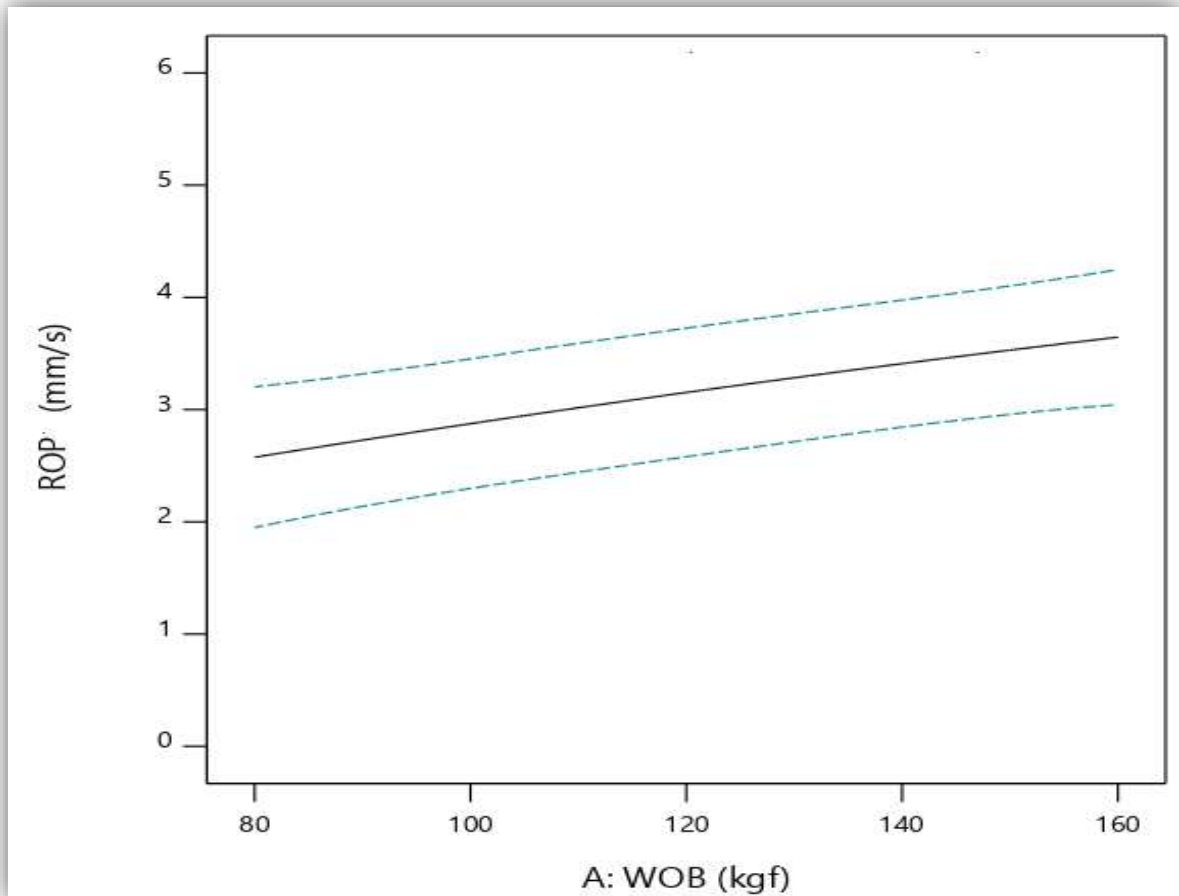


Figure IV.34 :L'effet de WOB sur le ROP.

On remarque qu'il y a une relation proportionnelle entre le développement du taux d'avancement de l'outil et la variation du poids d'une façon que la valeur ROP augmente avec l'augmentation du poids WOB.



- L'effet de RPM sur le ROP

La courbe de la figure 35 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction la vitesse de rotation (RPM) pour WOP= 120kgf et  $\beta = 24^\circ$ .

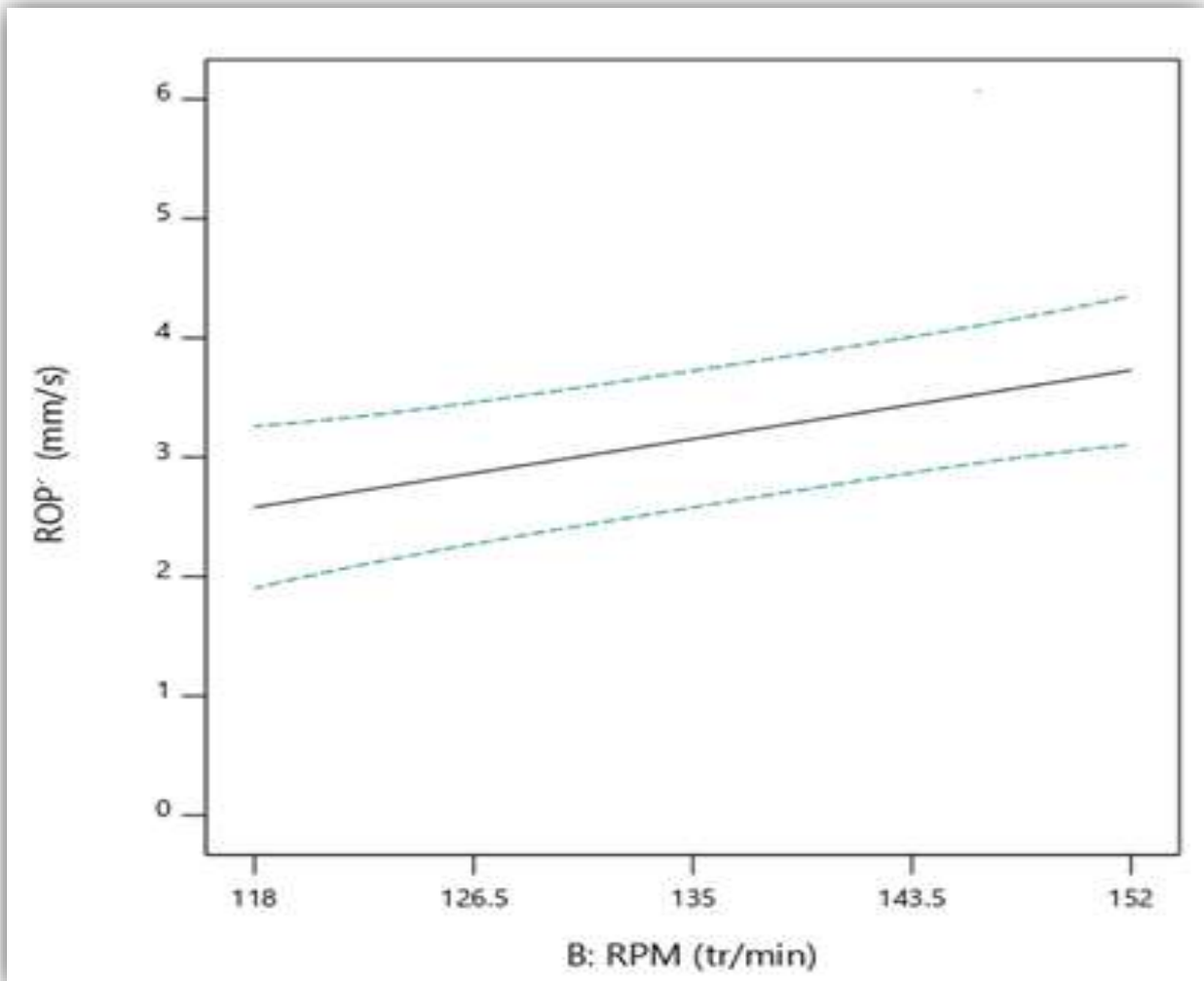


Figure IV.35: L'effet de RPM sur le ROP.

On remarque qu'il y a une relation proportionnelle entre le développement du taux d'avancement de l'outil et la variation du poids d'une façon que la valeur ROP augmente avec l'augmentation du RPM.

- L'effet de  $\beta$  sur le ROP

La courbe de la figure 36 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction de l'angle de coupe  $\beta$  pour RPM=135tr/min et WOB=120kgf.

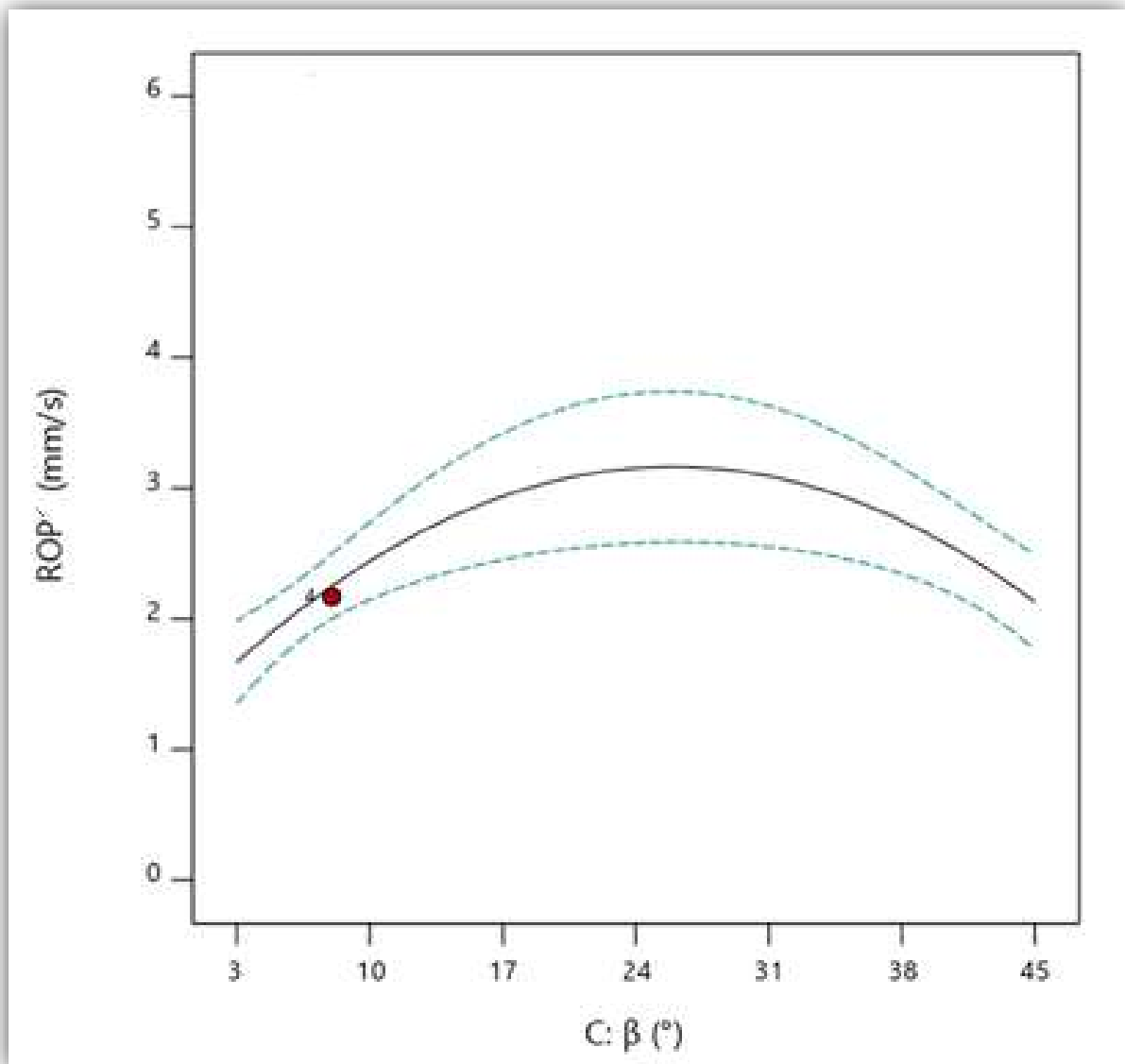


Figure IV.36: L'effet de  $\beta$  (°) sur le ROP.

La courbe, semble y avoir une relation progressive entre l'angle de coupe  $\beta$  (°) et la valeur de ROP (vitesse de pénétration). Lorsque  $\beta$  augmente, la valeur de ROP augmente également

jusqu'à atteindre la valeur  $24^\circ$  de  $\beta$ , où la valeur de la ROP commence une progression diminutive.

- **Les effets de WOB et RPM sur le ROP**

La courbe de la figure 37 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction du Poids sur l'outil (WOB) et la vitesse de rotation (RPM).

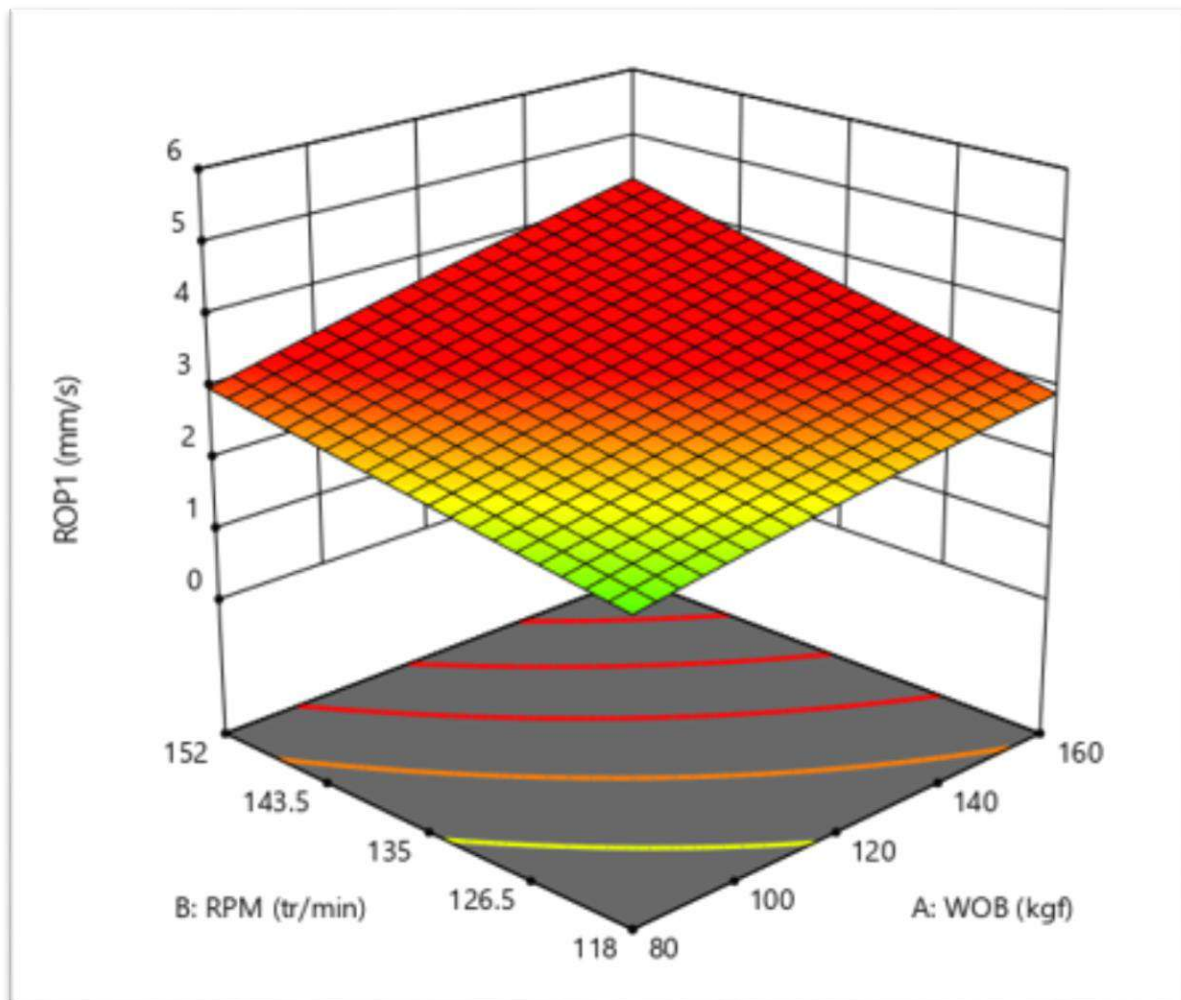


Figure IV.37: L'effet de RPM et WOB sur le ROP.

On remarque qu'il y a une relation proportionnelle entre le développement du taux d'avancement de l'outil (ROP) et la variation du poids (WOB) et la vitesse de rotation (RPM) d'une façon que la valeur ROP augmente avec l'augmentation du poids WOB et RPM. Une valeur maximale de ROP = 4,5 (mm/s) lorsque RPM = 152 (tr/min) et WOB = 160 kgf.

- Les effets de WOB et  $\beta$  sur le ROP

La courbe de la figure 38 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction du Poids sur l'outil (WOB) et l'angle de coupe ( $\beta$ ).

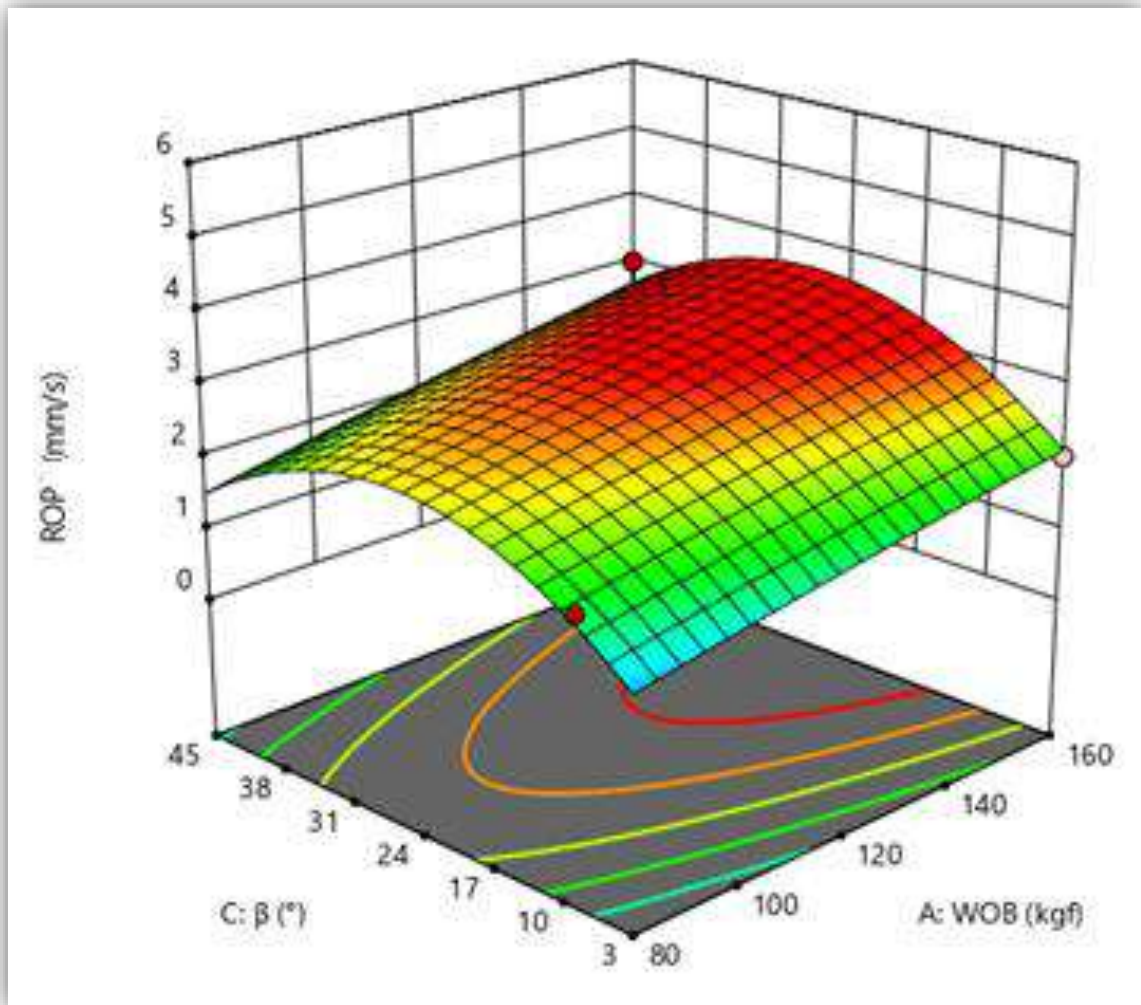


Figure IV.38: l'effet de  $\beta$  (°) et WOB sur le ROP.

D'après la figure ci-dessus, une relation progressive entre l'angle de coupe  $\beta$  (°), le WOB, et la valeur de ROP (vitesse de pénétration) est constatée. Lorsque  $\beta$ , le WOB augmentent, la valeur de ROP augmente également jusqu'à atteindre un point où ROP est maximale pour  $\beta = 24^\circ$ . Après ce point la valeur de ROP commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur 1 mm/s.

- Les effets de RPM et  $\beta$  sur le ROP

La courbe de la figure 39 illustre l'évolution de la vitesse d'avancement (ROP) en fonction de la vitesse de rotation (RPM) et l'angle de coupe ( $\beta$ ).

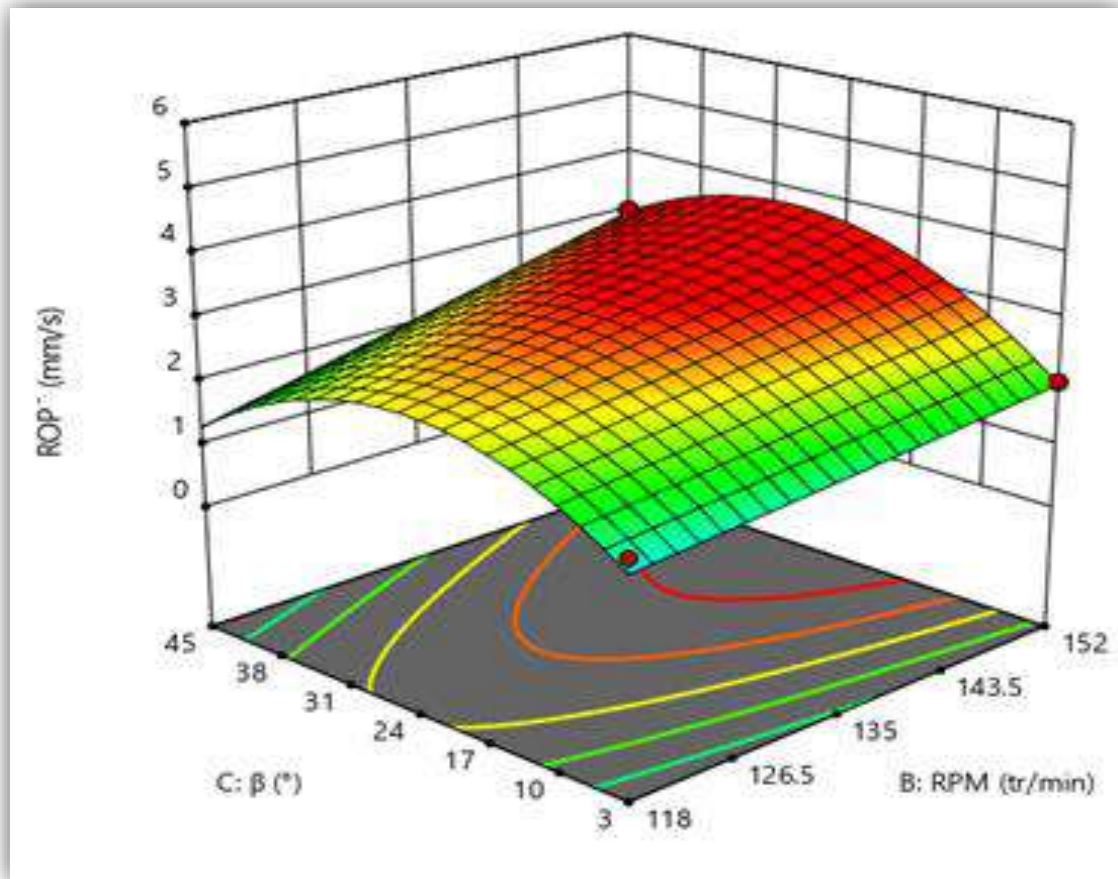


Figure IV.39: L'effet de  $\beta$  (°) et RPM sur le ROP.

D'après la figure ci-dessus, une relation progressive entre l'angle de coupe  $\beta$ , RPM, et la valeur de ROP (vitesse de pénétration) est constatée. Lorsque  $\beta$ , le RPM augmentent, la valeur de ROP augmente également jusqu'à atteindre la valeur 4mm/s environ, où ROP est maximale. Après ce point la valeur de ROP commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur 1mm/s.

## 6. Les valeurs optimales

Maintenant qu'un ajustement de bonne qualité a été réalisé, l'étape finale consiste à rechercher les conditions optimales pour le problème posé, c'est - à - dire, les valeurs de Poids (WOB), de la vitesse de rotation (RPM), et de l'angle de coupe( $\beta$ ), amenant à maximiser le ROP.

La problématique est maintenant la recherche du maximum d'une fonction de plusieurs variables sous la contrainte de rester dans le domaine expérimental. Tout point critique d'une telle fonction (*i.e.* tout point annulant les dérivées partielles) a pour coordonnées (WOB), (RPM) et ( $\beta^\circ$ ) solutions du système d'équations :

$$\frac{\partial y}{\partial (WOB)} (WOB, RPM, \beta^\circ) = 0 \dots\dots\dots (IV.12)$$

$$\frac{\partial y}{\partial (RPM)} (WOB, RPM, \beta^\circ) = 0 \dots\dots\dots (IV.13)$$

$$\frac{\partial y}{\partial (\beta^\circ)} (WOB, RPM, \beta^\circ) = 0 \dots\dots\dots (IV.14)$$

Les solutions de ce système sont les valeurs optimales qui conduisent à maximiser le ROP.

Les tableaux suivants montrent les résultats de la résolution des équations par le logiciel utilisé :

Tableau IV.8: Les valeurs optimales des paramètres pour le ROP.

WOB	RPM	$\beta$	ROP1
136.900	146.070	27.796	3.822

## 7. Conclusion

L'analyse des données en utilisant la méthodologie surface de réponse des plans d'expériences, basé sur l'approche ANOVA, a permis de développer le modèle mathématique qui explique la relation entre la réponse (ROP) et les paramètres d'étude. L'application de RSM permet de déterminer les valeurs optimales qui permettent de rationaliser le régime de ROP. Les résultats obtenus montrent la bonne corrélation entre les données revues et expérimentales, et affirment que le modèle est bien ajusté, et peut être utilisé pour prédire correctement la réponse (ROP).

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'améliorer le taux de pénétration (ROP) lors du forage face aux variations des différents paramètres étudiés, tels que le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et l'angle de coupe ( $\beta$ ). Pour atteindre cet objectif, la méthode de la surface de réponse RSM a été adoptée. L'étude a été réalisée conformément un plan de travail devisé en quatre parties, dont la théorie sur le forage pétrolier (bibliographie), et les installations de forage ont été élaborées à la première partie. Au deuxième chapitre la détermination des paramètres de forage qui influent sur le taux de pénétration (le type d'outil, le poids, la vitesse de rotation, et les caractéristiques du fluide de forage), a été réalisée. La troisième partie a été consacrée aux méthodes théoriques de la détermination du régime rationnel de forage pétrolier, et l'identification des modèles d'optimisation. L'étude expérimentale de la détermination des paramètres optimaux du régime rationnel de fonctionnement de forage pétrolier, et les résultats obtenus, ont été présentés à la dernière partie. Le traitement statistique montre que toutes les paramètres d'étude ont un impact significatif sur le comportement de ROP. L'application de la méthode RSM a permis de développer les modèles mathématiques (en termes codés et en termes réels) qui expliquent les relations entre les différents paramètres d'entrées (WOB, RPM,  $\beta^\circ$  et de sorties (ROP), ainsi que de déterminer la meilleure valeur du taux de pénétration (**3.822mm/s**), **pour les facteurs de valeurs** WOB = 136,900 kgf, RPM = 146,070 tr/min,  $\beta = 35.965^\circ$ . Les résultats obtenus montrent la bonne corrélation entre les données prévues et les données expérimentales, et confirment le bon ajustement du modèle développé qui permet de prédire avec précision le comportement du taux de pénétration (ROP).

## 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 MOULOUD MAMMERI, 2017/2018.
- [3] Hafsi Takieddine, Soma Ismail 'Appareil De Forage, Etude Et Dimensionnement Cas : Champs Hassi Messaoud 'UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2011/2012
- [4] HEBBAL Oussama, TOUAGHZIT Azzedine, HARKATI Med Abd, Etude et Maintenance de Treuil de Forage OIL WELL 840E, Mémoire De Master, Université Hassiba Benboualide Chlef, 2012.
- [5] GABOUSSA Boubaker, LAHLALI Mohammed Amine, Optimisation des Paramètres Mécanique des Machines de Forage Pétrolier, Mémoire de master, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.
- [6] Bebboukha Meriem, 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.
- [7] Omar Mohammed, Qambar, Rotary Drilling Process.
- [8] Jean-Paul Nguyen, Techniques D'exploitation Pétrolière le Forage, 1993.
- [9] Documentation de l'ENSP.
- [10] negadiali, la maintenance des équipements des forages cas tp127 Hassi Messaoud, Mémoire de master, UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen 2014.
- [11] L'APPAREIL DE FORAGE (RIG).
- [12] SOBHI Brahim, CHELLAL Brahim, GHOUL Hichem, Optimisation des paramètres mécaniques de forage (WOB et RPM) application aux champs de Hassi Messaoud dans la phase 16 et 6, Mémoire de Master, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017/2018.
- [13] FICHER Sonatrach, Choix Des Outils et paramètres de forage.



- [14] MILI Saoussen, KAOUANE Housseyn, Conception et réalisation d'un système de prévention des « Stuck Pipe » HASSI MESSAOUD, Mémoire de Fin d'étude, esi 2014.
- [15] CHEFFAH SALIM, Amélioration des paramètres mécaniques du forage horizontal, Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017.
- [16] F. GRONDIN, outils de forage, ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement. 2009.
- [17] BOUCENNA Abdelhak HAOUSSAOUI Nouredine, Application de la méthodologie des plans d'expérience à l'optimisation des processus de forage, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2020-2021.
- [18] GHALEM Khaled (Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage.), UNIVERSITE KASDI MERBAH –OUARGLA, MAGISTER, 2014/2015.
- [19] FICHER Sonatrach, Les paramètres de forage. 59p.
- [20] M. DADDOU, Les caractéristiques physiques de la boue de forage SONATRACH Division forage, formation superviseur, édition juin 2009, 47p.
- [21] Sebban toubba, kouadri maamar, Optimisation des paramètres géométriques de l'outil de forage basée sur le modèle du taux de pénétration.
- [22] Jacques GOUPY, LES PLANS D'EXPERIENCES.
- [23] LAGHBECHE Kamel et RAHMOUNI salaheddine, Étude du rationnel de la machine de forage pétrolier, 2022.
- [24] ABDERRAHIM Zakaria 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.

# ANNEXE

Design-Expert 11

Navigation Pane

- Design (Actual)
  - Information
    - Notes
    - Summary
    - Graph Columns
    - Evaluation
  - Analysis
    - R1:ROP1 (Analyzed)
  - Optimization
    - Numerical
    - Graphical
  - Post Analysis
    - Point Prediction
    - Confirmation
    - Coefficients Table

Design Properties

Run 1

Run	Factor 1 A:WOB kgf	Factor 2 B:RPM tr/min	Factor 3 C:β °	Response 1 ROP1 mm/s
1	120	135	8	2.17
2	80	152	45	2.02
3	80	118	3	0.71
4	160	118	45	1.34
5	160	135	3	2.02
6	120	135	8	2.17
7	120	152	3	2.01
8	120	135	8	2.17
9	80	152	8	1.92
10	120	135	8	2.17
11	120	118	3	1.6
12	160	118	8	2.43
13	160	152	8	3.18
14	80	152	3	1.48
15	80	135	8	1.86
16	160	135	3	2.02
17	120	152	45	3.02
18	160	152	8	3.18
19	160	135	45	3.01
20	80	118	45	0.96

Design-Expert 11

Navigation Pane

- Design (Actual)
  - Information
    - Notes
    - Summary
    - Graph Columns
    - Evaluation
  - Analysis
    - R1:ROP1 (Analyzed)
  - Optimization
    - Numerical
    - Graphical
  - Post Analysis
    - Point Prediction
    - Confirmation
    - Coefficients Table

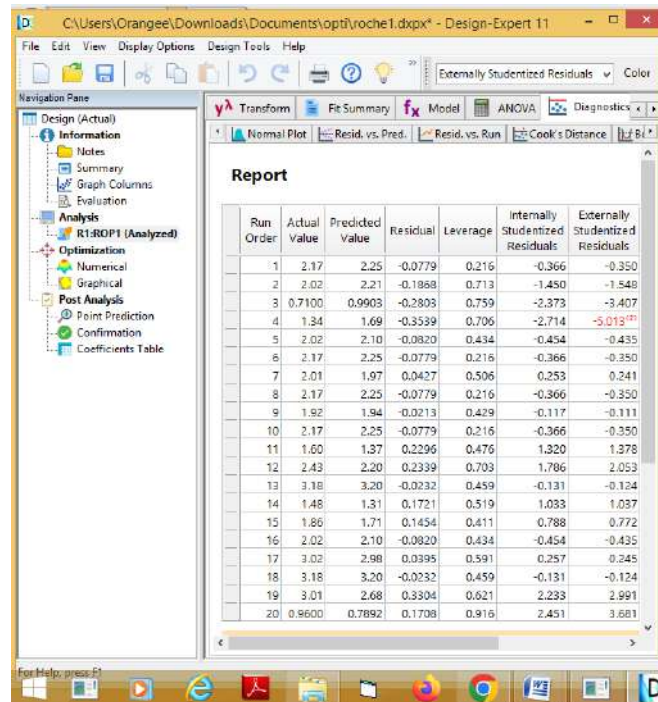
ANOVA for Quadratic model

Response 1: ROP1  
Transform: Power  
Lambda: 1, Constant: 0

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
<b>Model</b>	8.10	9	0.9004	15.58	< 0.0001 significant
A-WOB	3.03	1	3.03	52.46	< 0.0001
B-RPM	3.27	1	3.27	56.54	< 0.0001
C-β	0.5674	1	0.5674	9.82	0.0106
AB	0.1540	1	0.1540	2.66	0.1337
AC	0.0277	1	0.0277	0.4797	0.5043
BC	0.6167	1	0.6167	10.67	0.0085
A <sup>2</sup>	0.0068	1	0.0068	0.1172	0.7392
B <sup>2</sup>	0.0000	1	0.0000	0.0004	0.9845
C <sup>2</sup>	1.03	1	1.03	17.80	0.0018
<b>Residual</b>	0.5780	10	0.0578		
Lack of Fit	0.5780	5	0.1156		
Pure Error	0.0000	5	0.0000		
<b>Cor Total</b>	8.68	19			

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

The Model F-value of 15.58 implies the model is significant.



Response	Name	Units	Observations	Analysis	Minimum	Maximum
R1	ROP1	mm/s	20	Polynomial	0.71	3.18

Factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum
A	WOB	kgf	Numeric	80.00	160.00
B	RPM	tr/min	Numeric	118.00	152.00
C	$\beta$	$^{\circ}$	Numeric	3.00	45.00

Factors