



Université KASDI-MERBAH

Ouargla

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : électromécanique.

Spécialité : Maintenance industrielle.

Présenté par :

Menacer Abdeslem

Rahmani Walid

Thème :

**Optimisation des paramètres de performance du forage
pétrolier par la méthodologie des surfaces de réponse
(RSM).**

Soutenu publiquement le : 15/05/2026

Devant le jury composé de :

Gherfi Abdelhafid
Rouagdia Karim
khettabi Rym

Président
Examineur
Rapporteur

UKM Ouargla.
UKM Ouargla.
UKM Ouargla.

Année universitaire : 2025/2026

Dédicace

Au nom d'**Allah**, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux
Louange à **Allah** Seul, et que la paix et les bénédictions soient sur Celui après qui
il n'y a point de **prophète**. Louange à **Allah** qui m'a comblé du bienfait de la vie
et a illuminé mon esprit par la lumière de la science et du savoir, pour couronner
aujourd'hui le parcours de longues années de labeur, et atteindre, par Sa grâce et
Sa réussite, un nouveau seuil académique dans notre parcours
Je dédie cet humble travail à la source de tendresse et de générosité, **ma chère**
mère, ainsi qu'à la force et au pilier de ma vie, **mon cher père**. Que Dieu les
préserve et les protège.

À mes **chères sœurs**, et à tous les membres de **ma noble famille**, chacun en son
nom et selon son rang.

À tous mes honorables enseignants qui m'ont tendu la main et m'ont accompagné
tout au long de mon parcours scolaire, depuis mes premiers pas jusqu'à ce niveau,
avec tout mon amour, mon estime et mon respect.

À mon enseignante encadrante, **Mlle Khettabi Rym**, en reconnaissance de ses
orientations judicieuses et de ses précieux conseils qui ont grandement contribué
à la réalisation de ce mémoire.

À mon cher collègue **R. Walid**, à sa **généreuse famille**, ainsi qu'à tous ceux qui
m'ont soutenu, ne serait-ce que par une bonne parole.

Menacer abdeslem

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Louange à Allah, par la grâce de qui les bonnes œuvres s'accomplissent, et par le soutien duquel ce parcours d'efforts a été couronné de succès. Que la paix et la bénédiction soient sur le plus noble des Messagers, notre Prophète Mohammed, ainsi que sur sa famille et ses compagnons

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à ma très chère mère, mon refuge et ma source de sérénité, pour ses prières sincères et sa bénédiction constante, ainsi qu'à mon cher père, mon modèle et ma fierté, pour ses sacrifices, son dévouement et son soutien indéfectible.

Qu'Allah les préserve, leur accorde une longue vie et une santé de fer. J'adresse également cette dédicace à mes frères, à mes sœurs ainsi qu'à toute ma famille pour leur présence précieuse à chaque étape de mon parcours.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance vont à Mlle Khettabi Rym, pour ses orientations précieuses, sa patience et ses conseils éclairés. Je l'adresse aussi à mon binôme, M. Abdessalem, ainsi qu'à son honorable famille, en souvenir de notre riche collaboration. En espérant que ce travail soit le prémice de futurs succès.

Rahmani walid



Remerciement

*Avant tout, nous rendons grâce à **Allah**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener ce travail à son terme.*

*Nous adressons nos sincères remerciements aux **membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre plus vive reconnaissance à notre encadrante, **Mlle Khettabi Rym**, pour la qualité de son encadrement, sa grande disponibilité ainsi que ses précieuses observations. Ses orientations pertinentes, sa rigueur scientifique et ses encouragements continus ont été le pilier fondamental de l'aboutissement de ce mémoire.*

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Merci infiniment.

Résumé

Cette étude analyse l'impact de paramètres critiques tels que le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le débit de circulation (exprimé en coups par minute, SPM) sur le ROP. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons adopté une démarche d'optimisation basée sur la méthodologie des surfaces de réponse (RSM – Response Surface Methodology), un outil d'analyse performant permettant de modéliser mathématiquement le processus.

Pour la phase expérimentale et la collecte de données, un plan d'expériences de type Box-Behnken a été mis en œuvre. Le traitement statistique des résultats a été effectué via l'analyse de variance (ANOVA), permettant d'évaluer la pertinence du modèle et les interactions entre les variables. Les résultats démontrent que la méthode RSM offre une corrélation précise entre les données prédites et expérimentales, permettant ainsi de définir la combinaison optimale des paramètres pour maximiser le ROP. En conclusion, l'application de la RSM s'avère être une approche fiable pour simuler le comportement du système de forage et garantir une amélioration significative de la performance globale des puits.

Mots-clés : Optimisation, RSM, forage pétrolier, ROP, plans d'expériences, Box-Behnken, modélisation.

Abstract

This study analyzes the impact of critical parameters such as weight on bit (WOB), rotational speed (RPM), and circulation flow rate (expressed in strokes per minute, SPM) on the ROP. To achieve this objective, we adopted an optimization approach based on the Response Surface Methodology (RSM), a powerful analytical tool for mathematically modeling the process.

For the experimental phase and data collection, a Box-Behnken experimental design was implemented. Statistical processing of the results was performed using analysis of variance (ANOVA), allowing for the evaluation of model relevance and interactions between variables. The results demonstrate that the RSM method provides an accurate correlation between predicted and experimental data, thereby defining the optimal combination of parameters to maximize ROP. In conclusion, the application of RSM proves to be a reliable approach to simulate drilling system behavior and guarantee a significant improvement in overall well performance.

Keywords: Optimization, RSM, oil drilling, ROP, design of experiments, Box-Behnken, modeling.

ملخص

تدرس هذه البحث تأثير المتغيرات الحرجة مثل الوزن على الدقاق (WOB) ، وسرعة الدوران (RPM) ، ومعدل تدفق سائل الحفر (SPM) على معدل الاختراق (ROP) ولتحقيق هذا الهدف، تم اعتماد منهجية سطح الاستجابة (RSM) كأداة نمذجة وتحسين رياضية فعالة.

في مرحلة التجارب وجمع البيانات، تم استخدام تصميم التجارب من نوع بوكس-بينكن (Box-Behnken Design). كما تم تحليل النتائج باستخدام تحليل التباين (ANOVA) لتقييم ملائمة النموذج ودراسة التفاعلات بين المتغيرات.

أظهرت النتائج أن منهجية (RSM) توفر توافقاً جيداً بين القيم التجريبية والمتوقعة، مما يسمح بتحديد التوليفة المثلى للمتغيرات لتحقيق أعلى معدل اختراق (ROP) وفي الختام، يثبت استخدام هذه المنهجية فعاليتها في تحسين أداء عمليات الحفر.

الكلمات المفتاحية: التحسين، RSM، الحفر النفطي، ROP، تصميم التجارب، Box-Behnken، النمذجة.

Titre	Page
Dédicace	I
Remerciement	III
Résumé	IV
Sommaire	VII
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIII
Liste des abréviations	XIV
Liste des symboles	XV
Introduction général	1
Chapitre I :Généralités sur le forage pétrolier	
I.1.Introduction	4
I.2.Forage pétrolier	4
I.3. Classification des appareils de forage	5
I.3.1.Appareil Leger	6
I.3.2.Appareil moyen	6
I.3.3. Appareil lourd	6
I.3.4. Appareil super lourd	7
I.4. Système de forage	7
I.4.1.Équipements de surface du puits	8
I.4.1.1.Système de levage (Hoisting system)	9
I.4.1.1.1.Mât de forage	9
I.4.1.1.2.Substructure	9
I.4.1.1.3. Mouflage	10
I.4.1.1.3.1. Moufle fixe	11
I.4.1.1.3.2. Moufle mobile	11
I.4.1.1.3.3. Câble de forage	11
I.4.1.1.3.4. Treuil de forage	12
I.4.1.2. Système de rotation	12
I.4.1.2.1. Table de rotation	13
I.4.1.2.2. Top Drive	13
I.4.1.2.3. Tête d'injection	14
I.4.1.3. Système de sécurité	15
I.4.1.3.1.Principales fonctions du BOP	15
I.4.1.3.1.1.Contrôle de la pression	16
I.4.1.3.1.2.Isolement des formations géologiques	16
I.4.1.3.1.3.Contrôle des fluides de forage	16
I.4.1.3.1.4.Intervention d'urgence	16
I.4.1.4. Système de circulation	16
I.4.1.4.1.Bacs à boue	17
I.4.1.4.2 Pompes de forage	18
I.4.1.4.3.Boue de forage	18

I.4.1.5. Système de production d'énergie	19
I.4.1.6. Système de contrôle des puits	19
I.4.2. Équipements de fond (garniture de forage)	19
I.4.2.1. Tiges de forage	20
I.4.2.2. L'assemblage de fond (Bottom Hole Assembly – BHA)	21
I.4.2.2.1. Masses-tiges ou drill collars	21
I.4.2.2.2. Stabilisateurs	21
I.4.2.2.3. Trépan.	22
I.5. Paramètres de forage	22
I.5.1. Paramètres hydrauliques	23
I.5.1.1. Type de boue	23
I.5.1.2. Débit et pression hydraulique	23
I.5.1.3. Vitesse de pompage (SPM)	24
I.5.1.4. Caractéristiques du fluide de forage	24
I.5.1.4.1 Densité de la boue	25
I.5.1.4.2 Viscosité de la boue	25
I.5.1.4.3 Jets de la boue	25
I.5.1.4.4 Filtrat de la boue	26
I.5.1.4.5 Pourcentage d'huile dans la boue	26
I.5.2. Paramètres mécaniques	26
I.5.2.1. Poids sur l'outil (Weight on Bit – WOB)	27
I.5.2.2. Vitesse de rotation (RPM)	27
I.5.2.3. Nature de la roche	28
I.5.2.4. Types d'outils de forage pétrolier	29
I.5.2.4.1. Outils à molettes	29
I.5.2.4.1.1. Mode de travail d'un tricône	30
I.5.2.4.1.2 L'hydraulique à l'outil	31
I.5.2.4.1.3 Système de lubrification	32
I.5.2.4.2. Outils diamant	32
I.5.2.4.2.1. Outils au diamant naturel	33
I.5.2.4.2.1.1. Caractéristiques principales du diamant naturel	33
I.5.2.4.2.1.2. Mode de destruction de la roche par diamant naturel	34
I.5.2.4.2.2. Outils à diamant synthétique	35
I.5.2.4.2.2.1. Outils PDC (Polycrystalline Diamond Compact)	35
I.5.2.4.2.2.2. Outils TSP (Polycristallin Thermiquement Stable)	36
I.5.2.4.2.2.3. Les outils imprégnés	37
I.6. Fabrication des outils	38
I.6.1. Outils à diamants naturels	38
I.6.2. Diamants brasés	39
I.6.3. Diamants en imprégnation	39
I.6.4. Avantages du diamant synthétique et du diamant naturel	40
I.7. Conclusion	40

Chapitre II : Approche technique et optimisation	
II.1. Introduction	42
II.2. Objectif des plans d'expérience	42
II.3. Généralités sur les plans d'expériences	42
II.3.1. Facteur	42
II.3.2. Réponse	43
II.3.3. Notion d'espace expérimental	43
II.3.4. Notion de surface de réponse	45
II.3.5. Notion de modélisation mathématique	45
II.4. Différents types des plans d'expérience	47
II.4.1. Plans factoriels complets à deux niveaux	47
II.4.1.1. Plans complets à deux facteurs	47
II.4.1.1.1. Représentation d'une étude sous forme de tableau	48
II.4.1.1.2. Présentation des résultats d'essais	49
II.4.1.2. Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux	50
II.4.1.3. Avantages et inconvénients des plans factoriels complets	50
II.4.2. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	51
II.4.2.1. Notation des plans factoriels fractionnaires	51
II.4.2.2. Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base	51
II.5. Autres Plan d'expériences	52
II.5.1. Plan de Taguchi	52
II.5.2. Plans de Koshal	52
II.5.3. Plans de Rechtschaffner	53
II.6. Méthode RSM (response surface méthodologie)	53
II.6.1. Principes généraux	53
II.6.2. Étapes de la méthodologie de surface de réponse	54
II.6.3. Avantages de (RSM)	54
II.6.4. Plans de Box-Behnken:	55
II.7. Conclusion	56
Chapitre III : Application de la méthode des surfaces de réponse (RSM)	
III.1. Introduction	58
III.2. Configuration matérielle	58
III.3. Analyse des données	60
III.4. Statistiques d'ajustement	61
III.5. Visualisation des résultats	62
III.6. Modélisation mathématique	63
III.6.1. Équation en facteurs codés	63
III.6.2. Équation en fonction des facteurs réels	63
III.7. Influence des différents facteurs sur le taux de pénétration (ROP).	64
III.7.1. Influence du l'outil de forage (WOB) sur le taux de pénétration (ROP).	64
III.7.2. Influence du la vitesse de rotation (RPM) sur le taux de pénétration (ROP).	65
III.7.3. Influence coups par minute (SPM) sur le taux de pénétration (ROP).	66

III.8. Interaction des facteurs	66
III.8.1. Effet d'interaction entre le WOB et le RPM sur le ROP	67
III.8.2. Effet d'interaction entre le WOB et le SPM sur le ROP	68
III.8.3. Effet d'interaction entre le RPM et le SPM sur le ROP	69
III.9.Optimisation du taux de pénétration (ROP)	70
III.10 Conclusion	70
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	74
Annexe	79

N°	Titre	Page
Chapitre I		
I.1	Plateforme pétrolière Onshore	5
I.2	Plateforme pétrolière Offshore	5
I.3	Classification des appareils de forage	5
I.4	Système de forage	8
I.5	Substructures	10
I.6	Fonction levage.	10
I.7	Mofle fixe	11
I.8	Mofle mobil	11
I.9	Câble de forage	12
I.10	Treuil de forage	12
I.11	Table de rotation	13
I.12	Top drive	14
I.13	Tête d'injection	14
I.14	Système BOP	15
I.15	Système de circulation	17
I.16	Pompes de forage	18
I.17	Garniture de forage	20
I.18	Tiges de forage	20
I.19	Trépan.	22
I.20	Poids sur l'outil	27
I.21	Capteur de fréquence RPM	28
I.22	Bras de l'outil	29
I.23	Outils à molettes (tricône)	30
I.24	Travail d'un outil	30
I.25	Outil conventionnel	31
I.26	Outil à jet	31
I.27	Système de lubrification des paliers	32
I.28	Outil au diamant naturel	34
I.29	Action d'un outil à diamant naturel	35
I.30	Outils PDC	36
I.31	Outils TSP	37
I.32	Outils imprégnés	38
I.33	Fabrication des outils	38
I.34	Diamants en imprégnation	39
Chapitre II		
II.1	Niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1)	43
II.2	Représentation de l'espace expérimental	44
II.3	Représentation du domaine d'étude	44
II.4	Surface de réponse	45
II.5	Plan de Box- Behnken pour trois facteurs	55
Chapitre III		
III.1	Simulateur de forage	58
III.2	Variation des valeurs prédites du ROP en fonction des valeurs mesurées	62
III.3	Variation de ROP en fonction de WOB	64
III.4	Variation ROP en fonction de RPM	65
III.5	Variation du ROP en fonction du SPM	66

Liste des figures

III.6	Variation ROP en fonction de WOB et RPM	67
III.7	Variation ROP en fonction de WOB et SPM	68
III.8	Variation ROP en fonction de RPM et SPM	69

N°	Titre	Page
Chapitre I		
I.1	Types d'appareils de forage et leurs avantages	7
I.2	Débit de la boue en fonction de diamètre de puits	26
I.3	Caractéristiques principales du diamant naturel. Source: IAP	34
Chapitre II		
II.1	Tableau d'expérimentation (unités courantes).	48
II.2	Plan d'expériences (unités codées).	48
II.3	Plan d'expériences et résultats expérimentaux	50
II.4	Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base donné	52
II.5	Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs.	56
Chapitre III		
II.1	Valeurs des paramètres.	59
II.2	Niveaux de facteurs codés	59
II.3	Résultats des tests	59
II.4	Analyse de variance.	60
II.5	Indices statistiques R^2	61
II.6	Valeurs optimales des paramètres	70

Abréviation	Signification
RSM	Response Surface Methodology
BOP	Blow Out Preventer
PDC	Polycrystalline Diamond Compact
TSP	Thermally Stable Polycrystalline Diamond
BHA	Bottom Hole Assembly
IADC	International Association of Drilling Contractors
ROP	Rate of Penetration
WOB	Weight on Bit
RPM	Revolutions Per Minute
HP	Horse Power
PDM	Positive Displacement Motor
API	American Petroleum Institute
SPM	Strokes Per Minute
WBM	Water Based Mud
OBM	Oil Based Mud
SBM	Synthetic Based Mud
WOHL	Weight Of Hook Load
WOHF	Weight Of Hook while drilling
TD	Top Drive

Symbole	Nom	Unité
WOB	Weight on Bit (Poids sur l'outil)	T
RPM	Revolutions Per Minute (Vitesse de rotation)	tr/min
Q	débit de circulation de la boue (Flow rate)	m ³ /min
SPM	Strokes Per Minute (Nombre de coups par minute)	c/min
K	coefficient de la pompe (volume déplacé par course)	m ³ /c
ROP	Rate of Penetration (Taux de pénétration)	m/h
HP	Horse Power	HP
ft	Foot (Pied)	ft
m	Mètre	m
°C	Température	°C
psi	Pound per square inch	psi
kg/mm²	Dureté	kg/mm ²
g/cm³	Densité	g/cm ³
bar	Pression / Résistance à l'écrasement	bar
m/s	Vitesse des jets	m/s
in	Inch (Pouce)	in
L/min	Débit de boue	L/min
mm	Millimètre	mm
g	Gramme	g
carat	Masse du diamant	carat

Introduction général

L'industrie pétrolière actuelle évolue dans un environnement marqué par d'importants défis technico-économiques, où l'exploitation des réservoirs nécessite des opérations de forage de plus en plus complexes et profondes. Dans ce contexte, le forage ne constitue plus une simple opération d'exécution, mais représente désormais un élément stratégique de l'investissement, occupant une part considérable des coûts de développement des gisements. Par conséquent, l'optimisation de l'efficacité opérationnelle est devenue une nécessité stratégique visant non seulement à réduire les coûts, mais également à minimiser les temps non productifs.

La performance d'une opération de forage dépend fortement du taux de pénétration (ROP – Rate of Penetration), considéré comme l'un des indicateurs les plus représentatifs de l'efficacité du processus de forage. Ce paramètre est régi par l'interaction complexe de nombreux facteurs opératoires et géologiques, dont les effets combinés influencent directement les performances globales du procédé. Toutefois, les approches traditionnelles fondées sur l'expérience ou sur des méthodes d'« essai-erreur » demeurent souvent insuffisantes pour appréhender avec précision ces interactions et en quantifier l'impact réel. Dans ce contexte, le recours à des méthodes statistiques et mathématiques avancées s'impose comme une démarche essentielle pour modéliser le comportement du système, optimiser les paramètres de forage et renforcer la fiabilité des décisions techniques.

Le présent travail s'inscrit dans cette démarche d'optimisation des performances de forage et porte sur l'application de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM – Response Surface Methodology). Cette approche constitue un outil d'analyse performant permettant de modéliser mathématiquement le processus, d'évaluer l'influence de chaque variable et de déterminer les conditions opératoires optimales. L'objectif principal de ce mémoire consiste à exploiter cette méthodologie afin d'améliorer l'efficacité globale du processus de forage et d'optimiser le taux de pénétration (ROP).

Dans cette perspective, ce mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires alliant aspects théoriques et pratiques. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le forage pétrolier, en présentant les concepts fondamentaux, les équipements utilisés, les différentes phases de forage ainsi que les principaux paramètres opératoires influençant les performances et le taux de pénétration. Le deuxième chapitre porte sur l'approche technique et l'optimisation, à travers la présentation des bases méthodologiques et des outils analytiques utilisés pour l'amélioration des performances des opérations de forage. Enfin, le troisième chapitre est dédié à l'application de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), incluant la construction du modèle statistique, l'analyse de l'influence des variables étudiées ainsi que la détermination des conditions optimales permettant d'améliorer le taux de pénétration et la performance globale du forage.

Chapitre I

Généralités sur le forage pétrolier

1. Introduction

La réussite des opérations de forage repose sur la maîtrise précise des différents systèmes, équipements et paramètres opérationnels, qui fonctionnent de manière intégrée afin d'assurer des performances optimales dans les diverses formations géologiques. Les techniques de forage ont connu un développement considérable grâce aux avancées technologiques, contribuant ainsi à l'amélioration de la vitesse de pénétration, à l'augmentation de la productivité des puits et à la réduction des risques techniques et économiques liés aux opérations de forage.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude générale sur le forage pétrolier à travers l'examen des différents systèmes de forage, des composants de l'appareil de forage, des outils utilisés, ainsi que des principaux paramètres mécaniques et hydrauliques influençant l'efficacité et les performances des opérations de forage.

2. Forage pétrolier

Le forage pétrolier regroupe l'ensemble des techniques et opérations permettant de réaliser un puits afin d'atteindre les réservoirs d'hydrocarbures, que ce soit en milieu terrestre (onshore) ou marin (offshore). La localisation des gisements est généralement déterminée grâce à des études géologiques et géophysiques préalables. Une fois ces investigations achevées, les opérations de forage peuvent être entreprises. Le système le plus couramment utilisé est le forage rotatif (rotary drilling), basé sur la rotation du trépan, l'application d'une force verticale et la circulation continue d'un fluide de forage. Ce procédé est le plus répandu dans l'industrie pétrolière par rapport à d'autres techniques moins utilisées [1].

Selon l'objectif recherché et les caractéristiques du réservoir, les puits peuvent être verticaux, inclinés ou horizontaux. Les techniques modernes de forage dirigé permettent d'atteindre plusieurs cibles à partir d'un même site, réduisant ainsi l'emprise des installations de surface et limitant l'impact environnemental.

Les types de forage dépendent de l'emplacement des gisements. À terre (onshore) (figure I.1), on utilise généralement des appareils de forage fixes, tandis qu'en mer (offshore) (figure I.2), les installations varient selon la profondeur de l'eau et doivent offrir une certaine mobilité.

Ainsi, le coût d'un forage offshore peut être trois à quatre fois plus élevé que celui d'un forage terrestre

De plus, les puits horizontaux présentent une productivité supérieure à celle des puits verticaux, pouvant atteindre des débits de production cinq à dix fois plus élevés grâce à une plus grande surface de contact entre le puits et la roche réservoir.[2]



Figure I.1 : Plateforme pétrolière

(onshore)[3].



Figure I.2 : Plateforme pétrolière

(offshore) [3].

3. Classification des appareils de forage

La classification des appareils de forage s'effectue principalement sur la base de leur capacité maximale de profondeur de forage (figure I.3). Selon ce critère, les appareils de forage peuvent être classés comme suit :

Appareils légers, Appareils moyens, Appareils lourds, Appareils ultra-lourds [4].

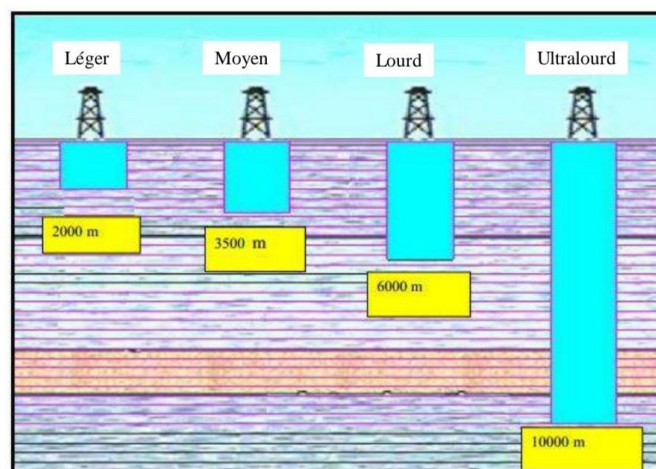


Figure I.3 Classification des appareils de forage [4]

3.1. 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 [4].

3.2. 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 [4].

3.3. 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 démenageurs 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 [4].

3.4. Appareil super lourd

L'appareil de forage pétrolier super lourd est l'un des équipements les plus grands et les plus puissants utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière. Il est conçu pour des opérations de forage très profondes pouvant atteindre 12 000 mètres ou plus. Il comprend un mât de grande capacité, un système de levage puissant, une table de rotation de grande dimension, une unité motrice à haute puissance ainsi qu'un ensemble d'équipements auxiliaires spécialisés.

Ce type d'appareil est généralement utilisé pour les opérations de forage en eau très profonde et est installé sur de grandes plateformes offshore. Sa conception, sa construction et son exploitation nécessitent des investissements considérables et représentent l'un des systèmes de forage les plus sophistiqués et les plus avancés de l'industrie pétrolière [4].

Tableau I.1: Types d'appareils de forage [5]

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

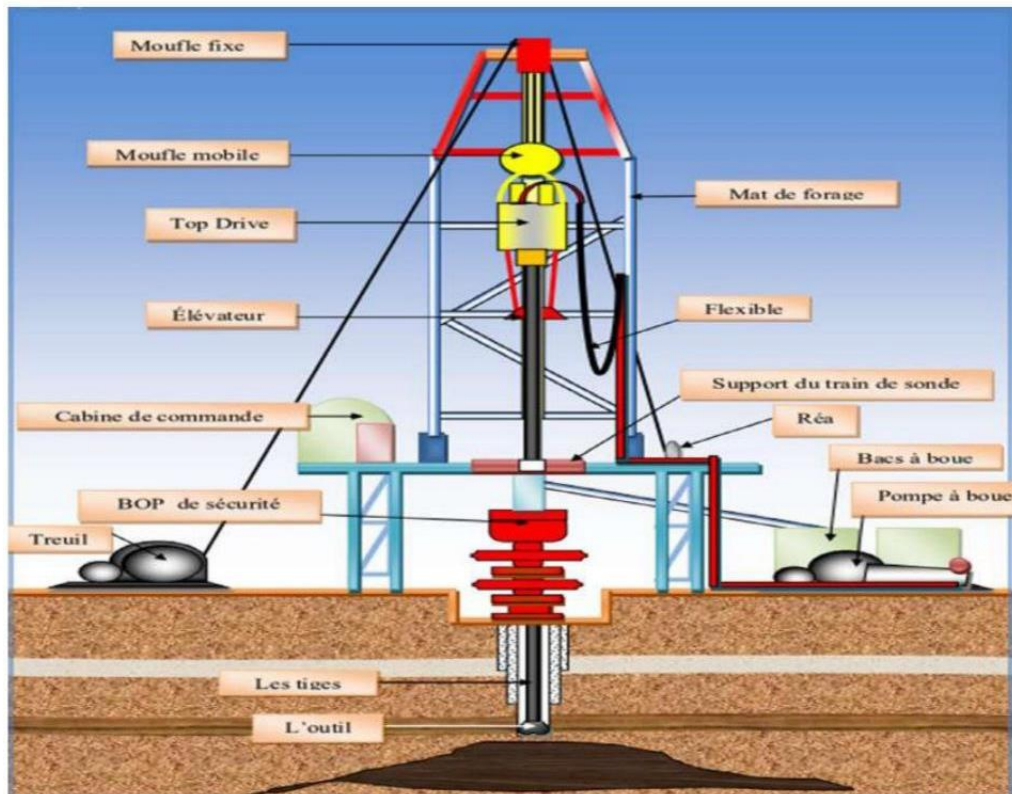
4. Système de forage

Dans un premier temps, il est nécessaire de présenter la terminologie pétrolière de base qui sera utilisée tout au long de ce travail. À cet effet, nous rappellerons brièvement le principe de fonctionnement ainsi que la constitution des systèmes de forage les plus couramment employés aujourd'hui, en particulier le forage rotatif (Rotary Drilling). Nous introduirons également les principaux termes techniques auxquels il sera fait référence par la suite [6].

Un système de forage rotatif classique (voir figure) se compose essentiellement de deux ensembles principaux :

- les équipements de fond ;
- les équipements de surface.

Ces différents équipements assurent conjointement la transmission de l'énergie, la destruction de la formation géologique, ainsi que le contrôle et la circulation du fluide de forage.



FigureI.4: Système de forage [6]

4.1. Équipements de surface du puits

Les équipements de surface regroupent l'ensemble des installations implantées à la surface du puits afin d'assurer l'exécution des opérations de forage dans des conditions techniques et sécuritaires optimales. Ils permettent la manipulation des équipements de forage, la transmission de l'énergie et du mouvement, la circulation de la boue de forage ainsi que le contrôle permanent du puits durant les différentes phases des travaux.

Ces installations comprennent également des systèmes de sécurité destinés à prévenir les risques d'accidents, à maîtriser les surpressions éventuelles et à garantir la protection du personnel, des équipements et de l'environnement.[2][7].

L'équipement de surface est principalement constitué des systèmes suivants :

- Système de levage ;
- Système rotatif ;
- système de sécurité ;
- Système de circulation de la boue ;
- Système de production d'énergie ;
- Système de contrôle des puits et divers équipements électriques

4.1.1. Système de levage (Hoisting system)

Le système de levage permet de suspendre la garniture de forage et de la déplacer verticalement dans le puits. Il assure également le réglage du poids appliqué sur le trépan, nécessaire à l'avancement du forage [7].

4.1.1.1. Mât de forage

Le mât de forage constitue la structure principale supportant le système de levage, remplaçant la tour de forage traditionnelle grâce à la rapidité de son montage et de son démontage. Au sommet du mât se trouve le moufle fixe.

Une passerelle d'accrochage, située à mi-hauteur, sert de poste de travail à l'accrocheur lors de l'ajout ou du retrait des tiges pendant les opérations de descente ou de remontée de la garniture de forage. Une autre passerelle, de hauteur réglable et placée plus bas, permet de guider le tubage lors de son vissage et de son introduction dans le puits.

Enfin, un plancher de travail, aménagé à la base du mât, constitue la zone principale d'activité pour l'équipe de forage et peut inclure une cabine destinée au repos du personnel [7].

4.1.1.2. Substructure

La substructure élève le plancher de quelques mètres au-dessus du sol, facilitant l'introduction des éléments de la tête de puits et des obturateurs[7].

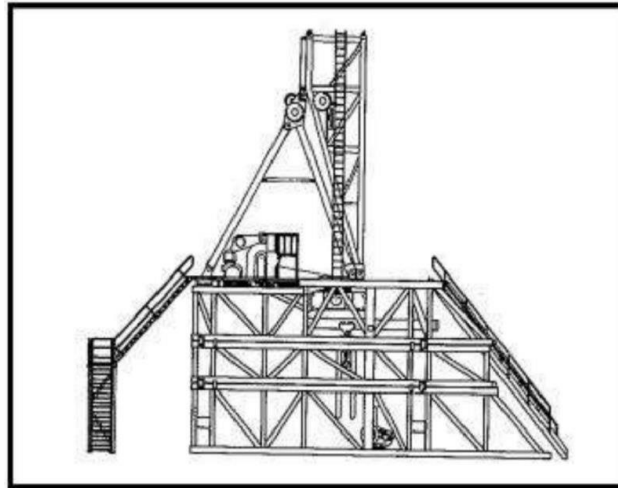


Figure I. 5 : Substructures [8]

4.1.1.3. Mouflage

Le mouflage consiste en l'enroulement du câble de forage autour des poulies des moufles fixe et mobile, formant plusieurs brins (jusqu'à 14 brins). Cette technique permet de multiplier la force exercée sur la garniture de forage tout en réduisant sa vitesse de déplacement

En négligeant les frottements, la charge appliquée au crochet est divisée par le nombre de brins, tandis que la vitesse de déplacement est multipliée par ce même nombre [7].

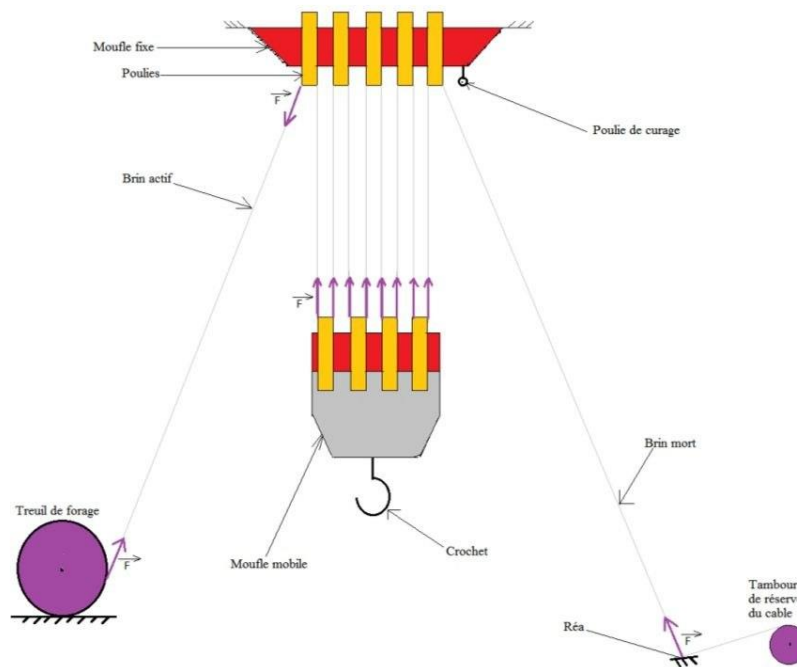


Figure I.6: Fonction levage.

4.1.1.3.1. Moufle fixe

Le moufle fixe est composé de plusieurs poulies et est positionné au sommet du mât. Il comporte une poulie supplémentaire par rapport au moufle mobile, contribuant ainsi à la démultiplication de la force de levage[7].

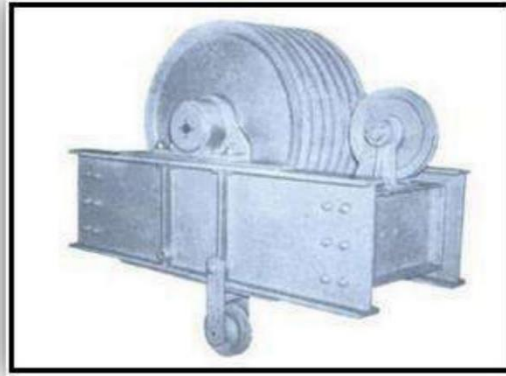


Figure I.7: Moufle fixe [8].

4.1.1.3.2. 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 [7].



Figure I.8: Moufle mobile [8]

4.1.1.3.3. 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[7].

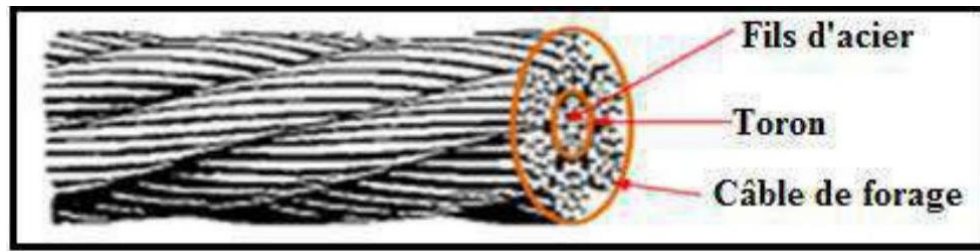


Figure I.9: Câble de forage [8].

4.1.1.3.4. Treuil de forage

Le treuil est un tambour autour duquel s'enroule le câble de forage. À ses extrémités sont fixées des jantes de freinage, en contact avec des bandes en acier munies de patins, actionnées par un levier.

Le treuil constitue l'élément central de l'appareil de forage ; sa capacité détermine la classification de l'installation et indique la profondeur maximale des forages pouvant être réalisés [9].

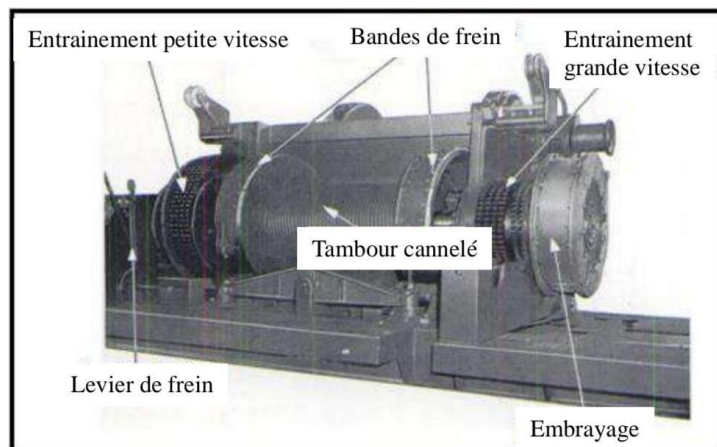


Figure I.10: Treuil de forage [8].

4.1.2. Système de rotation

Ce système regroupe tous les équipements assurant la transmission du mouvement de rotation à l'outil de forage.

Il comprend notamment la table de rotation et son dispositif d'entraînement, la tige d'entraînement, ainsi que le train de tiges et la tête d'injection.

4.1.2.1. Table de rotation

La table de rotation est généralement entraînée par un moteur électrique. Sa structure, illustrée dans la figure (2.5), se compose de trois éléments principaux:

- **tige d'entraînement (Tige carrée)** : Généralement de section carrée, hexagonale ou parfois triangulaire, elle reçoit le mouvement de rotation transmis par la table de rotation à travers le carré d'entraînement.
- **carré d'entraînement (Kelly drive bushing)** : Il assure la transmission du mouvement de rotation de la table vers la tige d'entraînement, puis vers toute la garniture de forage.
- **corps ou bâti** : Muni d'une ouverture centrale cylindrique, il supporte la partie rotative au moyen de roulements à billes ou à rouleaux, permettant ainsi une rotation stable et continue.

[2].

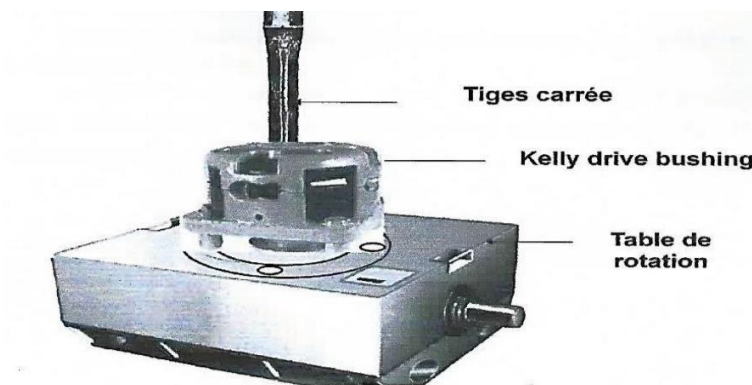


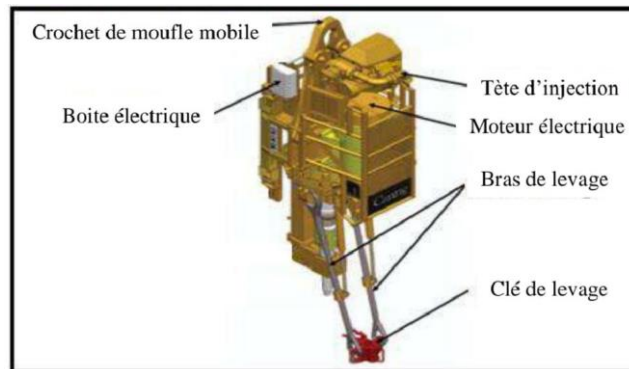
Figure I.11: Table de rotation

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

4.1.2.2. Top Drive

Le système Top Drive, ou tête d'injection motorisée, est fixé au moufle mobile et contrôlé depuis le plancher de forage. Contrairement à la table de rotation traditionnelle et à la tige carrée, le Top Drive permet de faire tourner directement la garniture de forage, ce qui simplifie considérablement le processus. Le forage s'effectue par longueurs (typiquement trois tiges) plutôt que tige par tige, éliminant ainsi le besoin de la tige d'entraînement et de la table de rotation.

Ce système offre également la possibilité d'effectuer les ajouts de tubage par sections, ce qui augmente la rapidité et l'efficacité du forage. Parmi ses autres avantages, le Top Drive est équipé de bras d'élévateur articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur, d'une clé automatique, ainsi que d'une coulisse intégrée pour une manipulation plus sûre et plus précise. De plus, des rails installés tout le long du mât assurent un guidage stable lors de ses déplacements, optimisant ainsi la sécurité et la productivité sur le chantier de forage [3].



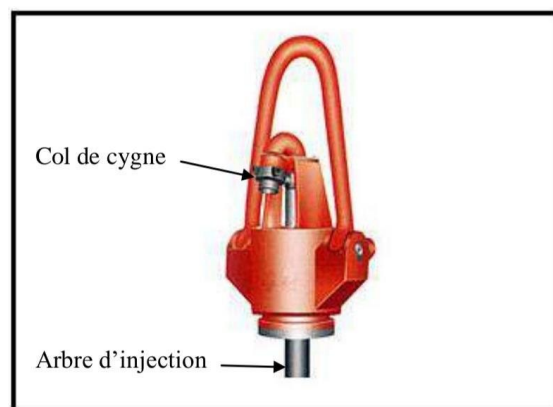
FigureI.12: Top drive [10].

4.1.2.3. Tête d'injection

La tête d'injection constitue un élément essentiel de l'installation de forage, car elle assure la liaison entre la partie fixe et la partie mobile de l'appareil de forage. Elle est suspendue au crochet de levage et reliée à la tige carrée par vissage. Ses principales fonctions sont les suivantes :

Elle supporte et permet la rotation de l'ensemble du train de tiges grâce à un système de roulement adapté durant les opérations de forage.

Elle assure le transfert de la boue de forage depuis la conduite fixe, appelée flexible d'injection, vers la conduite rotative constituée par le train de tiges. [4].



FigureI.13 : Tête d'injection

4.1.3. Système de sécurité

Le BOP (Blowout Preventer) est un équipement de sécurité essentiel utilisé lors du forage d'un puits de pétrole. Son rôle principal est de prévenir les éruptions incontrôlées de pétrole et de gaz (également appelées « 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, en milieu offshore, sur le fond marin. Il est constitué de plusieurs vannes et dispositifs de fermeture. Ces éléments peuvent être actionnés 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 et le BOP sous-marin, utilisé en mer [11].

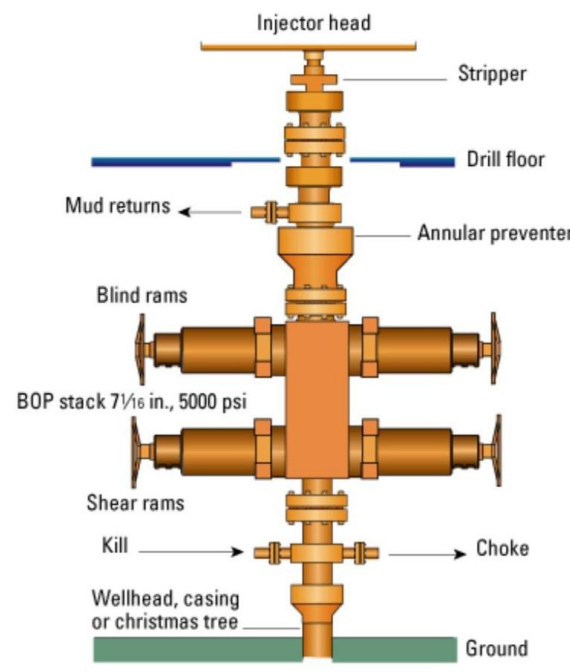


Figure I.14: Système BOP

4.1.3.1. Principales fonctions du BOP

Le BOP joue un rôle crucial dans la sécurité des opérations de forage grâce à plusieurs fonctions essentielles :

4.1.3.1.1. Contrôle de la pression

Le BOP permet de fermer hermétiquement le puits afin d'empêcher l'échappement de fluides de forage sous haute pression, évitant ainsi un éventuel blowout. Il est équipé de vannes à action rapide, appelées rams, qui peuvent être activées immédiatement en cas d'urgence.

4.1.3.1.2. Isolement des formations géologiques

Lors du forage, différentes couches géologiques contenant des fluides sous pression peuvent être rencontrées.

Le BOP assure l'isolement de ces formations, permettant de contrôler efficacement le flux des fluides et de sécuriser le puits.

4.1.3.1.3. Contrôle des fluides de forage

Il régule le débit des fluides de forage en fonction des besoins de la formation géologique, contribuant ainsi à maintenir la stabilité du puits.

4.1.3.1.4. Intervention d'urgence

En situation d'incident ou d'accident pendant le forage, le BOP peut être utilisé pour couper la colonne de forage, sceller le puits et réduire le risque de fuite de pétrole ou de gaz. Le BOP est soumis à des normes de sécurité strictes et doit faire l'objet de contrôles réguliers pour garantir son fonctionnement optimal. Son utilisation est indispensable pour assurer la sécurité des opérations de forage et la protection de l'environnement [11]

4.1.4. Système de circulation

La boue de forage est d'abord préparée dans des bassins de stockage de grande capacité. Elle est ensuite envoyée par des pompes à travers les tiges creuses de la garniture de forage. En circulant vers le fond du puits, la boue passe par les buses de l'outil de forage puis remonte à la surface par l'espace annulaire situé entre la garniture et les parois du puits. Une fois récupérée en surface à travers une conduite verticale, elle est traitée par des tamis vibrants afin d'éliminer les déblais avant d'être réinjectée dans le circuit de forage pour continuer les opérations (Figure I.15).

La boue de forage joue plusieurs rôles essentiels : elle permet le refroidissement et la lubrification de l'outil de forage ainsi que des parois du puits, facilite le transport des déblais vers la surface, contribue au maintien de la pression et assure la stabilité des parois du puits. Elle constitue également un moyen de transmission d'énergie indispensable au bon déroulement et à la sécurité des opérations de forage [12].

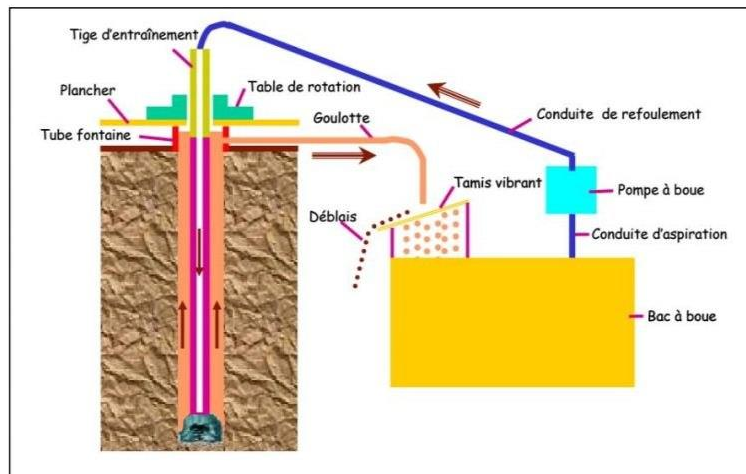


Figure I.15: Système de circulation [13]

La circulation de la boue dans un forage nécessite l'utilisation de :

- Bacs à boue
- Pompes puissantes.

4.1.4.1. Bacs à boue

- Les bacs de circulation :

Ce sont des réservoirs métalliques dans lesquels la boue de forage est préparée, maintenue en agitation et aspirée par les pompes de forage. Après son passage dans le puits, la boue retourne vers ces bacs à travers la goulotte.

- Les bacs de réserve :

Ces réservoirs sont destinés au stockage de la boue, qu'elle soit fraîchement préparée ou déjà utilisée. Leur capacité est généralement supérieure à celle des bacs de circulation.

- Les bacs de décantation :

Ces bacs permettent la séparation des particules solides par décantation avant la réutilisation de la boue. Leur capacité est généralement comparable à celle des bacs de circulation.

4.1.4.2. Pompes de forage

Les pompes de forage sont des pompes alternatives fonctionnant grâce au mouvement alternatif des pistons et des tiges, produit par un mécanisme classique composé d'une bielle et d'un vilebrequin.

Ces pompes, de type volumétrique, assurent un débit proportionnel à la cylindrée de la pompe ainsi qu'à la vitesse de rotation du vilebrequin. Outre leur capacité de débit et leur puissance, elles doivent également offrir une bonne souplesse de fonctionnement, une grande robustesse et une maintenance aisée.

Les pompes de forage sont généralement entraînées par des moteurs électriques. La structure générale d'une pompe de forage est représentée dans la figure I.16.

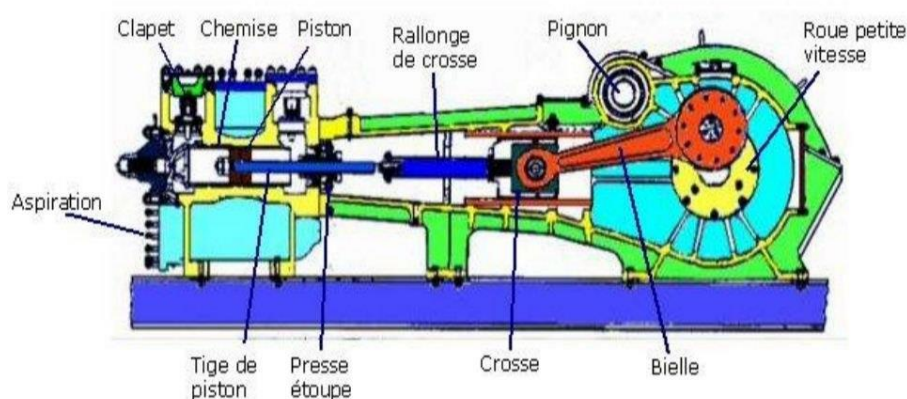


Figure I.16: Pompes de forage

4.1.4.3. Boue de forage

La boue de forage utilisée lors du creusement d'un puits assure plusieurs fonctions essentielles. Elle permet de nettoyer, refroidir et lubrifier le trépan afin d'augmenter sa durée de vie. Elle contribue également au maintien de la stabilité des parois du puits pour prévenir les risques d'effondrement. De plus, elle transporte les déblais de forage vers la surface et participe de manière importante à la sécurité des opérations de forage.

Dans sa forme la plus simple, un fluide de forage est composé d'une phase liquide (eau ou huile) et d'un agent viscosifiant. Afin de créer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de formation anormales, la densité du fluide est augmentée par l'ajout d'un matériau alourdisant, généralement la barytine.

Tous les fluides de forage possèdent globalement les mêmes propriétés fondamentales, seule leur valeur varie selon les conditions d'utilisation. Parmi ces propriétés figurent principalement la densité, la viscosité et la résistivité électrique [14].

4.1.5. Système de production d'énergie

Le système de production d'énergie fournit la puissance nécessaire au fonctionnement des différents équipements de l'installation de forage. Cette énergie est généralement produite par des groupes électrogènes puis transmise, sous forme électrique ou mécanique, aux principaux équipements tels que les pompes à boue, le treuil et la table de rotation.

Un groupe électrogène est habituellement constitué d'un moteur diesel couplé à un alternateur. Ce dernier produit un courant électrique alternatif destiné à alimenter les moteurs des équipements de forage par l'intermédiaire d'un système de conversion électrique, notamment le pont à thyristors.

La consommation énergétique représente un facteur important dans le coût total des opérations de forage, car la rentabilité et l'efficacité du chantier dépendent en grande partie de la maîtrise des dépenses énergétiques.

4.1.6. Système de contrôle des puits

Le système de contrôle des puits est principalement assuré par les obturateurs de sécurité ainsi que leurs équipements annexes. Ce système a pour objectif de garantir la sécurité des opérations de forage en cas d'influx de fluides provenant de la formation.

Ses principales fonctions sont les suivantes :

Assurer la fermeture du puits en cas de venue de fluides de formation ;

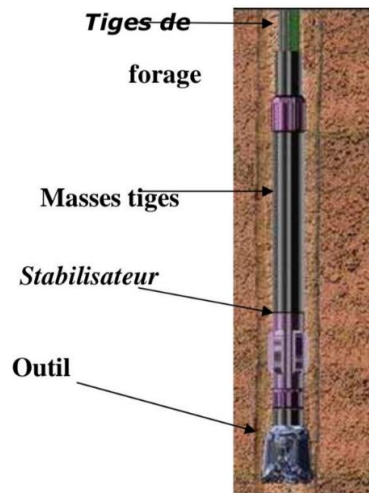
Permettre la circulation et le traitement de la boue afin d'ajuster sa densité en fonction de la pression du gisement ;

Évacuer de manière sécurisée vers la surface les fluides ayant pénétré dans le puits. Les opérations de contrôle des puits sont réalisées sous haute pression et nécessitent une grande vigilance ainsi qu'une surveillance permanente de la part de l'ensemble du personnel présent sur le chantier.

4.2. Équipements de fond (garniture de forage)

La garniture de forage est la partie active non visible. Elle est constituée, de deux parties

principales. La partie haute formée de tiges et la partie basse de l'assemblage de fond. [15]



FigureI.17:Garniture de forage

4.2.1. Tiges de forage

Ce sont des tubes en acier (drill pipes) d'environ 9 mètres de longueur et d'un diamètre extérieur variant entre 60 et 160 millimètres. Leur épaisseur est de l'ordre du centimètre. Ils sont raccordés les uns aux autres par des joints filetés coniques appelés tool joints.

L'ensemble du train de tiges est soumis à des efforts de traction et de torsion résultant de l'entraînement des tiges par la table de rotation [15],[5].



FigureI.18:Tiges de forage [5].

4.2.2. L'assemblage de fond (Bottom Hole Assembly – BHA)

L'assemblage de fond constitue la partie inférieure du train de forage, avec une longueur typique comprise entre 200 et 300 mètres. Il est composé d'une combinaison d'éléments spécifiques : les masses-tiges (drill collars), les stabilisateurs et l'outil de forage (trépan).

Le rôle de cet assemblage est essentiel pour la direction et la stabilité du puits. Il permet d'appliquer un poids contrôlé sur l'outil (Weight on Bit), d'optimiser le contact avec la formation et de maintenir le trépan perpendiculaire à la surface à forer, assurant ainsi une efficacité maximale du processus de forage. [15]

4.2.2.1. Masses-tiges ou drill collars

Les masses-tiges sont des tubes en acier à section renforcée, destinés à transmettre un poids important sur l'outil de forage, facilitant ainsi la pénétration dans la roche. Elles sont principalement soumises à des efforts de compression, tout en étant également exposées aux sollicitations en torsion générées par la rotation du train de forage.

Leur conception robuste est essentielle pour assurer la stabilité de l'assemblage de fond et réduire le risque de déviation du puits. [15]

4.2.2.2. Stabilisateurs

Les stabilisateurs sont des éléments de longueur réduite par rapport aux masses-tiges, avec un diamètre extérieur proche de celui du trépan. Ils sont intégrés dans l'assemblage de fond afin d'assurer le centrage précis et le guidage du train de forage.

En maintenant le trépan perpendiculaire à la formation, les stabilisateurs augmentent l'efficacité du forage et réduisent l'usure des outils. Leur surface externe, souvent équipée de lames spiralées, facilite la circulation du fluide de forage et contribue à l'évacuation des déblais, améliorant ainsi la performance globale de la perforation [15].

4.2.2.3. Trépan.

Le trépan est fixé à l'extrémité inférieure du train de tiges. Il constitue l'outil principal destiné au broyage et à la fragmentation de la roche durant les opérations de forage.

En rotation continue, il permet l'avancement du système de forage en agissant directement sur le front de taille.

Il existe plusieurs types de trépan, dont le choix dépend de la nature des formations géologiques ainsi que des conditions opératoires rencontrées. Parmi les plus utilisés figurent les trépan PDC (Polycrystalline Diamond Compact), caractérisés par l'intégration de cutters en diamant synthétique, leur conférant une grande efficacité de coupe et une excellente résistance à l'usure [9].



Figure I.19: Trépan.

5. Paramètres de forage

Les paramètres de réglage de la machine de forage représentent l'ensemble des variables opérationnelles influençant directement les performances et l'efficacité du processus de forage.

Ils comprennent notamment la vitesse de rotation, le poids sur l'outil, la circulation du fluide de forage ainsi que les caractéristiques de l'outil utilisé et de la formation traversée.

La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour assurer une opération de forage efficace, sûre et économiquement optimale. Parmi les indicateurs les plus importants figure le taux de pénétration (ROP), qui représente la profondeur forée par unité de temps et constitue l'un des paramètres déterminants de l'efficacité du forage [16].

Le développement du ROP dépend directement de la variation des conditions opératoires appliquées durant le forage.

Ces paramètres peuvent être classés en deux grandes catégories :

- les paramètres hydrauliques ;
- les paramètres mécaniques [17].

5.1. Paramètres hydrauliques

Les paramètres hydrauliques regroupent l'ensemble des variables liées au fluide de forage, notamment le débit, la pression, le type de fluide ainsi que ses propriétés physico-chimiques (densité, viscosité, etc.).

Ces paramètres assurent plusieurs fonctions essentielles : la lubrification de l'outil, le refroidissement du trépan et le nettoyage efficace du fond du puits. Par conséquent, ils influencent directement la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil de forage.

5.1.1. Type de boue

Le choix du type de boue dépend des performances recherchées et des conditions géologiques rencontrées.

Il correspond à la nature et à la composition du fluide de forage. On distingue généralement trois grandes catégories :

- La boue à base d'eau (Water Based Mud, WBM) ;
- La boue à base d'huile (Oil Based Mud, OBM) ;
- La boue synthétique (Synthetic Based Mud, SBM).

La boue synthétique est constituée d'un mélange d'eau et d'additifs chimiques spécifiques, permettant d'améliorer ses propriétés techniques [18].

5.1.2. Débit et pression hydraulique

Le débit de circulation et la pression hydraulique constituent des paramètres opérationnels fondamentaux. Ils doivent être correctement ajustés afin d'assurer une évacuation efficace des déblais vers la surface et de prévenir l'encrassement du trépan ou du puits.

Une gestion optimale de ces variables garantit une meilleure performance de forage et une stabilité accrue du système.

5.1.3. Vitesse de pompage (SPM)

Le SPM (Strokes Per Minute) représente le nombre de courses effectuées par la pompe à boue en une minute.

Il constitue un paramètre de contrôle essentiel du système de circulation des fluides de forage, car il permet de réguler directement le débit et les performances hydrauliques de l'installation.

La relation entre le débit de la boue et le SPM s'exprime par l'équation suivante :

$$Q = K \times SPM$$

où :

Q : débit de circulation de la boue (Flow rate)

K : coefficient de la pompe (volume déplacé par course)

SPM : nombre de courses par minute (Strokes Per Minute)

Ainsi, la variation du SPM permet de contrôler le débit de circulation de la boue de forage. Étant donné que les pompes de forage sont des pompes à déplacement positif, chaque course correspond à un volume précis de fluide déplacé. Par conséquent, toute augmentation du SPM entraîne une augmentation proportionnelle du débit ainsi que de la pression de circulation.

Le SPM joue également un rôle fondamental dans l'optimisation de l'hydraulique de forage, notamment en améliorant le nettoyage du puits et en facilitant la remontée des déblais vers la surface. De plus, les performances des pompes duplex et triplex dépendent directement de ce paramètre, qui influence le rendement volumétrique et la puissance hydraulique développée durant les opérations de forage. [19].

5.1.4. Caractéristiques du fluide de forage

Les propriétés physico-chimiques du fluide de forage jouent un rôle déterminant dans l'efficacité du nettoyage du fond, la stabilité du puits ainsi que dans la performance globale de l'outil. Parmi ces propriétés, on distingue principalement la densité, la viscosité, l'action des jets, le filtrat et la teneur en huile.

5.1.4.1. Densité de la boue

La densité de la boue constitue un paramètre essentiel dans le transport des déblais (cuttings).

Elle détermine la capacité du fluide à soulever et à entraîner les particules solides du fond du puits vers la surface.

Toutefois, son ajustement doit être réalisé avec précaution en fonction des conditions de forage et des caractéristiques de la formation traversée. Une densité insuffisante compromet le nettoyage du fond, tandis qu'une densité excessive peut engendrer des problèmes de pression et de stabilité.

Il est donc indispensable de maintenir la densité dans une plage optimale, garantissant un nettoyage efficace sans perturber l'équilibre du puits.[17].

5.1.4.2. Viscosité de la boue

La viscosité influence directement le comportement d'écoulement du fluide et, par conséquent, la vitesse d'avancement. Des études expérimentales ont montré qu'une viscosité élevée peut réduire la performance de forage.

En effet, plus le fluide est visqueux, plus il oppose une résistance à l'écoulement, ce qui limite sa capacité à pénétrer dans les pores et les micro-fractures créées par l'outil. Cette situation peut diminuer l'efficacité de la destruction mécanique de la formation et ralentir le processus de forage. [17].

5.1.4.3. Jets de la boue

Les jets hydrauliques jouent un rôle fondamental dans le nettoyage du fond du puits. Ils permettent non seulement d'évacuer les déblais, mais aussi de générer une turbulence suffisante pour nettoyer efficacement la surface active de l'outil. Pour garantir une action optimale, la vitesse des jets doit atteindre un seuil minimal d'environ 80 m/s, la plage recommandée se situant généralement entre 80 et 150 m/s [8].

Une vitesse adéquate améliore considérablement l'efficacité du forage en assurant un nettoyage continu et performant.

Tableau I.2: Débit de la boue en fonction de diamètre de puits

Diamètre forage(in)	Débit moyen(1/min)	Dusage pour vitesse aux évents (en1/32")	
		80 m/s	150 m/s
17 1/2	3500	22-22-22	16-16-17
12 1/4	2300	18-18-18	13-13-13
8 1/2	1300	13-14-14	9-10-10
6	700	10-10-10	7-7-7

5.1.4.4. Filtrat de la boue

L'influence du filtrat demeure complexe et dépend fortement des conditions de forage. En général, des valeurs modérées de densité et de viscosité, souvent associées à un filtrat relativement élevé, peuvent contribuer à l'amélioration des performances observées.

Cependant, un contrôle rigoureux du filtrat reste nécessaire afin d'éviter des effets indésirables sur la stabilité de la formation et l'intégrité des parois du puits.

5.1.4.5. Pourcentage d'huile dans la boue

L'ajout d'huile dans la formulation de la boue améliore sensiblement les performances de forage. L'huile agit comme agent lubrifiant, réduisant les frottements entre l'outil et la formation.

Cette lubrification favorise une augmentation de la vitesse d'avancement et contribue également à prolonger la durée de vie des composants mécaniques, notamment les roulements de l'outil.

5.2. Paramètres mécaniques

Les paramètres mécaniques résultent des actions physiques exercées sur la formation rocheuse au cours du forage. Ils correspondent aux efforts de compression, de rotation et de traction appliqués par l'outil afin de fragmenter la roche et d'assurer la progression du puits.

Autrement dit, ils traduisent l'ensemble des sollicitations mécaniques responsables de la pénétration du trépan dans la formation [20].

5.2.1. Poids sur l'outil (Weight on Bit – WOB)

Le poids sur l'outil (WOB) correspond à l'effort axial de compression appliqué le long de l'axe du trépan. Cette force permet aux taillants de pénétrer efficacement dans la roche et d'assurer sa fragmentation.

Dans la pratique, le WOB est souvent obtenu en exploitant le poids propre des masses-tiges de la garniture de forage. Sa valeur dépend de plusieurs paramètres, notamment :

- Le diamètre et le type de trépan ;
- La vitesse de rotation ;
- La nature de la formation traversée.

Le WOB est déterminé selon un principe physique prenant en compte le poids de la garniture en suspension libre (WOHL) ainsi que le poids de la garniture pendant le forage (WOHF) [17].

Un réglage approprié du poids sur l'outil est indispensable afin d'éviter une usure prématurée du trépan tout en maintenant une performance de forage optimale.

$$\text{WOB} = \text{WOBL} - \text{WOB}_f \dots \dots \dots \text{WOB}_1 - \text{WOB}_f \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

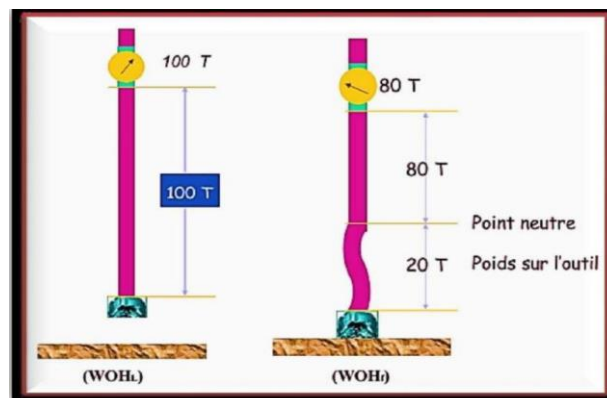


Figure I.20: Poids sur l'outil [21]

5.2.2. Vitesse de rotation (RPM)

La vitesse de rotation d'un outil autour de son axe de révolution, utilisée pour rogner une surface, est déterminée par le poids appliqué sur l'outil (WOB). En raison de la grande flexibilité du système, la vitesse peut varier entre la surface et le fond du puits. Elle est augmentée en fonction de la dureté de la formation et des paramètres de forage, mais peut

aussi être limitée par les vibrations affectant le train de tiges. Ces vibrations peuvent provoquer des résonances, susceptibles d'entraîner fatigue et rupture [21].

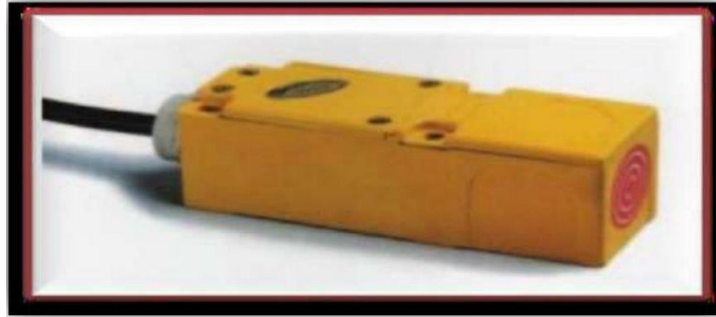


Figure I.21: Capteur de fréquence RPM [21].

5.2.3. Nature de la roche

La nature des formations rocheuses constitue un facteur déterminant dans les opérations de forage pétrolier. Une connaissance approfondie des caractéristiques géologiques et mécaniques des roches traversées est indispensable pour évaluer correctement les performances de forage et optimiser les paramètres opérationnels. Les réservoirs pétroliers sont principalement localisés dans des roches sédimentaires telles que les grès et les carbonates.

Les propriétés des roches, notamment la dureté, l'abrasivité, la résistance mécanique et la tendance à la déviation, influencent directement les mécanismes de destruction de la roche ainsi que les performances du trépan. Elles jouent également un rôle essentiel dans l'analyse des phénomènes d'usure et de détérioration des outils de forage.

Les formations contenant des minéraux durs et abrasifs provoquent généralement une usure accélérée des éléments de coupe du trépan, ce qui entraîne une diminution significative de la vitesse d'avancement (ROP) [22].

Par ailleurs, les différences de forabilité entre les formations nécessitent l'utilisation d'outils de forage adaptés aux caractéristiques du terrain traversé. Les formations tendres requièrent généralement des trépan munis de dents longues et effilées afin de favoriser une pénétration profonde et un meilleur arrachement de la roche. En revanche, les formations dures exigent des outils équipés de dents courtes et robustes, capables de supporter des charges élevées et de fracturer efficacement la roche [17].

5.2.4. Types d'outils de forage pétrolier

En raison de la grande variabilité des formations géologiques traversées, notamment en termes de dureté, de compacité et d'abrasivité, le choix de l'outil de forage le plus approprié constitue un enjeu technique majeur. Cette sélection est rendue complexe par la diversité des caractéristiques mécaniques et structurelles des outils disponibles.

Lors des premiers forages réalisés dans un champ pétrolier, une étude comparative des performances des différents outils ainsi que des paramètres opératoires (poids sur l'outil, vitesse de rotation, débit de boue, etc.) est généralement menée. Cette analyse a pour objectif d'identifier l'outil offrant le meilleur rendement technique tout en minimisant les coûts d'exploitation. En pratique, le meilleur outil est celui qui permet d'obtenir le coût par mètre foré le plus faible, tout en assurant la sécurité et l'efficacité des opérations.

Dans le forage pétrolier, plusieurs types d'outils sont utilisés. Toutefois, ils sont classés en deux grandes catégories principales : les outils à molettes et les outils à éléments de coupe fixes [23].

5.2.4.1. Outils à molettes

Les outils à molettes ont été introduits dans le forage rotary par H.R. Hughes en 1909. Ils peuvent être des bicônes (encore utilisés aujourd'hui pour certaines opérations de déviation par pression) ou des tricônes, ces derniers étant les plus utilisés dans les forages actuels.

Un tricône est constitué de trois bras forgés (figure I.22), usinés avec leurs tourillons. Ces éléments subissent ensuite un traitement thermique, puis sont assemblés par soudure [22].

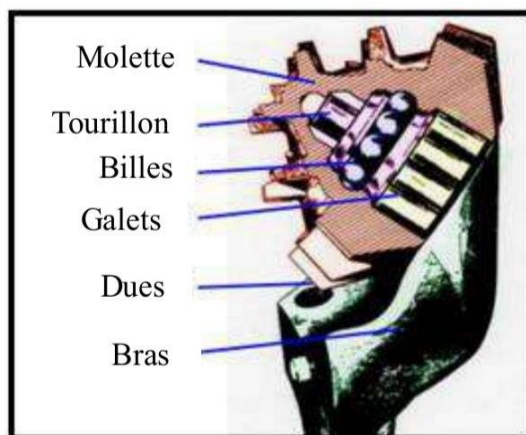
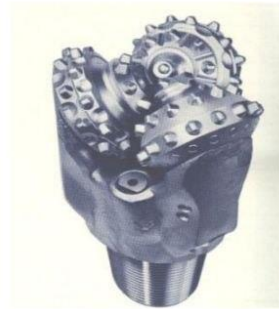


Figure I.22: Bras de l'outil

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

- Des dents usinées dans le cône.
- Des picots de carbure de tungstène.



Tricônes pour terrains durs

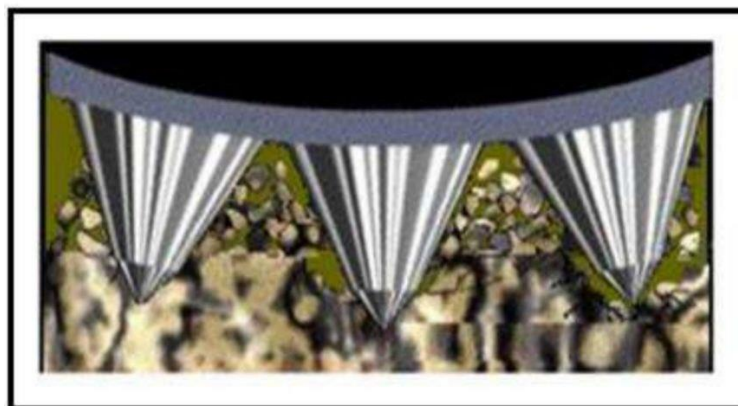
Tricônes pour terrains tendres

FigureI.23: Outils à molettes (tricône) [23]

5.2.4.1.1. Mode de travail d'un tricône

Sous l'action de la compression, les dents du tricône pénètrent la formation rocheuse et provoquent sa fragmentation par éclatement. Simultanément, lors de la rotation de l'outil, les molettes exercent un mouvement de ripage qui arrache les copeaux de roche.

Les phénomènes d'éclatement et de ripage sont donc complémentaires, et leur importance relative dépend de la nature du terrain. Dans les formations tendres, l'effet de ripage est prédominant, tandis que dans les formations dures, le mécanisme d'éclatement devient plus marqué [24].

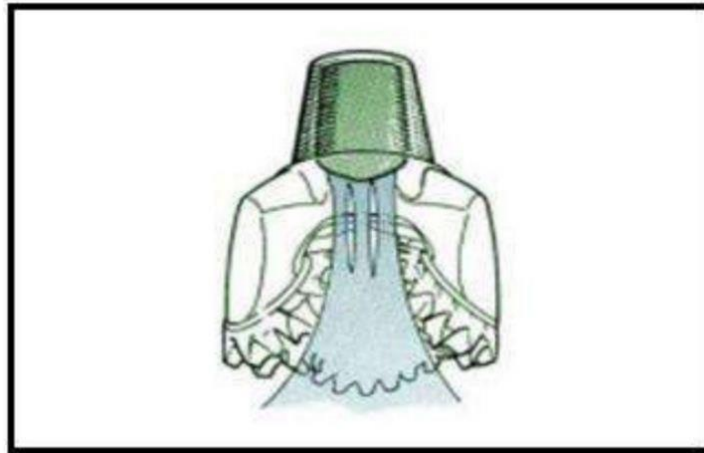


FigureI.24: Travail d'un outil [24]

5.2.4.1.2. L'hydraulique à l'outil

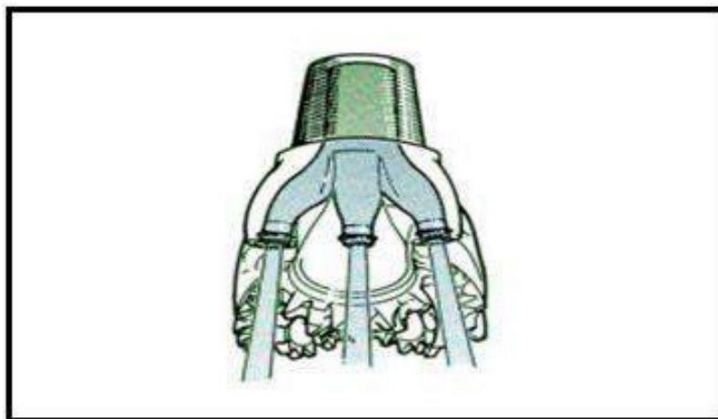
Le tricône dit « conventionnel » comporte un simple passage de fluide dans l'axe de l'outil.

Le fluide lave l'outil par l'intérieur des cônes avec moindre efficacité que des jets. On ne le rencontre pratiquement que pour les gros diamètres de forage.



FigureI.25: Outil conventionnel [24]

L'outil à jet comporte trois buses (jet nozzles) situées entre les bras du tricône. L'efficacité du jet peut être optimisée en ajustant le diamètre de passage. La turbulence générée est particulièrement efficace pour des vitesses comprises entre 80 et 150 m/s. Les jets ont pour rôle de nettoyer les molettes, de refroidir les paliers et, surtout, de refouler les cuttings vers l'espace annulaire. Sur certains outils, des buses rallongées permettent d'améliorer les performances de nettoyage [8].



FigureI.26: Outil à jet [24]

5.2.4.1.3. Système de lubrification

Les outils équipés de paliers étanches disposent d'un système de lubrification intégré dans chaque bras. Ce dispositif comprend un réservoir de graisse, un compensateur à membrane en caoutchouc ainsi qu'un conduit hermétique. Le compensateur permet d'équilibrer la pression au niveau du roulement entre celle du fluide de forage et celle de la graisse injectée lors de la fabrication [8].

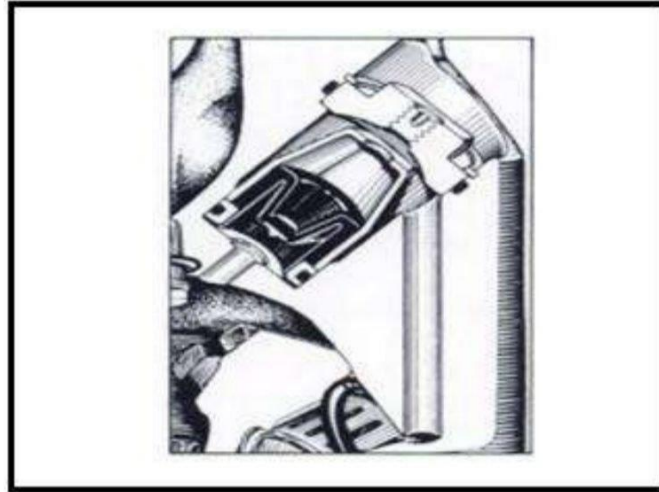


Figure I.27: Système de lubrification des paliers [8]

5.2.4.2. Outils diamant

Les outils monobloc ne comportent aucune pièce tournante. Ils sont fabriqués à partir de diamants naturels ou synthétiques. Les outils à diamant naturel fonctionnent comme une lime, tandis que ceux à diamant synthétique agissent plutôt comme un rabot.

Le diamant possède des propriétés physiques exceptionnelles:

- C'est la substance la plus dure connue, avec une résistance à l'écrasement très élevée : environ dix fois plus dure que l'acier et deux fois plus dure que le carbure de tungstène.
- Il présente une résistance à l'usure remarquable, environ dix fois supérieure à celle du carbure de tungstène.
- Il possède le plus faible coefficient de frottement connu, ce qui le rend plus glissant que le Téflon.
- Il est le meilleur conducteur de chaleur parmi les matériaux connus.

- Son coefficient de dilatation thermique est très faible, ce qui peut poser des problèmes lorsqu'il est combiné à d'autres matériaux (notamment pour la stabilité thermique des PDC).
- Son point de fusion est élevé (3 650 °C). Toutefois, à partir de 1 300 °C, il commence à se transformer en graphite en surface, entraînant une perte de résistance mécanique.

La masse des diamants s'exprime en carats (1 carat = 0,20 g). Un diamant d'un carat mesure environ 5 mm de diamètre. [25],[23].

On distingue deux grandes catégories d'outils diamantes, Outils à diamant naturel et les outils à diamant synthétique, subdivisés en :

- Outils à taillants PDC (Polycrystalline Diamond Compact)
- Outils à taillants TSP (Thermally Stable Polycrystalline Diamond)
- Les outils imprégnés.

5.2.4.2.1. Outils au diamant naturel

Le diamant est une cristallisation du carbone, avec une densité de 3,52. D'un point de vue chimique, le diamant et le graphite sont identiques, mais leurs propriétés physiques sont totalement opposées. Le graphite est fragile, noir et tendre, et est souvent utilisé comme lubrifiant. Le diamant, en revanche, est extrêmement dur, présente une excellente conductivité thermique, est hautement abrasif, généralement transparent, et constitue également un excellent isolant [8].

5.2.4.2.1.1. Caractéristiques principales du diamant naturel

Le diamant est le matériau le plus dur et a des caractéristiques supérieures parmi les matériaux que l'on connaisse. Pour cela, c'est l'élément essentiel dans l'outil de forage, qui résiste aux conditions de fond (haute température et haute pression) [25].

Tableau I.3: Caractéristiques principales du diamant naturel. Source: IAP

Caractéristiques	Unité	Diamant	PDC	Carbure tungstène	Acier
Dureté	Kg/mm ²	6000-9000	5000-8000	1475	558
Résistance à la Compression	10 ³ psi	1260	890	780	238
Conductivité thermique (25°)	cm.° C	5.2	4.3	1.00	0.48
Densité	g/cm ³	3.25	3-3.25	14..95	785
Point de fusion	°C	3650	-	2860	1530
Résistance à l'écrasement	Bars	80000	-	50000	15000
Module de Young	106 psi	105-152	132	92	29

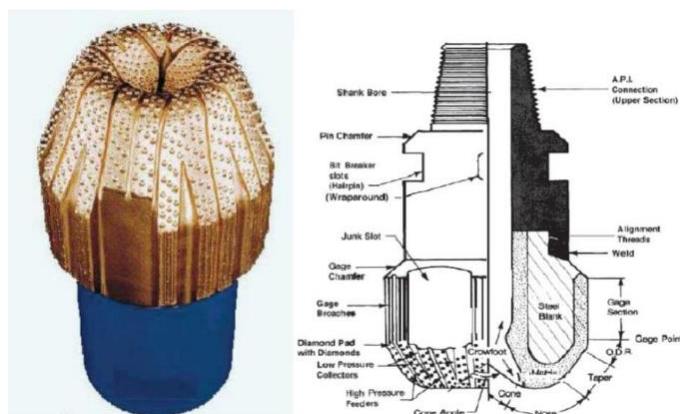


Figure I.28: Outil au diamant naturel [26]

5.2.4.2.1.2. Mode de destruction de la roche par diamant naturel

Le diamant naturel détruit la roche principalement par abrasion, en traçant un sillon dans la formation. Ce mécanisme combine à la fois des phénomènes de fracturation et de cisaillement, ce qui revient à labourer progressivement la surface rocheuse.

L'efficacité du forage dépend fortement de l'application simultanée d'un effort d'écrasement (poids sur l'outil) et d'un effort tangent généré par la rotation. Ainsi, pour assurer une pénétration efficace, il est nécessaire d'appliquer un poids relativement élevé et d'adopter une vitesse de rotation importante.

Cependant, l'un des principaux inconvénients du diamant naturel réside dans la petite taille des pierres utilisées. La profondeur de l'entaille produite dans la roche reste très faible, de l'ordre de 0,1 mm. Par conséquent, l'utilisation du diamant naturel est généralement limitée aux formations très dures et abrasives. Les vitesses d'avancement obtenues demeurent relativement faibles, généralement comprises entre 2 et 5 m/h [25].

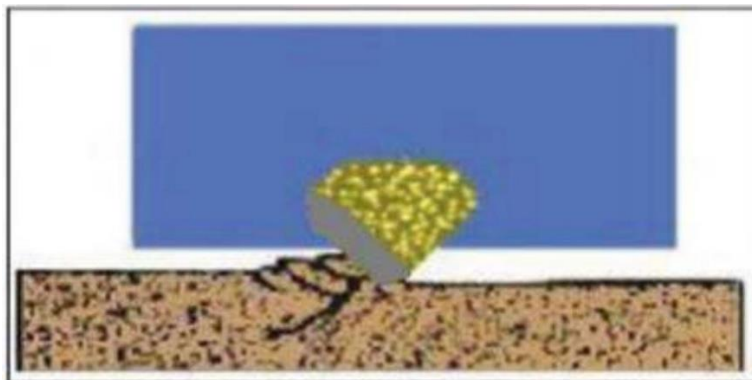


Figure I.29: Action d'un outil à diamant naturel [8].

5.2.4.2.2. Outils à diamant synthétique

Les outils à diamant synthétique sont utilisés dans le forage pétrolier pour leur grande résistance à l'usure et leur efficacité dans les formations dures et abrasives. Grâce à leurs éléments diamantés synthétiques, ils permettent d'améliorer les performances de forage ainsi que la vitesse de pénétration tout en assurant une meilleure durée de vie de l'outil.

Selon leur conception et leurs caractéristiques de fonctionnement, on distingue principalement trois types d'outils à diamant synthétique :

- Les outils PDC (Polycrystalline Diamond Compact).
- Les outils TSP (Thermally Stable Polycrystalline).
- Les outils imprégnés.

5.2.4.2.2.1. Outils PDC (Polycrystalline Diamond Compact)

Les outils PDC peuvent être conçus avec un corps en acier ou en matrice. Dans le cas d'un corps en acier, celui-ci est usiné puis recouvert d'une couche de carbure de tungstène afin de réduire l'érosion et d'améliorer la durabilité.

Les corps en matrice sont fabriqués à partir du même matériau à base de carbure de tungstène que celui utilisé pour les outils à diamant naturel.

L'avantage principal des outils PDC réside dans l'absence de parties mobiles, ce qui leur vaut le nom d'outils monobloc. Cependant, leur principal inconvénient est leur faible résistance aux températures élevées, puisqu'ils ne supportent généralement pas plus de 800 °C [27].



FigureI.30: Outils PDC [23].

5.2.4.2.2.2. Outils TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Pour pallier l'instabilité thermique des PDC, General Electric a développé un diamant synthétique dont le catalyseur est éliminé par acidification. Le diamant ainsi obtenu reste stable jusqu'à environ 1 200 °C. Cependant, l'élimination du cobalt empêche sa fixation sur un support, et il doit donc être maintenu mécaniquement, à l'instar du diamant naturel.

Un autre procédé remplace le cobalt et le nickel par du silicium, produisant un diamant encore plus stable thermiquement, mais qui ne peut lui non plus être fixé sur un support.

Les TSP (Thermally Stable Polycrystalline Diamond) existent sous plusieurs formes :

- Triangulaire : environ 3 pierres par carat, utilisé pour le forage de formations moyennement dures.
- Disque : environ 1 pierre par carat, adapté aux mêmes formations mais offrant une meilleure résistance à l'usure et aux chocs, avec des vitesses d'avancement et une durée de vie supérieures dans les formations dures, abrasives ou fracturées.

Les TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïque de dimensions similaires aux PDC. Cette configuration permet d'augmenter la vitesse d'avancement et la longévité de l'outil dans les formations tendres, abrasives, ainsi que dans les intercalations d'argiles et de roches plus dures, là où les PDC ne sont pas rentables.

Le TSP présente de nombreux avantages par rapport aux autres types de diamant :

- Il résiste mieux à la température que le PDC.
- Grâce à sa structure polycristalline, il résiste mieux aux chocs que le diamant naturel (à l'exception du carbonado, également polycristallin).
- Son usure irrégulière produit des faces tranchantes, tandis que le diamant naturel s'émousse. De ce fait, les performances des TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil.

En définitive, le TSP combine l'efficacité du PDC et la résistance à la température du diamant naturel [28].

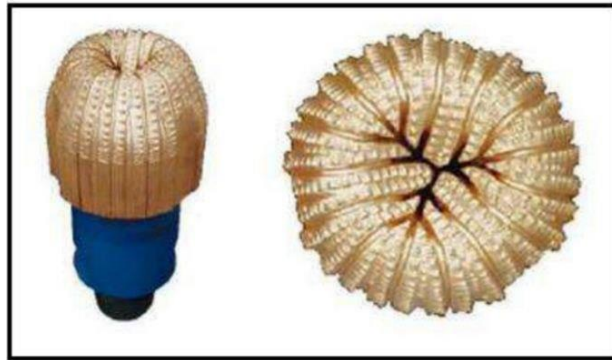


Figure I.31: Outils TSP [29]

5.2.4.2.2.3. Outils imprégnés

Ce type d'outil comporte des lames en carbure de tungstène imprégnées de petits grains de diamant, permettant de forer à travers des roches très dures. Le carbure de tungstène s'use progressivement à la surface de coupe, et les grains de diamant usés tombent, laissant place à de nouveaux grains non usés.

Cette technologie permet d'améliorer la durée de vie et le métrage foré de l'outil. Les outils imprégnés nécessitent une grande vitesse de rotation et un poids sur l'outil (WOB) faible pour obtenir un avancement acceptable.

Pour optimiser la performance des outils imprégnés, il est recommandé de les coupler avec des moteurs PDM High Speed ou avec des turbines [29].

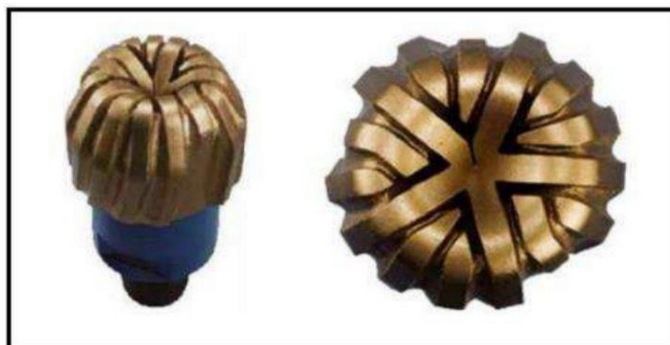


Figure I.32: Outils imprégnés [29]

6. Fabrication des outils à diamants

La fabrication des outils à diamants constitue une étape essentielle dans l'industrie du forage, car elle détermine directement leurs performances, leur résistance à l'usure ainsi que leur efficacité de pénétration dans les différentes formations géologiques. Selon les procédés de conception et la nature des diamants utilisés, plusieurs types d'outils peuvent être distingués, notamment les outils à diamants naturels, les diamants brasés et les diamants en imprégnation. Chacun de ces types présente des caractéristiques spécifiques adaptées à des conditions de forage particulières.

6.1. Outils à diamants naturels

On procède d'abord à la fabrication d'un moule en graphite où la position de chaque diamant et des lignes d'eau (canaux d'irrigation des diamants) est prévue.

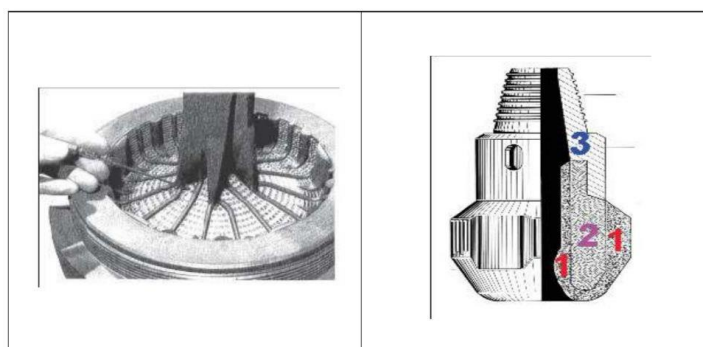


Figure I.33: Fabrication des outils [25].

Le moule est rempli de poudre de carbure de tungstène (1), au-dessus de laquelle on ajoute un liant à base de cuivre et de nickel, après la mise en place de la monture en acier (2). Le point de fusion du liant se situe entre 900 et 1 080 °C, selon sa composition et la dureté de la matrice que l'on souhaite obtenir.

L'ensemble est ensuite mis au four, parfois pendant plusieurs heures (le temps dépend de la taille de l'outil), afin de permettre une pénétration parfaite du liant entre les grains de carbure et autour des diamants.

Le raccord fileté (3), en acier au carbone conforme aux normes API, est ensuite rapporté par soudure sur la monture en acier, qui est elle-même en acier doux, afin d'éviter la trempe et la carburisation lors du passage au four dans le moule en graphite.

6.2. Diamants brasés

En raison de leur faible résistance thermique, il est impossible de placer les PDC directement dans le moule et de passer l'ensemble au four.

Le procédé de fabrication du moule est similaire à celui utilisé pour les diamants naturels. Lors du passage au four, les PDC sont remplacés par des pastilles de graphite. Une fois le moule terminé, ces pastilles sont retirées, et les taillants sont ensuite brasés. La brasure induit toutefois des contraintes thermiques sur les taillants, ce qui peut réduire leurs performances.

Aujourd'hui, les moules sont conçus par ordinateur et fabriqués en résine, ce qui permet de créer de nouveaux profils d'outil en un temps très court (quelques jours seulement) et d'obtenir un dessin du moule plus précis.

6.3. Diamants en imprégnation

Pour l'imprégnation, on utilise des diamants de très petite taille (150 pierres par carat, ce qui correspond à un diamètre de l'ordre de 0.8 mm).



Figure I.34: Diamants en imprégnation [16].

L'imprégnation des outils diamantés peut se faire selon deux méthodes :

1. Dans la masse de la matrice : un mélange de diamants et de poudre servant à fabriquer la matrice est placé au fond du moule, puis l'ensemble est passé au four. L'épaisseur de l'imprégnation est généralement de l'ordre du centimètre.
2. Par fabrication de segments de carbure de tungstène imprégnés de diamants : ces segments sont ensuite soit brasés, soit emmanchés par pression dans le corps de l'outil.

Ces outils sont utilisés pour forer des formations très dures et abrasives, tout en augmentant la durée de vie de l'outil. Au fur et à mesure de l'usure de la matrice, les diamants exposés se détachent et de nouveaux taillants apparaissent, maintenant ainsi l'efficacité de la coupe.

6.4. Avantages du diamant synthétique et du diamant naturel

Les deux types de produits (PDC et TSP) présentent une résistance à l'abrasion supérieure à celle des diamants naturels, bien qu'ils soient légèrement moins durs.

Le grand succès des diamants synthétiques s'explique par le fait que les scientifiques peuvent produire des diamants répondant exactement aux besoins spécifiques de l'industrie [30].

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales du forage pétrolier ainsi que les principaux équipements et systèmes utilisés lors des opérations de forage. Nous avons également exposé les différents types d'outils de forage ainsi que les paramètres mécaniques et hydrauliques influençant les performances du forage. Ces connaissances théoriques constituent une base essentielle pour mieux comprendre le fonctionnement des opérations de forage et améliorer leur efficacité en termes de sécurité, de coût et de temps d'exécution.

Chapitre II

Approche technique et optimisation

1. Introduction

La méthodologie des plans d'expériences propose une approche statistique rigoureuse pour optimiser le nombre d'essais tout en maximisant la précision des résultats. En s'appuyant sur des notions clés comme les facteurs et les niveaux, elle permet d'identifier l'influence des paramètres d'entrée sur un système via des méthodes telles que les plans factoriels. Ce chapitre est ainsi consacré à l'étude détaillée de ces outils stratégiques et à leur mise en œuvre pour l'analyse des systèmes.

2. Objectif des plans d'expérience

L'objectif fondamental des plans d'expériences peut se résumer par l'idée suivante : obtenir le plus d'informations possible en réalisant le moins d'essais. Une autre manière d'aborder cette problématique consiste à faire varier simultanément l'ensemble des variables contrôlées afin, là encore, de maximiser les informations recueillies tout en réduisant le nombre d'expériences.

Cette approche revêt une importance particulière dans le domaine industriel, où la diminution du nombre d'essais se traduit directement par un gain de temps et une amélioration de la productivité. Par ailleurs, produire des biens de la meilleure qualité possible tout en minimisant les coûts demeure un objectif universel pour tous les fabricants [31].

3. Généralités sur les plans d'expériences

Un plan d'expérience correspond à une démarche organisée visant à planifier des essais afin d'aboutir à des conclusions fiables et pertinentes, tout en restant efficace et peu coûteuse. Cette approche repose sur le principe qu'une expérience bien structurée facilite généralement l'analyse ainsi que l'interprétation statistique des résultats. Les plans d'expériences utilisent un vocabulaire et des termes spécifiques qu'il est important de clarifier et de définir. [32].

3.1. Facteur

Un facteur désigne une variable qui doit impérativement être maîtrisable et susceptible d'avoir un effet sur la réponse mesurée. La distinction essentielle entre une simple variable

et un facteur réside dans le fait qu'un facteur peut être ajusté ou modifié facilement. La valeur attribuée à ce facteur lors de la réalisation d'une expérience est appelée un niveau.

3.2. Réponse

On appelle réponse la grandeur mesurée lors de chaque expérience effectuée. Autrement dit, elle représente le résultat obtenu au cours de l'étude. Chaque point du domaine d'étude est associé à une réponse, et l'ensemble de ces réponses constitue la surface de réponse. La valeur d'une réponse ne peut être ajustée qu'indirectement, en modifiant les facteurs.

3.3. Notion d'espace expérimental

Lorsqu'un expérimentateur entreprend une étude, il s'intéresse généralement à une grandeur qu'il observe et mesure à chaque essai réalisé. Cette grandeur, appelée **réponse**, constitue la variable principale d'intérêt. La valeur de cette réponse est influencée par plusieurs paramètres. Au lieu d'utiliser le terme « variable », on adopte celui de facteur. Ainsi, la réponse dépend d'un ou de plusieurs facteurs.

Le premier facteur peut être représenté graphiquement par un axe orienté et gradué (Figure II.1). La valeur attribuée à un facteur lors de la réalisation d'un essai est appelée niveau. En pratique, l'étude de l'influence d'un facteur consiste souvent à limiter ses variations entre deux bornes définies : une borne inférieure, appelée niveau bas, et une borne supérieure, appelée niveau haut [31].



Figure II.1: Niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1) [33].

Le domaine de variation d'un facteur regroupe l'ensemble des valeurs comprises entre son niveau minimal et son niveau maximal.

Autrement dit, toutes les valeurs que peut prendre ce facteur entre ces deux limites constituent ce que l'on appelle le domaine de variation, ou simplement le domaine du facteur. Par convention, on note généralement le niveau bas par (-1) et le niveau haut par (+1).

Lorsqu'un deuxième facteur intervient, il est également représenté par un axe gradué et orienté. On y définit, de la même manière que pour le premier facteur, un niveau bas, un niveau haut ainsi que son domaine de variation. Cet axe est tracé perpendiculairement au premier, formant ainsi un repère cartésien. Ce repère correspond à un espace euclidien à deux dimensions, appelé espace expérimental.



Figure II.2 : Représentation de l'espace expérimental [34].

En pratique, l'expérimentateur choisit une portion de l'espace expérimental afin d'y mener son étude. Cette région spécifique de l'espace expérimental est appelée domaine d'étude

(Figure II.3). Ce dernier est déterminé à partir des niveaux supérieurs et inférieurs de l'ensemble des facteurs, ainsi que, le cas échéant, par des contraintes pouvant exister entre ces facteurs.

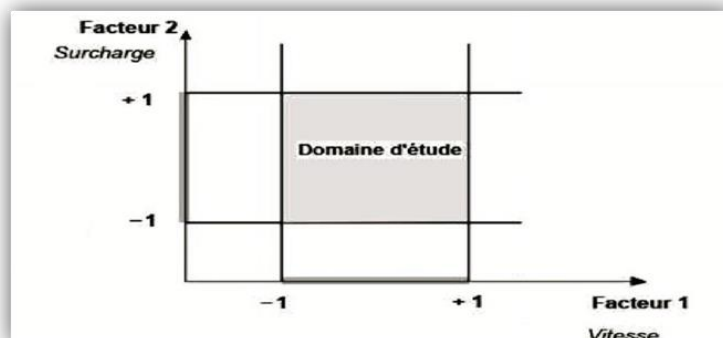


Figure II.3 : Représentation du domaine d'étude [34].

3.4. Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i correspondent aux coordonnées d'un point expérimental donné, tandis que y désigne la valeur de la réponse associée à ce point précis. On introduit alors un axe supplémentaire, perpendiculaire à l'espace expérimental, dédié à la représentation de la réponse. Ainsi, la représentation géométrique d'un plan d'expériences, accompagnée de la réponse, nécessite un espace de dimension supérieure d'une unité à celle de l'espace expérimental initial. Par conséquent, un plan comportant deux facteurs doit être représenté dans un espace tridimensionnel : deux dimensions pour les facteurs et une troisième pour la réponse.

À chaque point appartenant au domaine d'étude est associée une valeur de réponse. L'ensemble de ces points engendre ainsi des réponses qui se distribuent sur une surface particulière appelée surface de réponse (Figure II.4). La détermination du nombre de points expérimentaux ainsi que leur positionnement constitue le problème central dans l'élaboration des plans d'expériences. L'objectif recherché est d'obtenir la meilleure précision possible dans l'estimation de la surface de réponse, tout en réduisant au maximum le nombre d'expériences à réaliser.

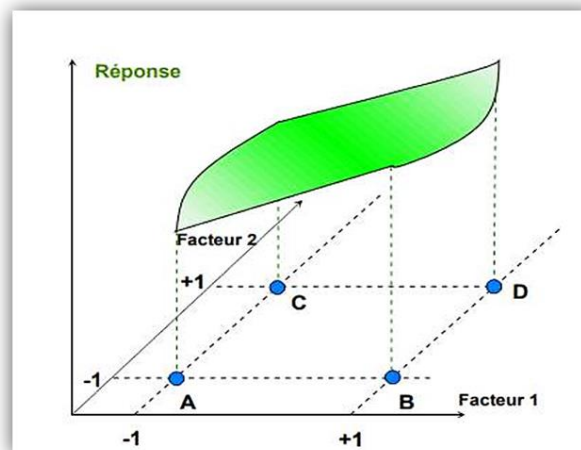


Figure II.4 : Surface de réponse [34].

3.5. Notion de modélisation mathématique

On suppose, dès le départ, l'existence d'une relation mathématique reliant la réponse aux différents facteurs étudiés. Pour exprimer cette relation, on utilise un développement limité basé sur la série de Taylor–Maclaurin. Dans ce cadre, les dérivées sont considérées comme constantes sur le domaine étudié, ce qui permet de simplifier l'expression obtenue.

Ainsi, ce développement se présente sous la forme d'un polynôme, dont le degré peut varier selon le niveau de précision souhaité et la complexité du phénomène analysé.

$$y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ii} X_i^2 + a_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z + e \quad (\text{II.2})$$

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. 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.

e : erreur totale.

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 [31]

$$Y = Xa + e \quad (\text{II. 3})$$

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 considère un système composé de n équations comportant p inconnues, ce qui signifie que le nombre d'équations est inférieur à celui des inconnues. Dans une telle situation, la résolution directe devient difficile, d'où le recours à une méthode de régression classique afin d'estimer les solutions de manière appropriée.

On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note : $\hat{a}$, Le résultat de ce calcul est :

$$\hat{a} = (\hat{X}X)^{-1}\hat{X}Y \quad (\text{II.4})$$

Il s'agit d'une formule dans laquelle la matrice $\hat{X}$ correspond à la matrice transposée de X. Aujourd'hui, plusieurs logiciels spécialisés prennent en charge ce type de calcul de manière automatique et fournissent directement les valeurs des différents coefficients, ce qui facilite grandement les traitements et l'analyse des résultats.

4. Différents types des plans d'expérience

4.1. Plans factoriels complets à deux niveaux

Les plans factoriels complets à deux niveaux figurent parmi les plus simples à mettre en œuvre, tout en étant particulièrement importants, car ils constituent le point de départ de toute étude expérimentale. Les résultats initiaux obtenus à l'aide de ces plans peuvent ensuite être enrichis et approfondis par la réalisation d'expériences supplémentaires, afin d'atteindre le niveau de précision et la quantité d'informations souhaités.

4.1.1. Plans complets à deux facteurs

Pour deux facteurs, la zone d'étude prend la forme d'un carré, ce qui correspond à la représentation d'un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique supposé dans ce cas est un modèle linéaire, c'est-à-dire du premier degré, vis-à-vis de chacun des facteurs considérés:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{II. 4})$$

Où

y : est la réponse

x : variables de prédiction appelées facteurs

a : sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Nous allons d'abord décrire le cas simple du plan 22. Commençons par expliquer cette notation :

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

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

4.1.1.1. Présentation des données sous forme de tableau

Les représentations géométriques sont pratiques et très explicites ; cependant, dès que le nombre de facteurs dépasse trois, leur utilisation devient impossible, notamment dans le cas des espaces multidimensionnels.

Ce tableau est appelé tableau d'expérimentation lorsqu'il est construit avec les unités physiques habituelles (Tableau II.1), et plan d'expériences lorsqu'il est exprimé en unités codées (Tableau II.2). Dans ce dernier cas, on rappelle la signification des unités codées en indiquant, pour chaque facteur, leurs valeurs en unités physiques habituelles [31].

Tableau II.1: Tableau d'expérimentation (unités courantes).

N° essai	le variable 1	le variable 2
1	Le niveau bas	Le niveau bas
2	le niveau haut	Le niveau bas
3	Le niveau bas	le niveau haut
4	le niveau haut	le niveau haut

Tableau II.2: Plan d'expériences (unités codées).

N° essai	Facteur 1	Facteur 2
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

Quel que soit le choix des facteurs ou des domaines d'étude considérés, le remplacement des variables naturelles par des variables codées permet d'uniformiser le domaine de variation de chaque facteur (compris entre -1 et +1) et rend ainsi possible la comparaison directe de leurs effets respectifs.

Il est donc nécessaire de convertir les variables réelles de conception en variables codées, lesquelles sont définies comme étant adimensionnelles, centrées autour d'une moyenne nulle et présentant un même écart-type. L'objectif de cette transformation est de traiter l'ensemble des facteurs de manière homogène et plus simple, grâce à une représentation plus commode. La règle de transformation des variables usuelles en variables codées s'écrit comme suit :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} - R_{min}]}$$

Ou :

- X_i : variables de prédiction centrée réduite (codée)
- R_i : Variable courante (naturelle, réelle)

Le niveau bas est ainsi codé - 1 alors que le niveau haut est codé + 1.

4.1.1.2. Présentation des résultats d'essais

A chaque essai, l'expérimentateur mesure la réponse qu'il a choisie. La réponse de l'essai n° 1 est y_1 . Celle de l'essai n° 2 est y_2 , et ainsi de suite. Ces réponses sont indiquées en face chaque essai et sont rassemblées dans la colonne «Réponse» (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Plan d'expériences et résultats expérimentaux.

N° essai	Facteur 1	Facteur 2	Réponse
1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	Y_2
3	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	Y_4

4.1.2. Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux

Il est possible d'accroître le nombre de facteurs. L'espace expérimental comporte un nombre de dimensions égal à celui des facteurs considérés.

Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté $2k$.

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur

On remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser.

4.1.3. Avantages et inconvénients des plans factoriels complets

Les plans factoriels complets sont considérés comme des plans fiables, car ils offrent la possibilité d'identifier l'ensemble des effets ainsi que toutes les interactions de manière claire et sans ambiguïté.

Le nombre d'expériences requises doit être au minimum égal au nombre total de coefficients à estimer.

Les essais sont organisés de façon à ce que les coefficients soient évalués avec une variance aussi faible que possible.

Grâce à leur facilité d'exploitation, ces plans garantissent un bon niveau d'efficacité au regard des résultats obtenus.

Néanmoins ils présentent une limite essentielle : le nombre d'essais augmente très rapidement avec le nombre de facteurs. On atteint déjà 128 expériences (27) pour 7 facteurs ce qui devient donc très vite difficile à réaliser dans la pratique.

4.2. Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux

Les plans factoriels fractionnaires constituent une catégorie de plans d'expériences qui permettent d'examiner l'ensemble des facteurs tout en diminuant le nombre d'essais par rapport aux plans factoriels complets. Ils ont été élaborés afin de limiter l'augmentation rapide et souvent excessive du nombre d'expériences requises dans les plans complets. Ainsi, l'objectif principal des plans fractionnaires est de réduire de manière significative le nombre d'essais nécessaires tout en conservant une quantité d'information exploitable.

4.2.1. Notation des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté 2^k . Le plan fractionnaire, moitié du plan complet possède $1/2 \cdot 2^k$ ou 2^{k-1} essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

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

Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 2^1 .

Un plan 2^{5-2} permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par $2^2 = 4$.

Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par 2^q . Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences qu'un plan factoriel.

Le nombre d'expériences : n^{k-q}

La matrice d'expériences est donc divisée k fois.

4.2.2. Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base

On peut étudier autant de facteurs supplémentaires qu'il y a d'interactions dans le plan de base. Sur un plan de base 2^2 il y a une interaction. On pourra donc étudier 3 facteurs, deux sur les colonnes 1 et 2, le troisième sur la colonne de l'interaction. Sur un plan de base 2^3 , il y a quatre interactions. On pourra donc étudier 7 facteurs. Trois sur les colonnes 1, 2 et 3. Les quatre autres sur les colonnes d'interaction 12, 13, 23 et 123.

Le Tableau II.4 indique le nombre maximum de facteurs que l'on peut étudier sur différents plans.

Tableau II.4 : Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base donné.

Plan de base	Nombre de facteurs principaux	Nombre d'interactions	Nombre maximum de facteurs étudiés
2^2	2	1	3
2^3	3	4	7
2^4	4	11	15
2^5	5	26	31

5. Autres Plan d'expériences

5.1. 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.

Une des contributions majeures de G.Taguchi est d'avoir mis au point des outils qui simplifient, et, surtout, fiabilisent considérablement cette tâche notamment une collection de matrices d'expériences fractionnaires orthogonales standard, qui s'avèrent suffisantes pour la quasi-totalité des situations industrielles.

Chaque matrice est désignée par un symbole Par exemple :

L8 (27) signifie que l'on étudie 7 facteurs à 2 niveaux et qu'il faut réaliser 8 essais.L18 (21 x 37) signifie que l'on étudie 1 facteur à 2 niveaux et 7 facteurs à 3 niveaux et qu'il faut réaliser 18 essais. [35]

5.2. Plans de Koshal

Les plans de Koshal constituent des plans expérimentaux qui permettent uniquement d'estimer les effets principaux des facteurs. Les interactions entre ces derniers ne peuvent pas être évaluées. Le modèle mathématique associé s'écrit comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (\text{II. 10})$$

Ces plans, peu connus, sont très pratiques pour dégrossir un problème. Ils offrent l'avantage de donner directement l'effet des facteurs. Ils forment le début d'un plan factoriel qu'il est toujours loisible de compléter pour obtenir un plan complet ou fractionnaire. [36]

5.3. Plans de Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner correspondent à des plans factoriels fractionnaires simplifiés qui permettent d'évaluer les effets des facteurs ainsi que les interactions du second ordre. Toutes les autres interactions sont considérées comme négligeables avant même la réalisation des expériences. Le modèle mathématique retenu au début de l'étude s'écrit donc comme suit [31]

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (\text{II. 11})$$

6. Méthode RSM (response surface méthodologie)

Le but de l'étude des surfaces de réponses est une modélisation du phénomène étudié, c'est une suite assez naturelle d'une étape de criblage et constitue un moyen efficace de l'optimisation du dispositif expérimentale ou du procédé étudié. Dans la méthodologie des surfaces de réponses, on cherche à relier une réponse continue Y à k facteurs contrôlés $X_1, X_2, \dots, X_k$, à l'aide d'un modèle de régression, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs. Dans la plupart des cas, ce dernier est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Après l'étape d'ajustement du modèle on représente graphiquement celui-ci à l'aide de graphiques de type « surface de réponse », qui permettent de visualiser le comportement de la réponse en fonction des facteurs, ces graphiques procurent une aide appréciable dans l'exploitation du modèle en vue d'une optimisation du système expérimenta.

6.1. Principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) regroupe un ensemble d'approches statistiques et mathématiques employées pour concevoir, améliorer et optimiser des procédés. Elle possède également des applications majeures dans la conception, le

développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'optimisation de la conception de produits existants.

L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs [37].

6.2. Étapes de la méthodologie de surface de réponse

Il est envisageable de diviser une étude d'optimisation fondée sur la méthode RSM en trois phases distinctes :

- **Première étape** : travail préliminaire, au cours duquel sont déterminés les paramètres indépendants ainsi que leurs niveaux.
- **Deuxième étape** : mise en œuvre du plan d'expériences et réalisation des essais selon le plan choisi, puis développement du modèle décrivant la relation entre la réponse et les différents facteurs d'étude. Cette étape comprend également le traitement et l'analyse des données, ainsi que la vérification de la qualité de l'ajustement du modèle obtenu.
- **Troisième étape** : représentation des surfaces de réponse dans un espace à trois dimensions (3D) et détermination des points optimaux.

6.3. Avantages de (RSM)

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) offre de nombreux avantages par rapport aux approches expérimentales classiques, notamment les méthodes dites « un facteur à la fois », dans lesquelles une seule variable est modifiée à chaque essai.

Premièrement, la RSM permet d'obtenir une grande quantité d'informations à partir d'un nombre réduit d'expériences. En effet, les méthodes classiques sont souvent longues et nécessitent un nombre important d'essais pour comprendre le comportement d'un système.

Deuxièmement, la RSM permet de mettre en évidence les effets d'interaction entre les paramètres indépendants sur la réponse. L'équation du modèle permet de représenter clairement ces interactions, notamment pour les combinaisons binaires des facteurs étudiés.

De plus, le modèle empirique reliant la réponse aux variables indépendantes est utilisé pour analyser et comprendre le fonctionnement du procédé. Ainsi, la RSM constitue un outil efficace pour l'optimisation des procédés de fabrication [38].

6.4. Plans de Box-Behnken:

Les points expérimentaux sont situés au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (Figure II.5). Ce plan comporte douze essais, auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point(s) central(aux).

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 situés sur une sphère (ou une hypersphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. Il s'agit du critère d'isovariance par rotation.

Le plan de Box–Behnken le plus connu est celui permettant d'étudier trois facteurs [31].

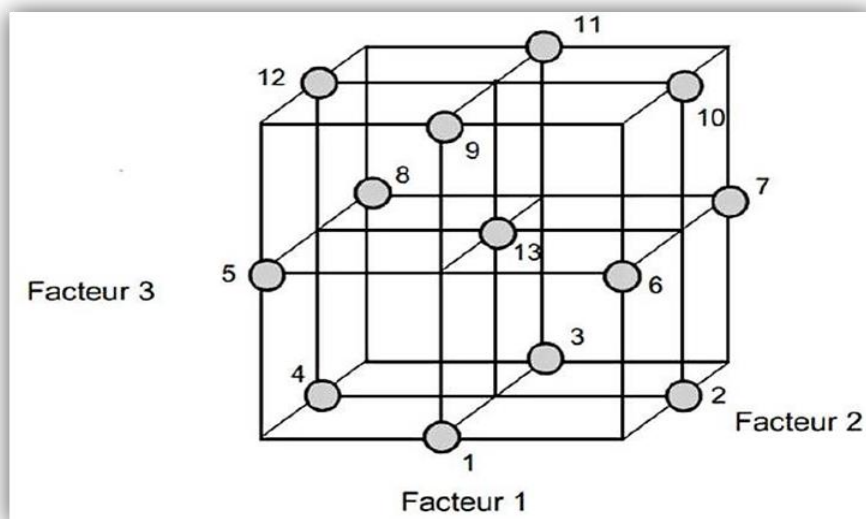


Figure II.5: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [34].

Tableau II. 5 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs.

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

7.Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer les fondements théoriques et les mécanismes opérationnels de la méthodologie des plans d'expériences. Nous avons mis en évidence l'efficacité des plans factoriels pour explorer les différents scénarios de manière rationnelle et économique. La maîtrise de ces outils constitue un préalable indispensable pour passer à la phase de mise en pratique et d'analyse technique.

Chapitre III

Application de la méthode des surfaces de réponse (RSM)

1. Introduction

Cette étude appuie principalement sur l'évaluation de l'influence des paramètres de forage sur le comportement du taux de pénétration (ROP).. Cette approche permet d'évaluer la qualité du modèle mathématique qui explique la relation entre les différents paramètres de l'étude et détermine les conditions opératoires optimales contribuant à l'amélioration des performances du processus de forage.

2. Configuration matérielle

Les données de cette étude ont été obtenues à l'aide d'un simulateur de forage pétrolier appartenant à l'Algerian National Drilling Company (ENAFOR). La figure III.1. illustre la conception du simulateur utilisé pour la réalisation des différents essais.

Ce dispositif reproduit avec précision la structure d'un appareil de forage conventionnel, offrant ainsi un cadre expérimental fiable. Il est équipé de commandes de forage traditionnelles, d'instruments de mesure analogiques ainsi que d'un système de freinage manuel, permettant de recréer un environnement de simulation réaliste et contrôlé.



Figure III.1: simulateur de forage

Le tableau III.1 présente les différentes valeurs des facteurs de forage sélectionnées et utilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau III.1: valeurs des paramètres.

Facteur	A	B	C
Symbol	WOB	RPM	SPM
Unités	T	tr/min	c/min
L1	10	80	60
L2	15	100	80
L3	20	120	100

Tableau III.2 : Niveaux de facteurs codés

Symbol	Bas	Haut
RPM	-1	+1
WOB	-1	+1
SPM	-1	+1

Les résultats du taux de pénétration obtenus des test sont été regroupés dans le tableau III.3

Tableau III.3 : Résultats des tests

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Réponse
N°	A:WOB	B:RPM	C:SPM	ROP
	T	tr/min	c/min	m/h
1	15	120	100	6.9
2	15	100	80	6.4
3	20	100	60	8.5
4	10	100	100	4
5	15	80	100	5.3
6	15	100	80	6.4
7	20	100	100	8.2
8	20	80	80	7.2
9	10	80	80	3.4
10	15	120	60	7.1
11	15	100	80	6.4
12	10	120	80	4.8
13	15	100	80	6.4
14	15	100	80	6.4
15	20	120	80	9.9
16	10	100	60	4.3
17	15	80	60	5.4

3. Analyse des données

L'analyse des données obtenues est basée sur l'analyse de variance. L'analyse de variance, appelée également ANOVA (Analysis of Variance), est une méthode statistique permettant de comparer les moyennes de plusieurs groupes expérimentaux. Elle est utilisée pour déterminer l'existence de différences statistiquement significatives entre les moyennes de plus de deux populations.

Lorsque le test ANOVA révèle une significativité statistique, cela indique que les variables explicatives (les paramètres étudiés) exercent un effet significatif sur la variable de réponse (variable dépendante). Les résultats de l'analyse de variance sont résumés dans le tableau III.4.

Tableau III.4: Analyse de variance.

Source	Somme des carrés	dl	Moyenne quadratique	Valeur F	Valeur p	
Modèle	44.91	9	4.99	285.12	< 0.0001	signifiant
A-WOB	37.41	1	37.41	2137.79	< 0.0001	
B-RPM	6.84	1	6.84	391.14	< 0.0001	
C-SPM	0.1013	1	0.1013	5.79	0.0471	
AB-WOB RPM	0.4225	1	0.4225	24.14	0.0017	
AC-WOB SPM	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
BC-RPM SPM	0.0025	1	0.0025	0.1429	0.7167	
$A^2 - WOB^2$	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
$B^2 - RPM^2$	0.0237	1	0.0237	1.35	0.2828	
$C^2 - SPM^2$	0.0947	1	0.0947	5.41	0.0529	
Résiduelle	0.1225	7	0.0175			
Cor Total	45.03	16				

La valeur F du modèle (285,12) indique que le modèle quadratique est hautement significatif. La probabilité qu'une telle valeur de F soit due uniquement au hasard est inférieure à 0,01 %, ce qui confirme la robustesse du modèle.

Les valeurs de p inférieures à 0,05 montrent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, les facteurs A (WOB), B (RPM), C (SPM), ainsi que l'interaction entre le poids sur l'outil (WOB) et la vitesse de rotation (RPM), exercent un effet significatif sur la variable de réponse ROP.

L'analyse de variance montre également que le modèle théorique est bien ajusté aux données expérimentales. Cela est confirmé par la faible valeur de la somme des carrés des résidus (0,1225) comparée à la somme totale des carrés (45,03), indiquant que l'erreur est relativement faible.

Enfin, les coefficients d'ajustement, notamment le coefficient de détermination R^2 , confirment la qualité globale du modèle développé et sa capacité à prédire de manière fiable le ROP en fonction des paramètres de forage.

4. statistiques d'ajustement

Tableau III.5: indices statistiques R^2

R^2	0.9973
Adjusted R^2	0.9938
Predicted R^2	0.9565

La valeur du R^2 prédit (0,9565) est en bon accord avec celle du R^2 ajusté (0,9938), la différence entre les deux étant inférieure à 0,2, ce qui confirme la robustesse et la stabilité du modèle.

Ces résultats montrent que le modèle est fiable et suffisamment performant pour prédire le comportement de ROP.

5. Visualisation des résultats

La régression est une technique largement utilisée en statistique pour établir une relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. Son application suppose l'existence d'un lien causal entre les variables considérées dans le modèle.

Afin d'évaluer la qualité du modèle développé, une comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs réelles de ROP a été réalisée. La Figure III.2 présente le développement de ROP prédite en fonction de la variation de ROP réelle.

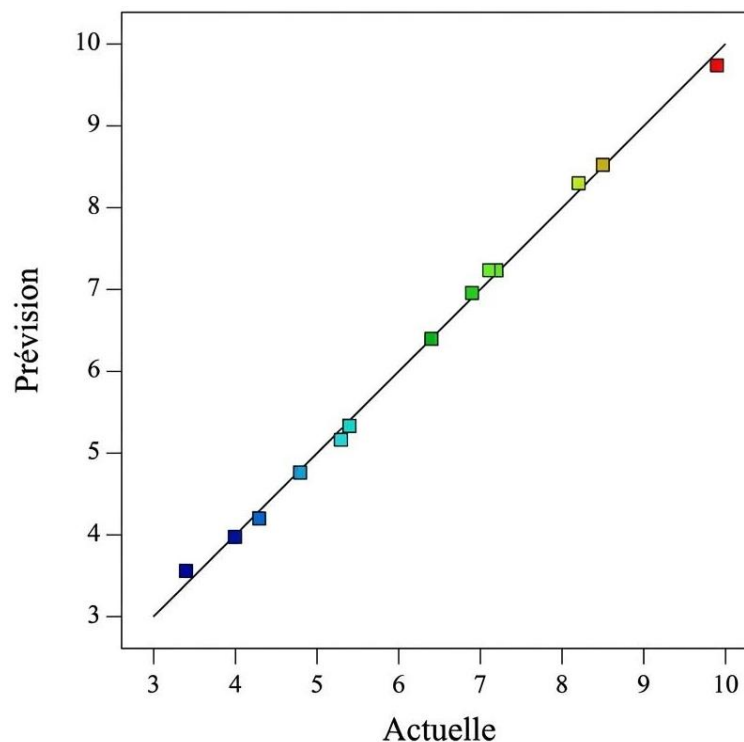


Figure III.2: Variation des valeurs prédites du ROP en fonction des valeurs mesurées.

La Figure III.2 montre que les points représentant les données réelles sont fortement concentrés autour de la droite de corrélation, ce qui traduit une excellente concordance entre les valeurs mesurées et celles prédites par le modèle.

Cette proximité indique que les écarts de prédiction sont faibles, confirmant ainsi la précision et la fiabilité du modèle. Les légères dispersions observées restent limitées et n'affectent pas significativement la qualité de l'ajustement.

En conclusion, ces résultats mettent en évidence la bonne performance prédictive du modèle ainsi que sa capacité à représenter fidèlement le comportement réel du phénomène étudié.

6. Modélisation mathématique

Le modèle mathématique développé permet d'estimer le taux de pénétration (ROP) pour différentes combinaisons des trois paramètres étudiés, à condition que leurs valeurs restent dans le domaine expérimental considéré. Il constitue ainsi un outil fiable pour la prédiction et l'analyse du comportement du système.

6.1. Équation en facteurs codés

Le modèle obtenu, exprimé en variables codées, est donné par l'équation suivante :

$$\text{ROP} = 6.4 + (2.1625)A + (0.925)B + (-0.1125)C + (0.325)AB + (-1.64115^{-16})AC + (-0.025)BC + (-2.64953^{-16})A^2 + (-0.075)B^2 + (-0.15)C^2$$

Cette formulation en facteurs codés permet d'estimer la réponse pour différentes combinaisons des niveaux des variables étudiées. Par convention, les niveaux élevés des facteurs sont codés par +1, tandis que les niveaux faibles sont codés par -1.

Par ailleurs, cette écriture facilite l'interprétation du modèle, notamment en mettant en évidence l'influence relative de chaque facteur et de leurs interactions, à travers la comparaison des coefficients associés.

6.2. Équation en fonction des facteurs réels

$$\text{ROP} = -4.1625 + (0.1075)\text{WOB} + (0.04)\text{RPM} + (0.060625)\text{SPM} + (0.00325)\text{WOB RPM} + (3.24681^{-18})\text{WOB SPM} + (-6.25^{-0.5})\text{RPM SPM} + (1.25539^{-17})\text{WOB}^2 + (-0.0001875)\text{RPM}^2 + (-0.000375)\text{SPM}^2$$

Cette équation exprimée en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse (ROP) pour des valeurs données de chaque facteur. Les niveaux doivent être introduits dans leurs unités d'origine pour chaque variable.

Il est important de noter que cette équation ne doit pas être utilisée pour comparer directement l'impact relatif des facteurs, car les coefficients sont ajustés en fonction des unités de mesure de chaque variable, et l'ordonnée à l'origine n'est pas centrée dans l'espace expérimental.

7. Influence des différents facteurs sur le taux de pénétration (ROP)

Cette section consacre l'analyse de l'impacte des principaux paramètres opératoires de forage , à savoir le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le débit de coups (SPM), sur le taux de pénétration (ROP). L'objectif est de mettre en évidence la sensibilité du ROP vis-à-vis de ces facteurs et d'identifier leur influence respective sur la performance de forage.

7.1. Influence du l'outil de forage (WOB) sur le taux de pénétration (ROP)

La figure (III.3) illustre la variation du taux de penetration (ROP) en fonction du poids appliqué sur l'outil (WOB). Courbe réalisée à l'aide du logiciel Design-Expert 11

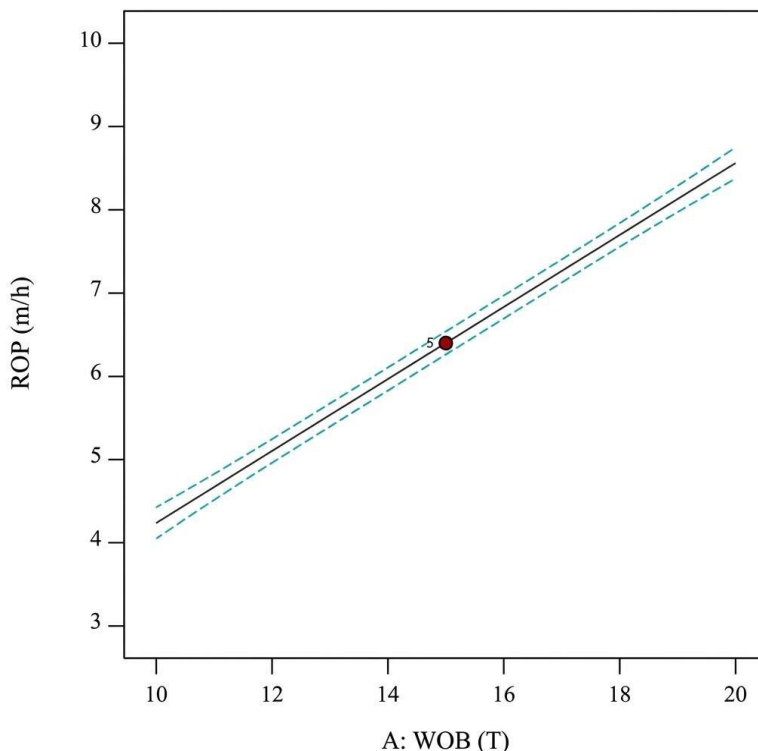


Figure III.3: Variation de ROP en fonction de WOB

La figure III.3 présente la relation entre le taux de pénétration (ROP) et le poids sur le trépan (WOB). On observe que le ROP augmente progressivement avec l'augmentation du

WOB. Les résultats mettent en évidence une relation globalement proportionnelle entre l'évolution du ROP et les variations du WOB.

7.2. Influence de la vitesse de rotation (RPM) sur le taux de pénétration (ROP)

L'effet de la vitesse de rotation (RPM) sur le taux de pénétration (ROP) est présenté dans la figure (III.4). Courbe réalisée à l'aide du logiciel Design-Expert 11

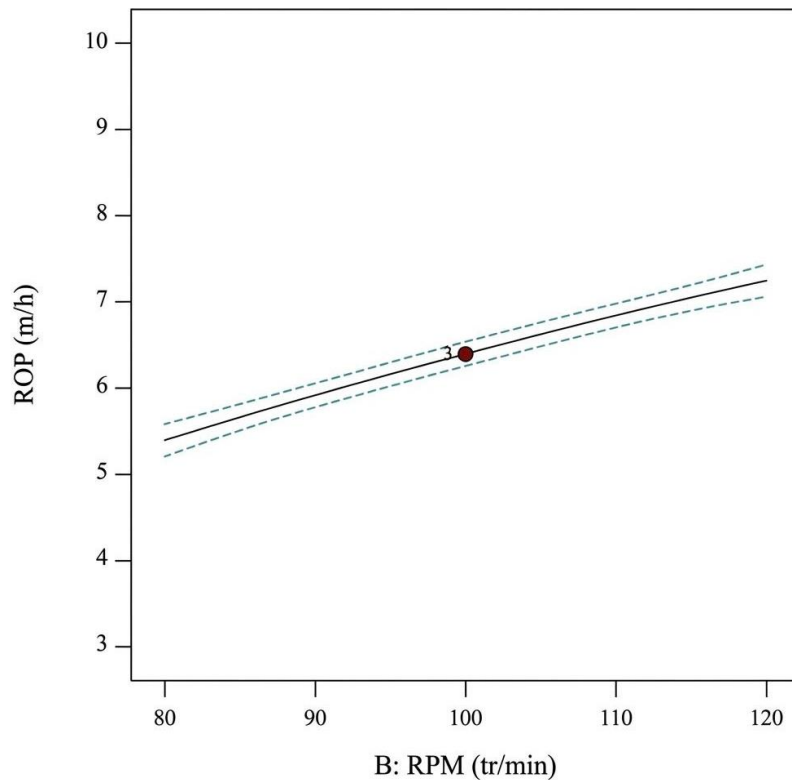


Figure III.4: Variation ROP en fonction de RPM

La figure III.4 illustre l'évolution du taux d'avancement de l'outil (ROP) en fonction de la vitesse de rotation (RPM). On observe que le ROP augmente avec l'augmentation du RPM, ce qui met en évidence une relation globalement positive entre ces deux paramètres. Cette tendance indique que l'augmentation de la vitesse de rotation améliore l'efficacité du forage.

7.3. Influence coups par minute (SPM) sur le taux de pénétration (ROP)

La figure (III.5) montre l'effet du SPM sur le taux de pénétration (ROP).

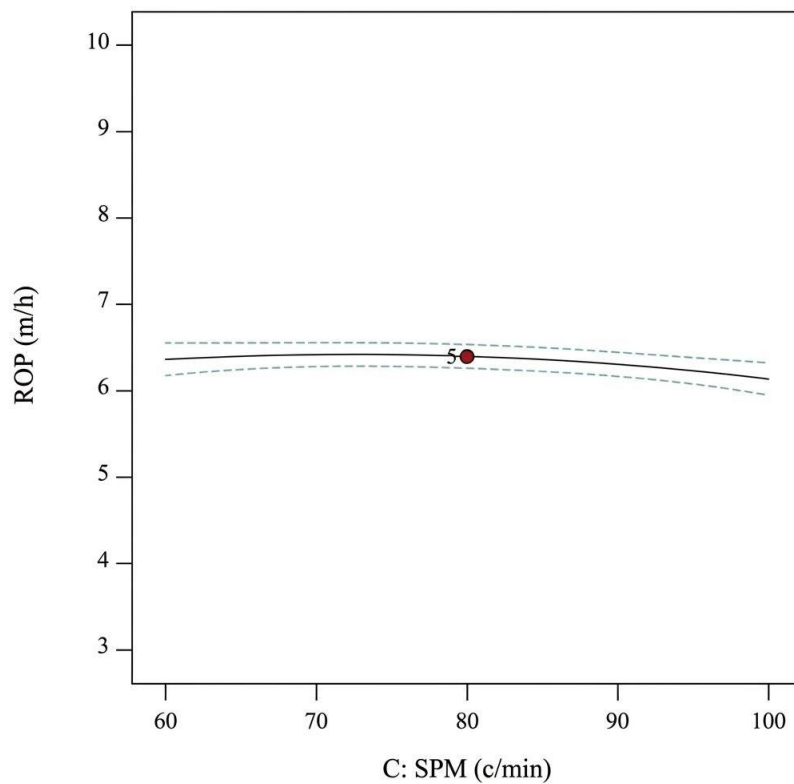


Figure III.5: Variation du ROP en fonction du SPM

La Figure III.5 montre la variation du taux de pénétration (ROP) en fonction du SPM. On observe une faible variation du ROP en réponse aux changements de SPM, avec une légère tendance à la diminution au-delà de 80 c/min de SPM. Cette faible variation indique que l'influence du SPM sur le ROP est peu significative dans l'intervalle étudié.

8. Interaction des facteurs

La variation du taux de pénétration (ROP) en fonction d'un paramètre donné peut être représentée à l'aide d'une surface de réponse tridimensionnelle (3D). Cette représentation permet de visualiser le comportement du ROP face aux variations simultanées de deux paramètres, tandis que le troisième paramètre est maintenu constant.

8.1. Effet d'interaction entre le WOB et le RPM sur le ROP

Le graphe de la Figure III.6 permet de visualiser l'effet de l'interaction entre le poids sur l'outil (WOB) et la vitesse de rotation (RPM) sur le taux de pénétration (ROP), le nombre de coups par minute étant maintenu constant à 80 coups/min.

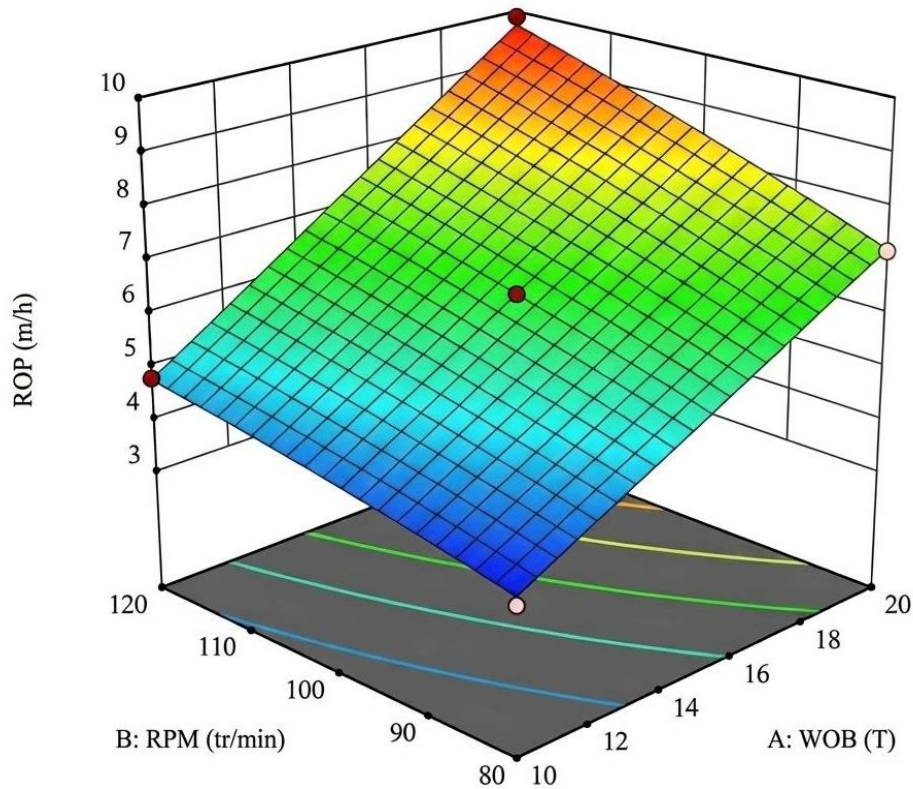


Figure III.6: Variation ROP en fonction de WOB et RPM

Les résultats montrent une augmentation progressive du taux de pénétration (ROP) avec l'accroissement simultané du WOB et du RPM. En effet, de faibles valeurs de ces deux facteurs correspondent à des taux de pénétration réduits, tandis que des valeurs élevées contribuent à l'amélioration des performances de forage.

La pente ascendante de la surface de réponse met en évidence un effet positif de l'interaction entre le WOB et le RPM sur le ROP dans le domaine expérimental étudié.

8.2. Effet d'interaction entre le WOB et le SPM sur le ROP

Le graphe présenté dans la Figure III.7 illustre l'effet du poids sur l'outil (WOB) et du nombre de coups par minute (SPM) sur le taux de pénétration (ROP), la vitesse de rotation étant maintenue constante à 100 tr/min. Courbe réalisée à l'aide du logiciel Design-Expert

11

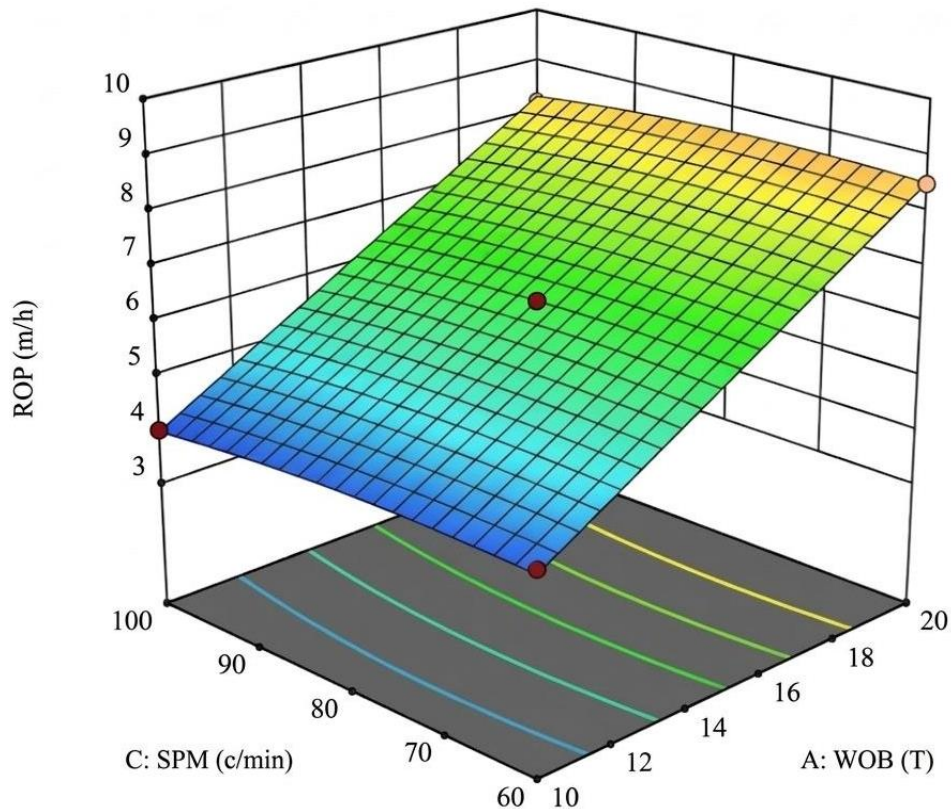


Figure III.7: Variation ROP en fonction de WOB et SPM

L'analyse des résultats indique que le taux de pénétration (ROP) augmente de manière significative lorsque les deux paramètres, à savoir le poids sur l'outil (WOB) et le nombre de coups par minute (SPM), sont augmentés simultanément. Par ailleurs, la surface de réponse met en évidence une interaction positive entre le WOB et le SPM sur le ROP dans le domaine expérimental étudié.

8.3. Effet d'interaction entre le RPM et le SPM sur le ROP

La Figure III.8 montre l'effet de la vitesse de rotation (RPM) et du nombre de coups par minute (SPM) sur le taux de pénétration (ROP), le poids sur l'outil (WOB) étant maintenu constant à 15. Courbe réalisée à l'aide du logiciel Design-Expert 11

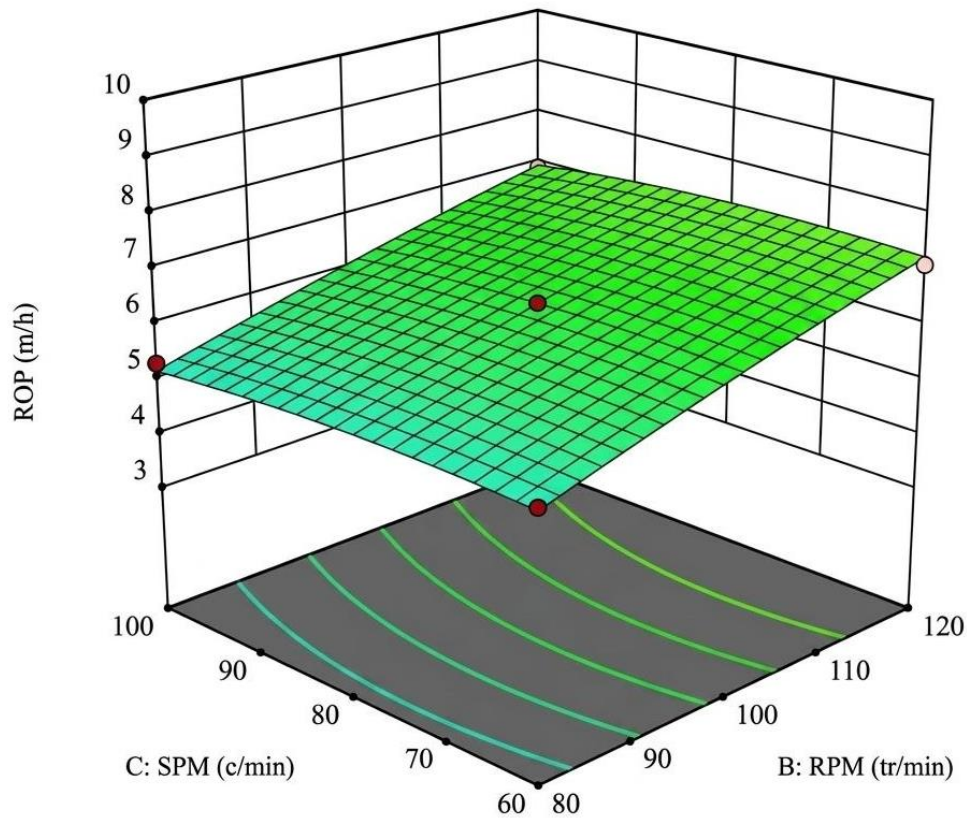


Figure III.8: Variation ROP en fonction de RPM et SPM

Les résultats mettent en évidence une augmentation modérée du taux de pénétration (ROP) en fonction de l'accroissement simultané de la vitesse de rotation (RPM) et du nombre de coups par minute (SPM). La surface de réponse présente une pente légèrement ascendante, indiquant un effet interactif positif mais d'intensité limitée entre ces deux paramètres dans le domaine étudié.

Par ailleurs, les faibles niveaux de RPM et de SPM correspondent à des performances de forage réduites, Cette interaction apparaît donc moins influente comparativement aux autres facteurs étudiés.

9. Optimisation du taux de pénétration (ROP)

L'objectif de cette étude est de maximiser le taux de pénétration (ROP) en fonction des variations des différents facteurs étudiés. Pour déterminer le maximum d'une fonction à plusieurs variables, il est nécessaire d'identifier tous les points stationnaires, c'est-à-dire les points pour lesquels les dérivées partielles par rapport aux facteurs d'influence s'annulent, à savoir : le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le nombre de coups par minute (SPM).

Le tableau III.6:présente les résultats obtenus suite à la résolution de ces équations à l'aide du logiciel Design Expert 11.

Le tableau III.6:valeurs optimales des paramètres.

WOB	RPM	SPM	ROP
19.155	83.547	74.299	7.177

10. Conclusion

L'analyse des résultats obtenus met en évidence le rôle déterminant des principaux paramètres de forage dans l'évolution du taux de pénétration (ROP), à savoir le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le nombre de coups par minute (SPM).

Les résultats révèlent que le WOB ainsi que le RPM exercent une influence positive et significative sur l'amélioration des performances de forage, tandis que l'effet du SPM demeure relativement limité dans le cadre expérimental étudié. Par ailleurs, l'étude des surfaces de réponse a permis une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres opératoires ainsi que de leurs effets combinés sur l'efficacité du processus de forage.

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) s'est avérée particulièrement pertinente pour modéliser le comportement des facteurs étudiés, tout en réduisant considérablement le nombre d'expérimentations nécessaires.

Enfin, cette approche a permis d'identifier des conditions opératoires optimales favorisant l'augmentation du ROP, contribuant ainsi à une amélioration globale des performances du système de forage.

Conclusion générale

Dans ce travail, l'accent a été mis sur l'analyse et l'amélioration des performances des opérations de forage pétrolier en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM), afin d'étudier l'influence des paramètres de forage sur le taux de pénétration (ROP) et de déterminer les conditions optimales de fonctionnement.

L'utilisation de cette approche a permis de structurer et d'analyser les données expérimentales de manière statistique, de développer un modèle mathématique reliant les paramètres de forage au taux de pénétration (ROP), ainsi que d'évaluer l'effet des principaux paramètres opératoires, à savoir le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM) et le nombre de coups par minute (SPM).

Les résultats obtenus montrent que les paramètres étudiés exercent une influence significative sur le comportement du ROP. Parmi eux, le poids sur l'outil (WOB) s'est révélé être le facteur le plus influent dans l'amélioration du taux de pénétration. Par ailleurs, l'analyse des interactions entre les paramètres a montré que l'effet combiné du poids sur l'outil (WOB) et de la vitesse de rotation (RPM) constitue l'interaction la plus significative sur le ROP, indiquant qu'une augmentation simultanée de ces deux paramètres conduit à une amélioration notable des performances de forage.

Les conditions optimales obtenues par la méthode RSM montrent qu'un poids sur l'outil (WOB) de 19.155 T, une vitesse de rotation (RPM) de 83.547 tr/min et un nombre de coups par minute (SPM) de 74.299 c/min permettent d'atteindre un taux de pénétration optimal (ROP) de 7.177 m/h.

Enfin, les résultats confirment l'efficacité de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) dans l'optimisation des performances de forage. Le modèle développé présente une bonne précision ainsi qu'une forte corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites, garantissant ainsi une prédiction fiable du ROP et une meilleure optimisation des conditions opératoires. Toutefois, il convient de souligner que d'autres paramètres, tels que les caractéristiques de la formation, les propriétés du fluide de forage notamment le débit de la boue et le type de trépan, peuvent également permettre d'analyser et de comprendre le comportement du ROP.

Références bibliographiques

- [01] Applied Drilling Engineering, By Adam T. Bourgoyne Jr., Keith K. Millheim, Martin E. Chenevert and F. S. Young Jr., Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [02] ABDOULAYE, (A. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier), Thèse de doctorat, Paris Tech-Institut de sciences et technologies, 2010.
- [03] 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.
- [04] Hafsi Takieddine, Somaa Ismail 'Appareil De Forage, Etude Et Dimensionnement Cas : Champs Hassi Messaoud 'UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2011/2012
- [05] HEBBAL Oussama, TOUAGHZIT Azzedine, HARKATI Med Abd, Etude et Maintenance de Treuil de Forage OIL WELL 840E, Mémoire De Master, Université Hassiba Benboulalide Chlef, 2012
- [06] Abdesslem BELAID : Modélisation Tridimensionnelle Du Comportement Mécanique De La Garniture De Forage Dans Les Puits A Trajectoires Complexes : APPLICATION A LA PREDICTION DES FROTTEMENTS GARNITURE-PUIT, Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS, Anne 2005,
- [07] 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.
- [08] Jean-Paul Nguyen. "Techniques D'exploitation Pétrolière le Forage". 1993
- [09] Cooper, G.A. (2006). Pay zone-drilling simulator- operators manual. Houston, USA.
- [10] TAIBAT Belkassem et NEGHMOUCHE Ali ourabi, "Etude Comparative de la Fiabilité du Top drive à Courant Continu et à Courant Alternatif", Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015/2014.

- [11] negadiali, la maintenance des équipements des forages cas tp127 Hassi Messaoud, Mémoire de master, UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID, Tlemcen 2014.
- [12] LIEVRE, « Thierry Installation et mise en œuvre des appareils de forage à terre », Avril 1975
- [13] M. DADDOU, « FORMATION D'INGENIEURS FORAGE », Formation JDF, 19 decembre- 06.
- [14] Pelfrene, G. (2010). Rôle du processus de forabilité des roches dans les vibrations de torsion des systèmes de forage pétrolier - Khochemane, L., (1990). Augmentation de l'Efficacité Technique d'Utilisation des Machines de Forage Rotatif a Taillant Coupant. Master's Thesis. Université d'Annaba, Annaba, Algeria
- [15] Sousa Abdelkarim mémoire magister gins industriel par thème (étude des instabilités dan tiges de f orage)
- [16] Bit records pour les puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [17] Gaitonde, V., Karnik, S., Achyutha, B., Siddeswarappa, B., and Davim, J.P. (2009). Predicting burr size in drilling of AISI 316L stainless steel using response surface analysis. Internatio nal Journal of Materials and Product Technology 35(1-2): 228-245.
- [18] MILI Saoussen, KAOUANE Housseyn, Conception et réalisation d'un système de prévention des « Stuck Pipe » HASSI MESSAOUD, Mémoire de Fin d'étude, esi 2014.
- [19] Guo, B., & Liu, G. (2011). Applied Drilling Circulation Systems: Hydraulics, Calculations, and Models. Gulf Professional Publishing.
- [20] FICHIER Sonatrach, Choix Des Outils et paramètres de forage
- [21] 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.

- [22] Aouici, H., Yallese, M.A., Chaoui, K., Mabrouki, T. and Rigal, J.-F. (2012) Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. *Measurement* 45(3): 344-353.
- [23] Bouzid, L., Yallese, M.A., Chaoui, K., Mabrouki, T., and Boulanouar, L. (2015). Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 229(1): 45-61
- [24] SLIMANI-A et DADOU-M, SONATRACH-Division forage « Module M1 », 2004
- [25] F.GRONDIN-Les outils de forage. β Sonatrach, Edition Janvier 2004.
- [26] Document Self-Learning Package- DRILL BIT. β December 2001.
- [27] Salehnezhad, L., Heydari, A., and Fattahi, M. (2019). Experimental investigation and rheological behaviors of water-based drilling mud contained starch-ZnO nanofluids through response surface methodology. *Journal of Molecular Liquids* 276: 417- 430.
- [28] F.GRONDIN, ‘‘outils de forage’’, ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement. 2009.
- [29] NACEF Ali, ‘‘Modélisation de la Vitesse D’avancement de L’outil de Forage ’’
Memoire De Magister, Université M’hamed Bougara- Boumerdes, 2014/2015.
- [30] AMRAT Oussama et GHERIB Samir, ‘‘Etude de la performance des outils PDC hybrides de la phase 8’’1/2 dans le champ Gassi Touil ’’, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015/2016
- [31] Khosla, A., Kumar, S., and Aggarwal, K.K. (2006). Identification of strategy parameters for particle swarm optimizer through Taguchi method. *Journal of Zhejiang University Science A* 7(12): 1989- 1994
- [32] Myers, R.H. and Montgomery, D.C. (1995). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- [33] LINDER R., *Les plans d’expériences un outil indispensable à l’expérimentateur*. Presses de l’école nationale des ponts et chaussées, Paris 2005

- [34] Subrata, M., Asish, B., and Pradip, K. (2011). NiCr-Mo cladding on mild steel surface using CO₂ laser and process modeling with response surface methodology. *International Journal of Engineering Science and Technology* 3(8): 6805-6816.
- [35] A Zakariya , H Abdelaziz, Optimisation des parametres geotechnique des sols par la methode des surfaces de reponse. , Memoire , l'Universite 08 Mai 194 deGuelmam,Faculte des Sciences et de la Technologie , 2017.
- [36] KOSHAL R. S. «Application of the method of maximum likelihood to the improvement of curves fitted by themethod of moments» *Journal of Royal Statistic Soc A* 96 303-313. (1933).
- [37] Myers R.H. Montgomery D.C. Response surface methodology, 2nd ed. Wiley & Sons (éditeurs), New York, NY, USA, (2002)
- [38] B. Abderrahmane, M.Faissal , Optimisation des paramètres mécaniques de forage pétrolier. cas d'un outil PDC , Mémoire Master , UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA Faculté des sciences appliqués, 2020.

Annexe

Build Information	
File Version	11.1.0.1
Study Type	Response Surface
Design Type	Box-Behnken
Design Model	Quadratic

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

ROP (m/h)
X1 = B: RPM
X2 = C: SPM
X3 = A: WOB

