

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ KASDI MERBBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquée
Département : Génie Mécanique
Mémoire de Master
Filière : Electromécanique
Spécialité : Maintenance Industrielle

Présenté par :

- CHELGHOU M OUALID
- BOUGUETTAYA ABDERRAHMANE

THÈME

**OPTIMISATION DES PARAMETRES DE FORAGE PETROLIER BASEE SUR
LE MODELE DE PENETRATION**

Devant le jury composé de :

- | | | |
|------------------|------------|-------------|
| • Rouagdia Karim | Examineurs | UKM Ouargla |
| • Achouri AlHaj | Président | UKM Ouargla |
| • khettabi rym | Encadreur | UKM Ouargla |

Année universitaire : 2024\2025

Remerciements

Tout d'abord, nous rendons grâce à Dieu

(الحمد لله).

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury pour avoir accepté de participer et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers la
Direction de ENTP

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadreuse, Madame khettabi rym pour avoir accepté de superviser ce mémoire. Nous apprécions énormément sa disponibilité, sa gentillesse, ses précieux conseils et la confiance qu'elle nous a accordée.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail modeste.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents, en reconnaissance de leur soutien,
leur patience et leurs encouragements tout au long de mon
parcours universitaire,

À tous les membres de ma famille,

À mes amis qui m'ont accompagné durant mes études,

Et à ma respectable encadrante, Mlle Khettabi Rym en
gratitude pour ses précieux conseils et son
accompagnement

Résumé

L'amélioration du taux de pénétration (ROP) constitue un élément fondamental pour accroître l'efficacité des opérations de forage. L'objectif principal est d'exploiter de manière optimale les paramètres de forage afin d'atteindre un taux de pénétration maximal, tout en réduisant les coûts d'exploitation et en améliorant les performances. Dans ce cadre, la Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) a été adoptée pour analyser l'effet des paramètres de forage tels que le poids sur le trépan (WOB), la vitesse de rotation (RPM), ainsi que la nature de la formation géologique (RC), sur le comportement du taux de pénétration. Les résultats obtenus montrent que le modèle développé est de bonne qualité d'ajustement et capable de prédire correctement le comportement de ROP dans différentes conditions de fonctionnement.

Mots-clés : Plans d'expériences - méthode de surface de réponse - optimisation - modélisation - taux d'avancement - Forage

Abstract

Improving the rate of penetration (ROP) is a fundamental element to increase the efficiency of drilling operations. The main objective is to optimally exploit the drilling parameters in order to achieve a maximum penetration rate, while reducing operating costs and improving performance. In this context, the Response Surface Methodology (RSM) was adopted to analyze the effect of drilling parameters such as weight on bit (WOB), rotational speed (RPM), as well as the nature of the geological formation (RC), on the behavior of the penetration rate. The results obtained show that the developed model has a good fit and is capable of correctly predicting the behavior of ROP under different operating conditions.

Keywords: Design of experiments - response surface method - optimization - modeling - progress rate - drilling

ملخص

يُعد تحسين معدل الاختراق (ROP) عنصرًا أساسيًا لزيادة كفاءة عمليات الحفر. ويتمثل الهدف الرئيسي في الاستغلال الأمثل لمعايير الحفر لتحقيق أقصى معدل اختراق، مع خفض تكاليف التشغيل وتحسين الأداء. وفي هذا السياق، تم اعتماد منهجية استجابة السطح (RSM) لتحليل تأثير معايير الحفر، مثل وزن المنقب (WOB)، وسرعة الدوران (RPM)، وطبيعة التكوين الجيولوجي (RC)، على سلوك معدل الاختراق. وتُظهر النتائج أن النموذج المُطور يتمتع بملاءمة جيدة، وقادر على التنبؤ بدقة بسلوك معدل الاختراق في ظل ظروف تشغيل مختلفة.

الكلمات المفتاحية: تصميم التجارب - طريقة سطح الاستجابة - التحسين - النمذجة - معدل التقدم - الحفر

Nomenclature

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

RPM: Vitesse de rotation de l'outil de forage (Rotation Per Minute).

Rc : La résistance de la roche à la compression

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

PE plan d'expérience

BHA: Bottom Hole Assembly

WOHL: C'est le poids de la garniture

WOHF: C'est lipoids de la garniture Durant le forage.

PDC: Polycrystalline diamond compact.

TSP: Thermally Stable Polycrystalline.

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

ANOVA:(analysesofv ariance).

R2: Coefficient de détermination.

Y : est le vecteur des réponses

X: lamatrice du modèle.

a:estlevecteurdes coefficients.

X :est lamatrice transpos

X-1:estla matriceinverséedeX.

Xi:représenteleniveauattribuéaufacteuriparl'expérimentateur

Rmax : est variable naturelle max.

Rmin : est variable naturelle min.

a₀,a_i,a_{ij},a_{ii}:sontles coefficientsdumodèlemathématique

ε:erreur totale.

R² : Le coefficient de corrélation

S² : La variance

SS : Sommes des carrés

SST : Total des sommes des carrés

SSR : La somme des carrés due à la régression du modèle

SSE : La somme des carrés due à l'erreur

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Abstract.....	III
ملخص.....	IV
Nomenclature	V
Introduction générale	4
CHAPITRE I.....	6
Généralités sur le forage pétrolier	6
1 Introduction.....	7
1.1 Système de forage rotary	7
1.2 Description générale.....	7
1.3 Équipement de surface.....	8
1.3.1 Système de levage	8
1.3.1.1 Mouflage.....	8
1.3.1.2 Tour ou le mât	8
1.3.1.3 Moufle fixe (crown block).....	8
1.3.1.4 Moufle mobile (travelling block)	8
1.3.1.5 Crochet (Hook).....	9
1.3.1.6 Treuil de forage	9
1.3.2 Système de rotation	9
1.3.2.1 Table de rotation	10
1.3.2.2 Tête d'injection.....	10
1.3.3 Système de sécurité.....	11
1.3.3.1 Obturateurs (BOP).....	11
1.3.4 systèmes de circulation de boue.....	12
1.3.5 systèmes de production d'énergie.....	13
1.3.6 Forage par l'entraînement supérieur (TOP DRIVE).....	13
1.3.6.1 Différents types de top drive.....	13
1.4 équipements de fond	14
1.4.1 Le train de tiges	15
1.4.2 Assemblage de fond BHA (Bottom Hole Assembly)	15
1.4.2.1 Les masses-tiges	15
1.4.2.2 Les stabilisateurs	16
1.4.2.3 Les trépan	16
1.5 Classification des appareils de forage	17
1.6 Fonctions d'un appareil de forage	18
1.7 paramètres de forage pétrolière.....	19

1.7.1	Paramètres mécaniques.....	19
1.7.2	Vitesse d'avancement ou ROP (Rate Of Pénétration).....	19
1.7.3	Le poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit).....	19
1.7.4	Vitesse de rotation ou RPM (révolution per munite)	19
1.7.5	types des outils.....	20
1.7.5.1	outils à molettes	20
1.7.5.2	Les outils à éléments de coupe fixes.....	20
1.7.5.2.1	Les outils à diamant naturel	21
1.7.5.2.2	Les outils à diamant synthétique	21
1.7.5.2.3	Les outils PDC : (Polycristalline Diamond Compact)	21
1.7.5.2.4	Les outils TSP (Thermally Stable Polycristalline)	23
1.8	Paramètres hydrauliques	24
1.8.1	Débit	24
1.8.2	La pression du fond du puits	24
1.8.3	Type du fluide de forage.....	24
1.8.4	Caractéristiques du fluide du forage	24
1.8.4.1	Densité	24
1.8.4.2	Viscosité.....	25
1.9	Conclusion.....	25
CHAPITRE II.....		26
Les plans d'expériences		26
2	Introduction.....	27
2.1	Optimisation du forage par la méthodologie des plans d'expériences	27
2.2	Principes de base des plans d'expériences	27
2.2.1	Domaine de facteurs	27
2.2.1.1	Facteur.....	27
2.2.1.2	Réponse	27
2.2.1.3	Notion d'espace expérimental.....	27
2.2.1.4	notion de surface de réponse	29
2.2.1.5	.Modélisation mathématique	29
2.2.1.6	Système d'équations	30
2.3	Différents types des plans d'expérience	30
2.3.1	Plans factoriels complets à deux niveaux	30
2.3.2	Plans complets à deux facteurs.....	30
2.3.2.1	Représentation d'une étude sous forme de tableau	31
2.3.2.2	Présentation des résultats d'essais	32
2.3.2.3	Calcul des coefficients.....	32
2.3.3	Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux.....	32
2.3.4	Avantages et inconvénients des plans factoriels complets.....	33
2.3.5	plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	33
2.3.5.1	Notation des plans factoriels fractionnaires	33
2.3.5.2	Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base.....	33
2.3.6	Les plans pour surfaces de reponse.....	34

2.3.6.1	Les plans de Box-Behnken.....	34
2.3.6.1.1	.Les avantages de Box-Behnken.....	35
2.3.6.2	Les plans composites	35
2.3.6.3	Les plans hybrides.....	36
2.3.6.4	Les plans de Mozzo.....	37
2.3.6.5	Les plans de Doehlert	39
2.3.6.6	Les plans de D-optimaux	40
2.3.6.7	Les plans non conventionnels et leur éventuelle réparation.....	40
2.3.7	Autres Plan d'expériences	41
2.3.7.1	Le plan de Taguchi.....	41
2.3.7.2	Les plans de Koshal.....	41
2.3.7.3	Les plans de Rechtschaffner	41
2.4	Conclusion.....	41
Chapitre III : Application de la méthode RSM design (Box-Behnken).....		42
3	Introduction.....	43
3.1	Application de la méthode	43
3.1.1	Distribution des essais	44
3.1.2	Traitements des données	45
3.1.3	Modélisation mathématique	47
3.1.4	Équation finale en termes de facteurs codés.....	47
3.1.5	Équation finale en termes de facteurs réels.....	47
3.1.6	Configuration des résultats	48
3.2	Influence des paramètres étudiés sur le ROP	49
3.2.1	L'effet de WOB sur le ROP	49
3.2.2	L'effet de RPM sur le ROP	49
3.2.3	L'effet de RC sur le ROP.....	50
3.3	Surfaces de réponses	50
3.4	L'optimisation d'une réponse (ROP)	53
3.5	Conclusion.....	53
Conclusion générale.....		54
ANNEXE		57
Build Information		59
Factors.....		60

Liste de figure

CHAPITR 1

Figure 1.1: La plateforme de forage	7
Figure 1.2: Système de levage	9
Figure 1.3: Système de rotation	11
Figure 1.4: Obturateurs de sécurité (B.O.P)	12
Figure 1.5: Système de circulation	13
Figure 1.6: Types de top drive.....	14
Figure 1.7: Les composants de la garniture de forage	15
Figure 1.8: Masse Tiges.....	16
Figure 1.9: Les stabilisateurs	16
Figure 1.10: trépan de forage	17
Figure 1.11: Classification des appareils de forage en fonction la profondeur.....	17
Figure 1.12: Vue de l'appareil de forage.....	19
Figure 1.13: Les outils à molettes (tricône)	20
Figure 1.14: Outil à diamant naturel	21
Figure 1.15: Les outils diamants	22
Figure 1.16: Structure d'un PDC.....	22
Figure 1.17: outil TSP	23

CHAPITR II

Figure II .1: Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1).....	28
Figure II.2 :Représentation de l'espace expérimental.....	28
Figure II.3 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse.	29
Figure II .4: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs.....	35
Figure II.5: Plan composite pour deux facteurs.....	37
Figure II .6: Plan de Doehlert	37
Figure II .7: Exemple de plan non conventionnel	40

CHAPITR III

Figure III .1: foreuse pour essais.....	43
Figure III .2: le modèle qui montre les données expérimentales obtenues	48
Figure III.3: effet de WOB sur le ROP	49
Figure III .4: présente l'effet de RPM sur le ROP	50
Figure III .5: : effet de RC sur le ROP.....	50
Figure III .6: effet de RPM et WOB sur le ROP.....	51
Figure III .7: effet de RC et WOB sur le ROP.....	52
Figure III .8: effet de RC et RPM sur le ROP.....	52

Liste de tableaux

CHAPITR I

CHAPITR II

Table II.1: Tableau d'expérimentation (unités courantes).....	31
Table II.2: Plan d'expériences (unités codées)	31
Table II.3: Plan d'expériences et résultats expérimentaux.....	32
Table II.4: Nombre maximum de facteurs étudiés maximum de facteurs que l'on peut étudier sur différents plans de base. Sur un plan de base donné.....	34
Table II.5: Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs.....	35
Table II.6: Plan hybride 311B.....	38
Table II.7: Plans de Mozzo pour 2, 3 ou 4 facteurs	39

CHAPITR III

Table III.1 : Caractéristiques de la foreuse utilisée	43
Table III.2 : Valeurs sélectionnées des facteurs	44
Table III.3: Plan d'expériences en variable réelles et en variable codées	44
Table III.4: Résultats des essais	45
Table III.5: Analyse de la variance	46
Table III.6 : Valeurs optimales des paramètres pour le ROP.....	53

Introduction générale

Le pétrole occupe une place stratégique essentielle il est considéré comme une source principale d'énergie fossile dans le monde moderne. Par conséquent, l'industrie de l'exploration et de la production pétrolière est devenue un secteur vital, ayant un impact économique et géopolitique significatif. Face à la demande croissante en hydrocarbures, il devient impératif d'améliorer l'efficacité des opérations de forage afin d'augmenter la production tout en réduisant les coûts d'exploitation.

L'un des indicateurs de performance les plus importants dans les opérations de forage est le taux de pénétration (ROP – Rate of Pénétration), qui constitue une mesure directe de l'efficacité du processus. Une augmentation du ROP permet de réduire le temps de forage et les coûts associés, ce qui se traduit par une amélioration de la productivité globale. Ce paramètre est influencé par plusieurs facteurs, classés en deux catégories principales :

- Les paramètres mécaniques, tels que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, le choix de l'outil et la nature de la formation forée ;
- Les paramètres hydrauliques, tels que le débit du fluide de forage, la pression et les propriétés de la boue utilisée. Comprendre la relation entre ces paramètres est une étape cruciale pour concevoir un système d'exploitation optimal, alliant rapidité, efficacité et rentabilité.

Afin d'atteindre cet objectif, des approches statistiques et techniques avancées ont été adoptées, notamment les méthodes des plans d'expériences. Le présent travail est basé sur l'évaluation de l'évolution du taux de pénétration (ROP) face aux variations de différents paramètres de forage tels que le poids sur l'outil (WOB – Wight on Bit), la vitesse de rotation (RPM – Rotations per Minute) et la dureté de la roche (RC – Résistance à la compression). On va adopter la Méthodologie des Surfaces de Réponse (Respos Surface Methodologie – RSM) pour atteindre ce but.

La RSM est l'un des outils modernes les plus puissants pour la conception et l'analyse des expériences, car elle permet d'évaluer simultanément l'effet de plusieurs facteurs, et de développer un modèle mathématique capable d'orienter les décisions techniques et d'optimiser les performances. Le plan expérimental de Box-Behnken permet d'explorer les interactions complexes entre les variables, à un coût réduit et avec un effort expérimental limité, tout en garantissant des résultats précis et fiables.

Le travail est réparti en trois parties principales. La première partie est consacrée à une présentation générale du processus de forage, incluant la classification et la définition des principaux paramètres intervenant dans cette opération. La deuxième partie porte sur le vocabulaire des concepts essentiels relatifs aux plans d'expériences, en précisant leurs objectifs ainsi que les différentes méthodes disponibles. La troisième partie présente l'application de la méthode adoptée, à savoir la Méthodologie des Surfaces de Réponse (RSM), à l'analyse des données issues des essais expérimentaux, ainsi qu'à la détermination des conditions optimales pour un régime de forage efficace et rationnel. Enfin, la dernière partie expose les conclusions principales tirées de cette étude.

CHAPITRE I :

**Généralités sur le forage
pétrolier**

1 Introduction

L'exploration du pétrole et du gaz, qu'elle soit effectuée en milieu marin (offshore) ou terrestre (onshore), repose sur un processus de forage permettant d'atteindre les réservoirs d'hydrocarbures et d'en extraire les ressources. Pour acheminer ces hydrocarbures jusqu'à la surface, il est nécessaire d'installer des conduits reliés à des systèmes de pompage.

1.1 Système de forage rotatif

Le forage pétrolier désigne l'ensemble des opérations visant à atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de renfermer des hydrocarbures liquides ou gazeux. Son implantation est déterminée à la suite d'études géologiques et géophysiques, permettant d'évaluer la structure du sous-sol et les potentialités de gisements, sans toutefois garantir la présence effective d'hydrocarbures. L'opération de forage sert alors à valider les hypothèses formulées et à identifier la nature des fluides emprisonnés dans les roches.

1.2 Description générale

Un système de forage est composé de deux parties : équipements de surface (l'installation de forage) et équipement de fond(garniture), comme le montre le schéma simplifié de la figure 1.1 :[1]

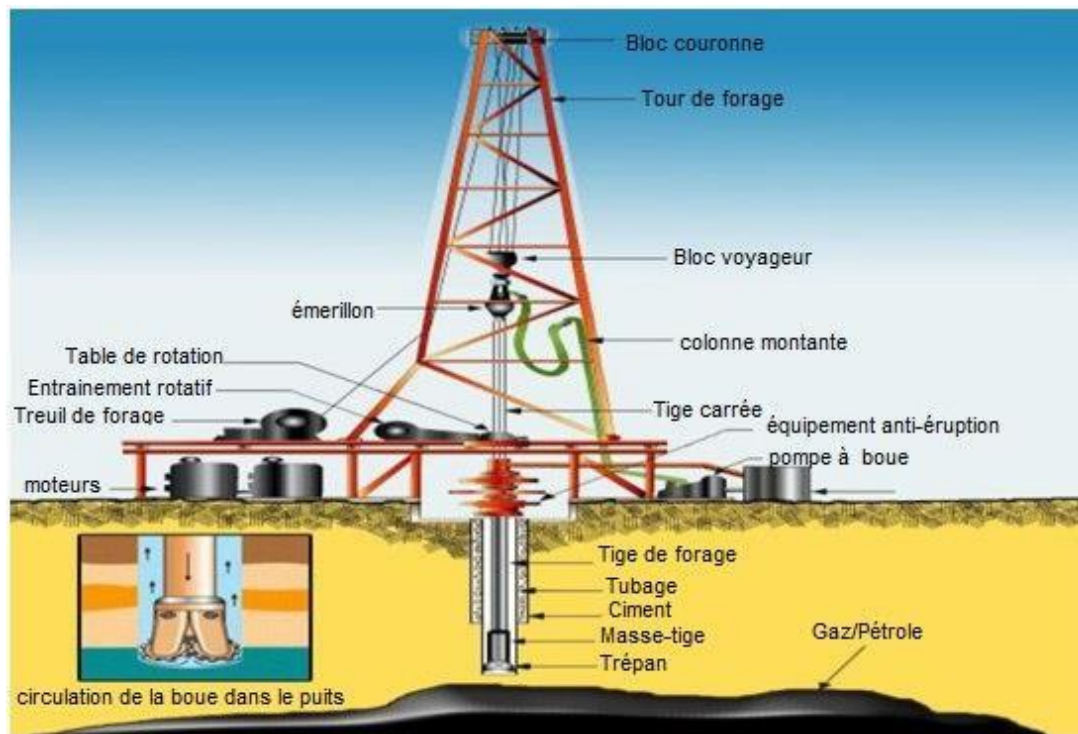


Figure I.1: La plateforme de forage

1.3 Équipement de surface

L'installation de forage est la partie située à la surface du sol. Elle comprend une tour, appelée derrick ou mât, sur laquelle sont situés les équipements de levage et de plancher qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil (trépan).

L'installation de forage, conçue pour permettre la manœuvre de la garniture de forage, inclus les systèmes suivants.[1]

1.3.1 Système de levage

Il se compose d'un derrick pouvant atteindre une hauteur de 80 mètres et d'un treuil motorisé situé au sol à sa base. Son rôle est de faire descendre et remonter la garniture de forage tout en permettant de maintenir partiellement le poids de l'ensemble de la garniture en retenant le poids appliqué au l'outil (voir la Figure I.2) [2] .

1.3.1.1 Mouflage

Le mouflage est une technique essentielle dans le domaine du forage, permettant de lever et de manœuvrer l'outil de forage avec précision et efficacité. Il consiste à enrayer le câble de forage autour de plusieurs poulies montées sur deux structures distinctes : une moufle fixe et une moufle mobile [3].

1.3.1.2 Tour

La tour sont des structures essentielles pour le levage des équipements de forage. La tour structure métallique pyramidale fixe, est principalement utilisée sur les appareils offshore. Sa capacité (de 400 000 à 1 400 000 lbs) et sa capacité pratique (125 à 450 Tonnes) définissent la charge maximale admissible. Sa hauteur détermine la longueur des stands (50 m depuis le sol pour des longueurs de trois tiges) et le nombre de stands pouvant être stockés. Elle peut également recevoir une tête d'injection motorisée.

Le mât, quant à lui, est démontable ou repliable, ce qui le rend plus polyvalent. Il est utilisé sur les appareils terrestres ou sur les tenders. Ses caractéristiques sont similaires à celles de la tour, avec une capacité API et une capacité pratique comparables. Sa hauteur peut varier en fonction des besoins, et il peut également être équipé d'une tête d'injection motorisée.

1.3.1.3 Moufle fixe (crown block)

Le moufle fixe, situé au sommet de la tour ou du mât, est un ensemble de poulies (ou réas) sur lesquelles passe le câble de forage. Ce système de mouflage permet d'amplifier la force de levage et de faciliter la montée et la descente de l'équipement de forage [2].

1.3.1.4 Moufle mobile (travelling block)

Le moufle mobile, suspendu au câble de forage, est également un ensemble de poulies sur lesquelles passe le câble. Sous cet ensemble se trouve le crochet, élément crucial pour la manipulation des équipements de forage [4]

1.3.1.5 Crochet (Hook)

Le crochet, fixé sous le moufle mobile, sert à soutenir la tête d'injection (motorisée ou non) ou la garniture en cours de manœuvre. Il est relié aux bras de levage fixés aux oreilles du crochet, permettant ainsi un contrôle précis de la position et du mouvement des équipements [4].

1.3.1.6 Treuil de forage

Le treuil est un élément central de la sonde, joue un rôle crucial dans les opérations de forage. Sa capacité détermine la profondeur maximale à laquelle l'appareil de forage peut atteindre, et caractérise ainsi la sonde elle-même.

Cet ensemble mécanique polyvalent assure plusieurs fonctions essentielles :

- Manoeuvre de levage : Le treuil permet de remonter et de descendre rapidement et en toute sécurité le train de tiges, élément central du forage.
- Rotation de la table : En l'absence d'un moteur indépendant, le treuil peut faire tourner la table de rotation, permettant ainsi de mettre en mouvement le trépan pour broyer la roche.
- Assemblage et désassemblage des tiges : Le treuil est essentiel pour l'assemblage et le désassemblage des tiges formant le train de tiges.[5]

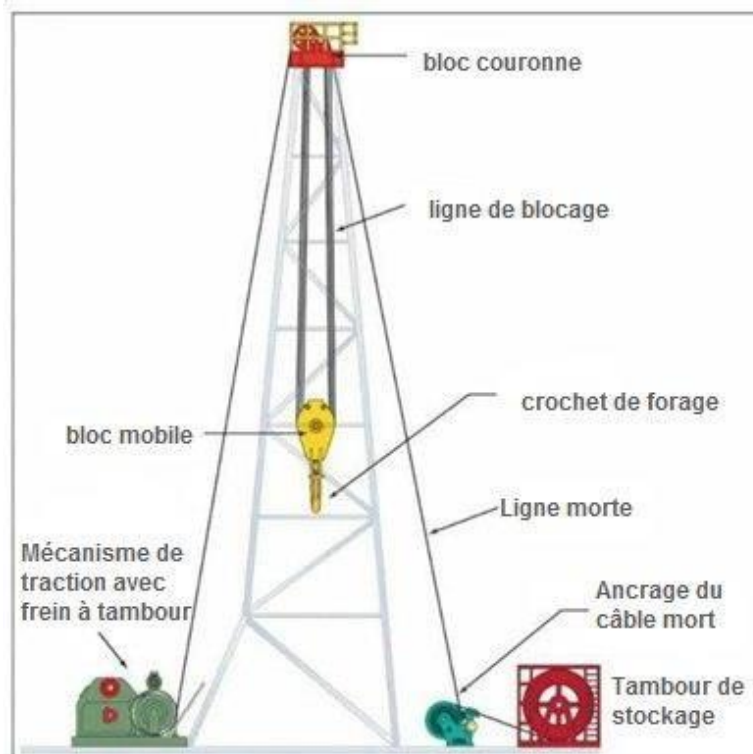


Figure II.2: Système de levage

1.3.2 Système de rotation

La fonction rotation permettant la rotation de l'outil de forage et l'exécution d'opérations cruciales sur le plancher. Comme il est montré dans (Figure I.3).

Ce système comprend deux équipements essentiels [5] :

- La table de rotation.
- La tête injection.

1.3.2.1 **Table de rotation**

Pendant les opérations de forage, la table de rotation joue un rôle doublement crucial

Transmission du mouvement de rotation : Elle transmet la rotation du système de rotation à la garniture de forage, c'est-à-dire à l'ensemble des outils de forage, via des roulements et la tige d'entraînement. Cette rotation permet de broyer la roche et de faire progresser le forage.

Support de la garniture de forage : Lors des manœuvres, lorsque le forage est interrompu, la table de rotation supporte le poids de la garniture de forage. Des dispositifs de retenue spécifiques assurent le maintien sécurisé de l'ensemble en place.

La motorisation de la table de rotation s'effectue de deux manières :

- Sur les équipements légers : La rotation de la table de rotation est entraînée par une roue d'entrée et une chaîne, à partir du treuil de forage.
- Sur les équipements lourds : Une motorisation électrique autonome alimente directement la table de rotation, offrant ainsi une puissance et une précision accrues [7].

1.3.2.2 **Tête d'injection**

Le composant est suspendu par son anse au crochet de levage et doit être conçu pour supporter à la fois la charge maximale de garniture et la vitesse de rotation maximale. Par ailleurs, un joint d'étanchéité rotatif permet l'injection sous pression du fluide de forage par le flexible de forage relié au col de cygne de la tête d'injection.

Il est important de noter que toutes les connexions au-dessus de la section utile de la tige d'entraînement doivent être à filetage à gauche afin de ne pas être débloquées par la rotation à droite de la table de rotation.[5]

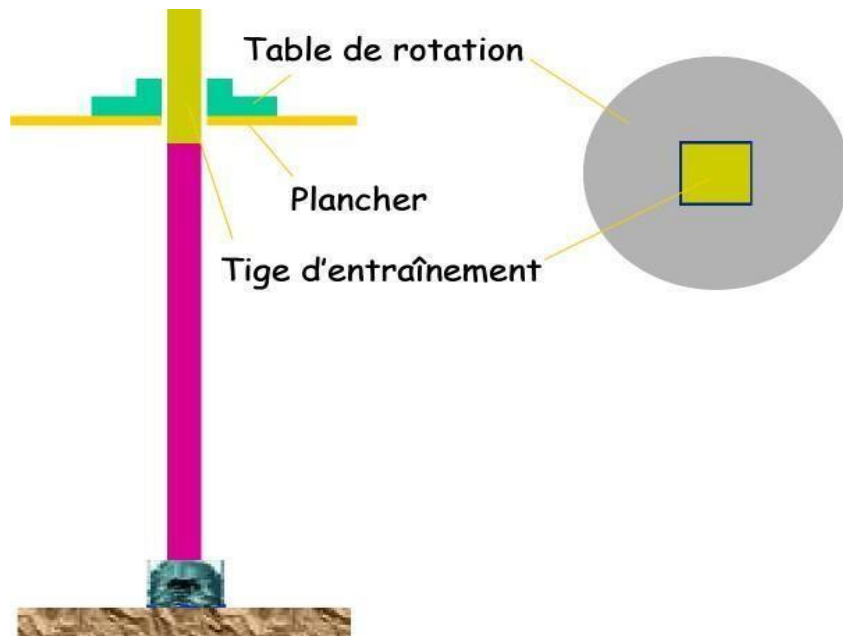


Figure I.3: Système de rotation

1.3.3 Système de sécurité

Lors du forage de puits dans des gisements où une pression élevée des couches est présumée, afin de prévenir toute éruption de gaz et d'huile, la tête de puits est équipée de dispositifs d'étanchéité de sécurité appelés obturateurs de sécurité (B.O.P) [3].

1.3.3.1 Obturateurs (BOP)

On utilise des obturateurs de puits (BOP) pour assurer la sécurité en cas d'éruption. Ces dispositifs comprennent plusieurs types d'obturateurs (**Figure I.4**) :

Sur tiges : Ferment le puits autour des tiges forées (fixe ou variable).

À fermeture totale : Coupe les tiges en urgence (shear rams) ou ferme complètement le puits (blind rams).

Annulaire : Ferme l'espace entre le tube de forage et la paroi du puits.

Les BOP sont contrôlés hydrauliquement et connectés à des lignes de boue lourde (kill line) et de dégazage (choke line). dans les zones à risque de gaz près de la surface (shallowgas), on utilise un diverter à la place des BOP. Ce dispositif dévie le gaz hors du puits via des sorties latérales jusqu'à sa purge complète.[5]

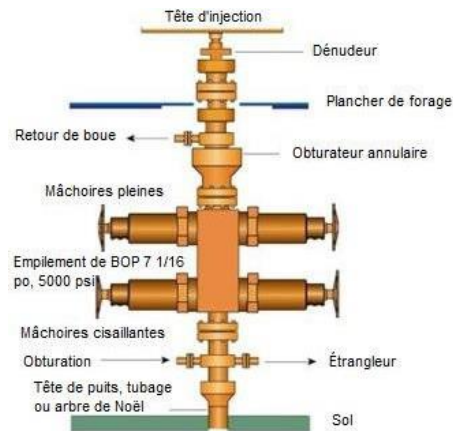


Figure I.4: Obturateurs de sécurité (B.O.P).

1.3.4 Systèmes de circulation de boue :

Il assure la circulation de la boue de forage et il est associé à une station de pompage servant au traitement du fluide de forage : la boue est en effet un mélange d'eau, d'argile et d'additifs. Une injection continue de boue dans le puits s'effectue pendant toute la durée du forage.

Les pompes à boue aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à l'intérieur du train de tiges et remontant par l'espace annulaire compris entre les tiges et le puits. La circulation de la boue contribue à la lubrification des pièces en mouvement, à leur refroidissement et à l'excavation par évacuation vers la surface des fragments de roches arrachés par le trépan ; mais aussi à l'équilibre hydrostatique du puits et éventuellement à la rotation du trépan au travers d'une turbine. Enfin, la boue est d'une grande utilité pendant l'opération de forage car son analyse fournit des éléments sur la nature géologique des milieux traversés..[1]

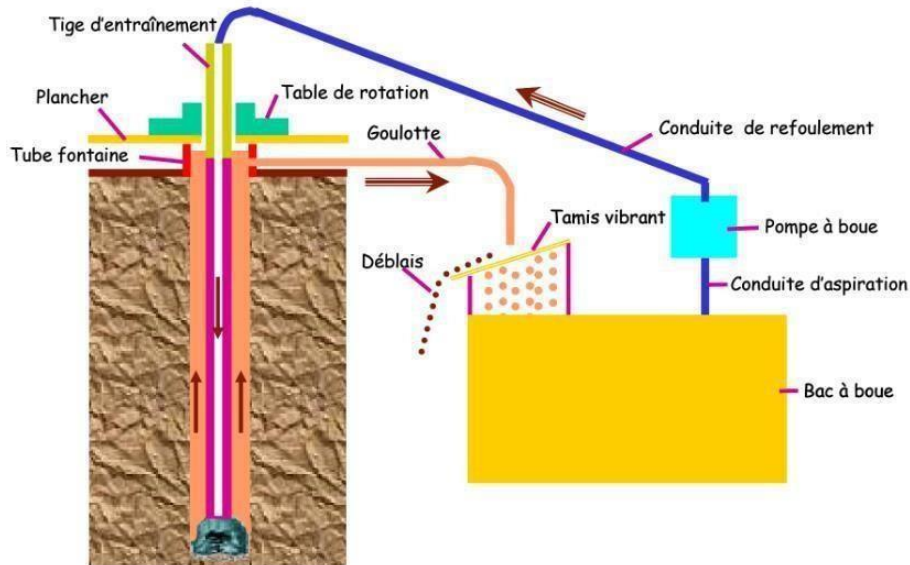


Figure I.5: Système de circulation

1.3.5 Systèmes de production d'énergie

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : la pompe de circulation, le treuil et la table de rotation. La nécessité de réaliser des puits déviés incite l'utilisation des moteurs embarqués afin d'accéder aux poches latérales contenant des hydrocarbures.[6]

1.3.6 Forage par l'entraînement supérieur (TOP DRIVE)

Les appareils de forages modernes sont équipés par un nouvel équipement de levage et de rotation dite TOP DRIVE

Le top drive est un système maintenu au derrick à l'aide d'une glissière. Cet équipement combine l'élévateur, les clés de forage, Top drive Système Top-Drive ou Tête d'Injection motorisée, Il est accroché au moufle mobile et géré à partir d'une du plancher. Le top drive fait tourner la garniture de forage sans la table de rotation et la tige carrée. Le forage se fait par longueurs (Trois tiges) non par tiges. Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge. En plus, pendant le forage, au lieu de faire les Ajouts simples par simple, on peut les faire longueur par longueur. Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élévateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et il possède une clé automatique et même une coulisse intégrée. Des rails placés tout le long du mât le guident dans ses déplacements

1.3.6.1 Différents types de top drive

Dans l'industrie il existe plusieurs types de top drive : (Tesco, Varco, Canrig ...etc.)

(Figure I.6)L'entreprise nationale des travaux aux puits (ENTP) utilise le top drive CANRIG [8]

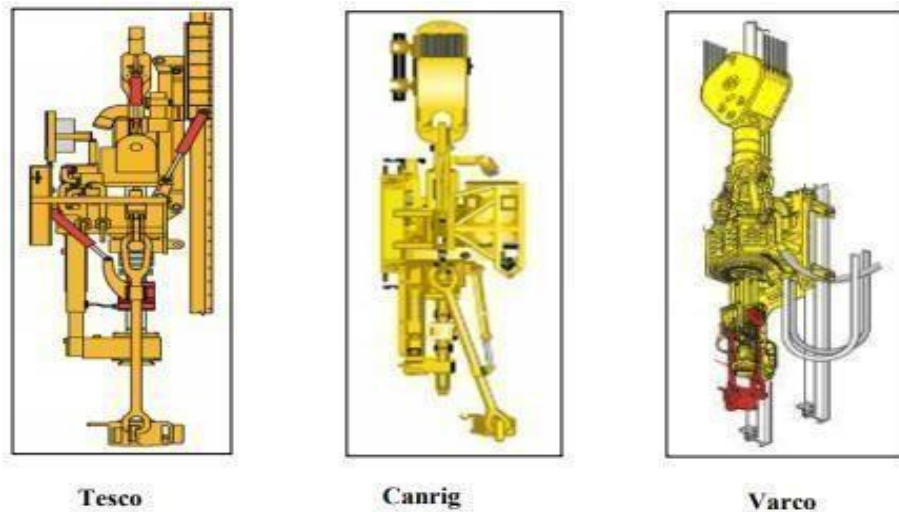


Figure I.6: Types de top drive

1.4 Equipements de fond

La garniture désigne la partie souterraine du système de forage. Elle est constituée, de deux parties principales :

- la partie haute formée du train des tiges (drill strings),
- la partie basse formée de l'assemblage de fond que l'on a coutume de désigner Par BHA (« Bottom Hole Assembly »).[1]

La garniture de forage est l'arbre de liaison entre les équipements de surface et l'outil de forage, elle a diverses fonctions qui sont :

- Permettre au fluide de forage de circuler avec la plus faible diminution de perte de charge possible,
- Contrôler la trajectoire de l'outil,
- Exercé une force sur l'outil de forage, pour transmettre l'énergie nécessaire à la roche.

La garniture de forage se divise en deux catégories :

- Comme illustré dans la figure (1.7), les principaux équipements sont :
 - Les masses tiges (DC : drill collar) : ont un rôle très important dans la garniture, elles sont reliées entre elles par des filetages (sert à lier les éléments ensemble),
 - Elles exercent une force sur l'outil de forge pour permettre de forer les roches en les broyant,
 - Les tiges de forage (DP : drill pipe) : ceux sont des tubes en acier reliés entre eux par des raccords.

- Les équipements auxiliaires :

Le matériel auxiliaire est composé de stabilisateurs de masses-tiges, d'amortisseurs de choc et des différents raccords [12]

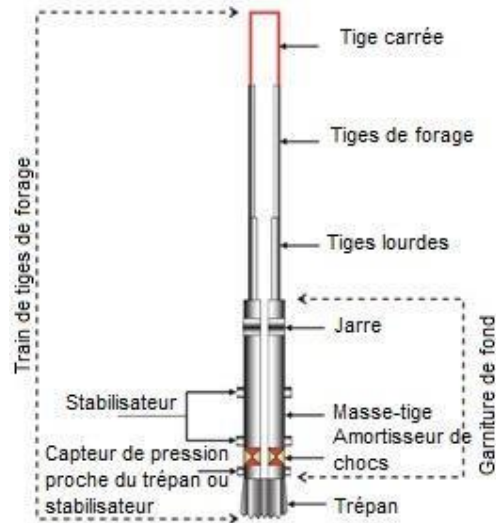


Figure I.7: Les composants de la garniture de forage

1.4.1 Le train de tiges

Cette partie de la garniture est constituée d'une série de tiges d'acier raccordées les unes aux autres par des joints filetés coniques. Le train de tiges permet de contrôler l'outil par la transmission du couple moteur fourni en surface, par l'intermédiaire de la table de rotation. En outre, il fournit la pression nécessaire pour percer dans la formation et abraser les roches avec une force WOB suffisante. Cet ensemble peut atteindre une longueur de plusieurs kilomètres (1 à 8 km).

1.4.2 Assemblage de fond BHA (Bottom Hole Assembly)

C'est la partie inférieure de la structure de garniture, constituée de l'outil, des stabilisateurs et des masses-tiges. La longueur de cet ensemble varie typiquement de 100 à 300 m en fonction de la pression recherchée.

1.4.2.1 Les masses-tiges

Ce sont des tubes de fortes sections permettant d'exercer du poids sur le trépan. Les masses-tiges sont sollicitées en compression et en torsion. Les diamètres de ces tiges peuvent varier selon les puits, de 6 à 8 cm pour le diamètre intérieur et de 10 à 25 cm pour le diamètre extérieur pour une épaisseur de 6 à 16 cm, ce qui leur confère une bonne rigidité en torsion et en compression.



Figure I.8: Masse Tiges

1.4.2.2 Les stabilisateurs

Ce sont des tubes de longueur nettement plus faible que celle des masses-tiges et dont le diamètre extérieur est voisin de celui du trépan. Ils sont placés au niveau des masses tiges et parfois intercalés entre deux masses-tiges pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente la performance.[3]

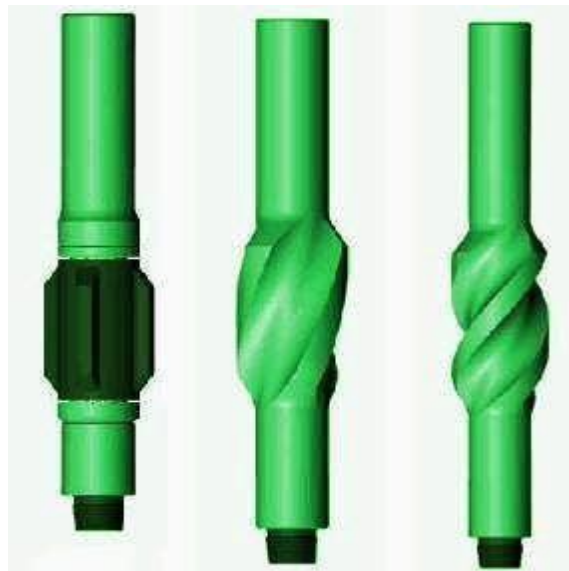


Figure I.9: Les stabilisateurs

1.4.2.3 Les trépan

L'outil ou trépan de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains. Pour le foreur, l'outil qui se trouve au bout des tiges qui forent le sol est une des clés de son activité. C'est le seul élément dans la sonde qui fait un trou, et il est en contact avec le fond, cela ne veut pas dire que l'outil est le seul qui peut creuser les trous, le trépan ne creuse un trou- et ne rapporte de l'argent, que lorsqu'il est adapté à la formation de milieu à forer, et qu'il soit en bon état.

L'outil ne peut pas forer si on n'exerce pas un poids qu'il le dirige vers le fond, ce poids est appelé masse tige, et il faut faire tourner, sans oublier la circulation de la boue de forage (qui nettoie et refroidit le trépan).

Le premier outil de forage est apparu sur les champs de pétrole à l'air en 1859 l'heure de forage par battage est l'outil à lames, par révolution et développement des outils comme les autres équipements de forage. Le premier outil à mouton en 1909.

On fonction de région et la dureté des roches à forer on a fabriqué l'outil à diamant [9]

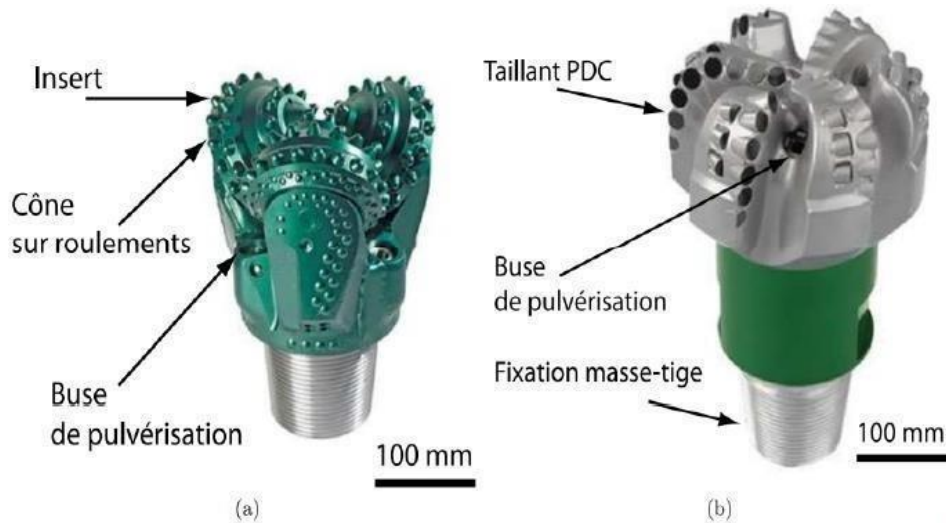


Figure I.10: trépan de forage

1.5 Classification des appareils de forage

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale (figure I.1).

Les appareils de forage peuvent être classés (pour des tiges de 4" 1/2) comme suit :

- Appareil léger
- Appareil moyen
- Appareil lourd
- Appareil ultra lourd

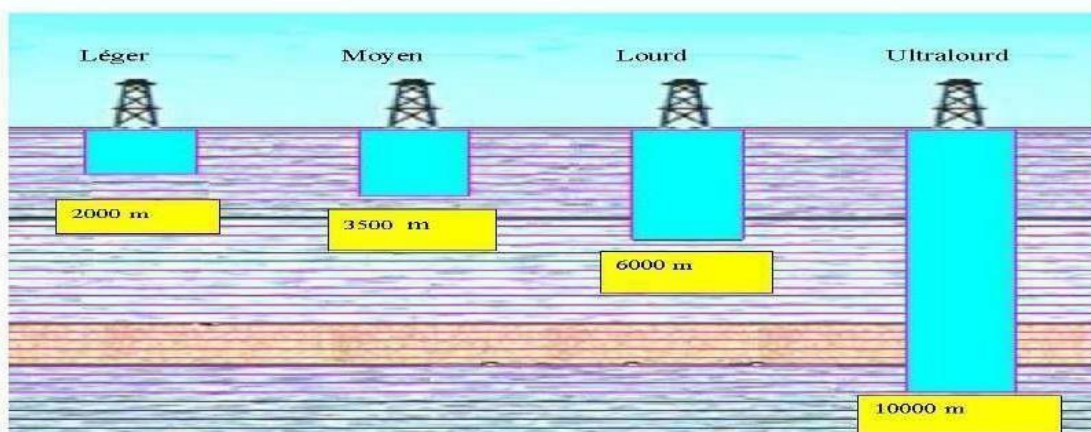


Figure I.11: Classification des appareils de forage en fonction de la profondeur

Ces performances de profondeur se traduisent par un poids au crochet de levage compte tenu des poids des garnitures et des casings. En prenant en compte les temps de manœuvre, on peut évaluer la puissance maximale qu'il devra développer par le treuil de forage (Draw Works). La puissance du treuil est donc une caractéristique primordiale pour déterminer un appareil de forage (10 hp de puissance au treuil pour chaque 100 pied de forage). Les autres fonctions (pompage, rotation) sont dimensionnées par rapport au programme de forage et tubage classique d'un puits à la profondeur désignée.[2]

1.6 Fonctions d'un appareil de forage

L'outil de forage (trépan) est entraîné dans son mouvement de rotation au fond du trou par une colonne de tiges creuses vissées les unes aux autres. A l'extrémité supérieure de ce train de tiges à la hauteur du plancher de la tour de sondage se trouve la tige d'entraînement qui est creuse également, mais de section extérieure carré ou hexagonale, passant à travers la table de rotation par laquelle elle est entraînée donnant à la tige un mouvement rotatif. La table de rotation est liée au moteur par l'intermédiaire de chaînes et de roues dentées [1], [2], [6]. L'ensemble des trains de sonde est suspendu au crochet de levage par l'intermédiaire de la tête d'injection qui joue le rôle de palier de rotation pour l'ensemble de train de tiges, elle comprend une partie mobile solidaire au train de sonde et une partie fixe solidaire au crochet. Ce crochet de levage peut être manœuvré du haut en bas de la tour métallique grâce à un système de Mouflage composé d'un moufle mobile auquel est suspendu le crochet et d'un moufle fixe en haut du mât de la sonde. Le brin du câble va s'enrouler sur le tambour de treuil de forage lequel est entraîné par les moteurs par l'intermédiaire d'un jeu de transmission et d'embrayages. Une injection continue de boue dans le trou est assurée pendant toute la durée de forage. Les pompes à boue aspirant la boue dans les bacs et la refoulant par l'intermédiaire de la colonne montante du flexible et de la tête d'injection dans l'intérieur du train de sonde, la boue descend aussi jusqu'au fond du trou, sort par les événements du trépan et remonte par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou foré, cette boue qui remonte du fond du trou et chargée du déblais de forage. Ainsi dès son arrivée à la surface, elle passe sur le tamis vibrants qui la sépare des déblais, elle retourne dans les bacs d'aspiration, La boue effectue donc un circuit fermé dans le forage. Aux deux tiers (2/3) environ du mât de forage se trouve la manœuvre de remontée ou descente. Le train tige est donc remonté puis redescendu par deux ou trois tiges grâce au système de levage qui est constitué de : Le treuil, le câble, les moufles et le crochet. Le mât de forage repose sur une substructure de 3m de hauteur ce qui élève d'autant le plancher de travail et permet l'installation sur la tête du puits d'un ou plusieurs obturateurs de sécurité[8]



Figure I.12: Vue de l'appareil de forage

1.7 Paramètres de forage pétrolière

Les paramètres de forage sont des éléments clés influençant l'évolution du ROP (Rate of Pénétration). Ils se divisent en deux grandes catégories :les paramètres mécaniques et les paramètres hydrauliques.

1.7.1 Paramètres mécaniques

Sont des paramètres issus par l'utilisation des processus mécaniques appliqués sur la roche telles que la traction et la compression pour un bon avancement.

Ces paramètres sont [4].

1.7.2 Vitesse d'avancement ou ROP (Rate Of Pénétration)

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

1.7.3 Le poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit)

Le WOB est la charge nécessaire appliquée sur l'outil afin de vaincre la résistance de la roche. En d'autres termes, c'est la charge permettant la pénétration des dents ou des éléments de coupe de l'outil dans la formation. On appelle charge limite, le poids sur l'outil nécessaire pour introduire entièrement les dents de l'outil dans la formation[4].

1.7.4 Vitesse de rotation ou RPM (révolution per munite)

Le poids sur l'outil est étroitement lié à la vitesse de rotation. On ne peut pas augmenter indéfiniment et simultanément ces deux paramètres sans provoquer un travail

extrêmement dur pour le train de sonde et l'outil de forage.

D'après les études, il ressort que la vitesse de pénétration croît en proportion directe avec la vitesse de rotation dans les terrains tendres, mais pas dans les terrains durs.

Pour ces derniers, il existe une vitesse optimale au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus. Cette vitesse maximale de rotation décroît au fur et à mesure que la dureté de la formation géologique augmente. Par ailleurs la vitesse optimale de rotation décroît quand on augmente le poids sur l'outil [4].

1.7.5 Types des outils

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

Les outils se classent en deux catégories :

1.7.5.1 Outils à molettes

Les outils tricônes sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression.

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

- Des dents usinées dans le cône,
- Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans descône.

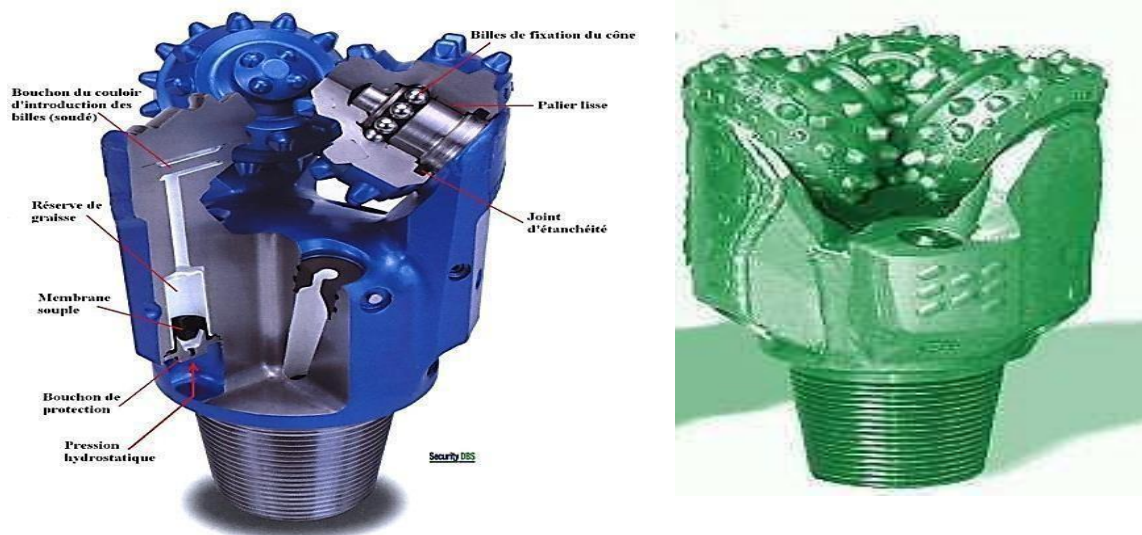


Figure I.13: Les outils à molettes (tricône)

1.7.5.2 Les outils à éléments de coupe fixes

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. Des diamants naturels et

de synthétiques sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot

1.7.5.2.1 Les outils à diamant naturel

Ils proviennent de mines et les pierres employées pour la fabrication des outils de forage sont des diamants industriels de très bonne qualité. Des pierres de différentes structure et forme sont utilisées. Le diamant est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80000 bar (carbure de tungstène : 50000 ; acier : 15000). Son point de fusion est très élevé (3650°C). Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0.2 gramme) [10]

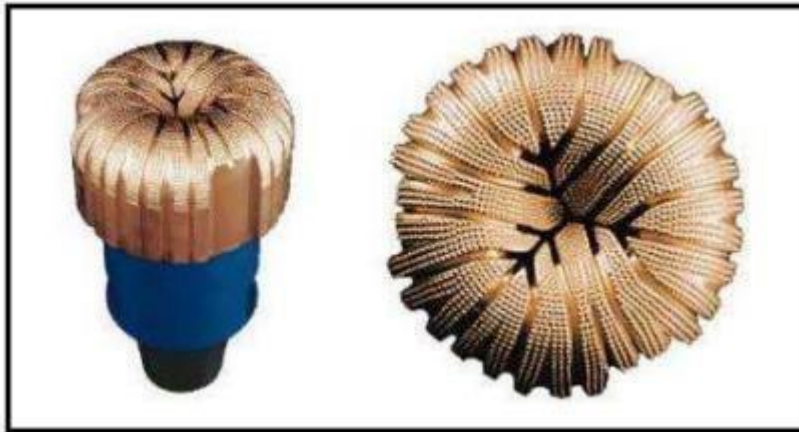


Figure I.14: Outil à diamant naturel

1.7.5.2.2 Les outils à diamant synthétique

On distingue deux types

1.7.5.2.3 Les outils PDC : (Poly cristalline Diamond Compact)

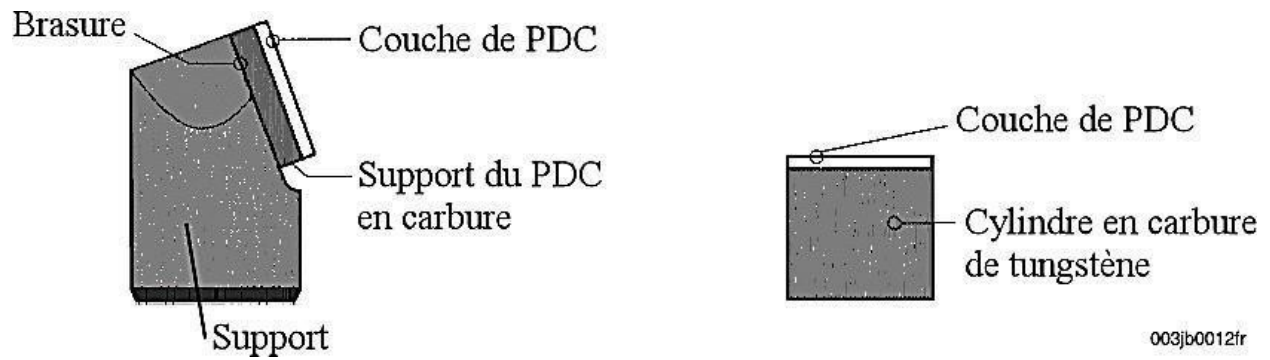
En 1971, General Electric a réussi à synthétiser le diamant en laboratoire à partir d'un mélange de graphite, de nickel et de cobalt, soumis à des conditions de pression et de température très élevées (100 000 bar et 1 500 °C). La fine couche de diamant, grâce à la présence de cobalt, peut être fixée sur un support en carbure de tungstène. Le produit obtenu est appelé Stratapax ou compact. Les diamants obtenus par synthèse sont polycristallins (d'où le nom de PDC :

Polycrystalline Diamond Compact) : la couche de diamant ainsi formée est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires (structure comparable à celle du carbonado). Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux. Cette structure polycristalline confère au diamant synthétique une résistance à la compression et à l'usure plus élevée que celle du diamant naturel.

La couche de diamant s'use par micro-écaillage, ce qui entraîne un auto-affûtage du PDC, maintenant ainsi l'efficacité de l'arête de coupe. Les performances du taillant seront donc peu ou pas diminuées au cours de la vie de l'outil.



Figure I.15: Les outils diamants



003jb0012fr



Figure I.16: Structure d'un PDC

1.7.5.2.4 Les outils TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Pour pallier l'instabilité thermique des PDC, General Electric a mis au point un diamant synthétique dont le catalyseur est éliminé, ce qui lui permet de résister à des températures de l'ordre de 1 200 °C. Cependant, l'élimination du cobalt fait qu'il n'est pas possible de fixer le diamant obtenu sur un support quelconque. Le TSP devra donc être maintenu en place mécaniquement, comme le diamant naturel.

Il existe un autre procédé de fabrication où le cobalt et le nickel sont remplacés par du silicium. Le produit obtenu est encore plus stable du point de vue thermique, mais, comme dans le cas précédent, il ne peut pas être fixé sur un support.

Les TSP sont disponibles sous plusieurs formes :

- Triangulaire, dont la taille est de l'ordre de 3 pierres par carat. Il est utilisé pour forer des formations moyennement dures.
- Disque, dont la taille est de l'ordre d'une pierre par carat. Il est utilisé pour forer le même type de formation, mais il est plus performant dans les situations où une plus grande résistance à l'usure et au choc est demandée. Cette forme permet une vitesse d'avancement et une durée de vie plus élevées dans des formations dures, abrasives ou fracturées.

Les TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïque de la dimension des PDC. Cette structure a permis d'augmenter la vitesse d'avancement et d'allonger la durée de vie de l'outil dans des formations tendres, abrasives, ainsi que dans les intercalations d'argiles et de roches plus dures, là où les PDC n'étaient 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, qui est également polycristallin).
- Son usure irrégulière produit des faces tranchantes, alors que le diamant naturel s'émousse.

De ce fait, les performances des TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil. En définitive, le TSP combine l'efficacité du PDC et la résistance à la température du diamant naturel [11].



Figure I.17: outil TSP

1.8 Paramètres hydrauliques

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

1.8.1 Débit

Le bon nettoyage du fond est basé sur le calcul de la vitesse de sédimentation des déblais dans l'annulaire, qui est déterminé en fonction de la forme et du diamètre équivalent des déblais, du régime d'écoulement du fluide et de la quantité de la sédimentation, ainsi quels paramètres rhéologiques du fluide [4].

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

1.8.2 La pression du fond du puits

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

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

1.8.3 Type du fluide de forage

Le choix du type de la boue à utiliser et de ces caractéristiques, joue un rôle très important, car le choix dépend de la formation traversée, de la pression et aussi des problèmes rencontrés et de la durée de forage et donc le prix de revient de celui-ci. C'est-à-dire que si on choisit une boue qui ne convient pas à la couche à foré, on sera exposé à d'énormes problèmes qui résultent soit de sa composition (contamination), soit de ses caractéristiques (pertes et venues) [4].

1.8.4 Caractéristiques du fluide de forage

1.8.4.1 Densité

La densité est l'une des facteurs de boue agissant sur le transport des "cuttings" puisqu'elle représente la capacité de soulever les déblais du fond vers la surface. La densité peut se modifier selon les circonstances du forage sans pour autant dépassé une certaine limite afin d'assurer un bon nettoyage du fond[11].

1.8.4.2 **Viscosité**

Des essais ont mis en évidence l'influence néfaste de la viscosité sur la vitesse d'avancement. Il est assez logique de penser que plus un liquide est visqueux, plus il a des difficultés à pénétrer dans les porosités ou les petites fractures produites par l'outil et par conséquent aider à la destruction de la formation[4].

1.9 **Conclusion**

Le choix de la machine de forage pétrolier est un facteur déterminant pour l'efficacité du processus, et il dépend de critères tels que la profondeur du puits et le type de roche. Afin d'optimiser la performance du système de forage, il est essentiel de réaliser des études approfondies prenant en compte les caractéristiques géologiques des roches, la nature des formations, ainsi que les conditions de pression et de température. Ces études permettent de sélectionner les outils et les machines les plus adaptés, contribuant ainsi à atteindre les niveaux maximaux d'efficacité et de productivité. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une série de méthodes visant à améliorer les variables opérationnelles, telles que la vitesse de forage, le type de boue et le contrôle des équipements, afin d'obtenir des résultats optimaux.

CHAPITRE II:

Les plans d'expériences.

2 Introduction

Les plans d'expériences permettent d'optimiser l'organisation des essais dans les recherches scientifiques ou les études industrielles. Ils sont utilisés dans diverses disciplines et secteurs pour établir la relation entre une variable d'intérêt (y) et d'autres variables (x_i). L'objectif principal est d'obtenir le maximum d'informations avec un minimum d'expériences, en suivant des règles mathématiques rigoureuses. Il existe plusieurs types de plans d'expériences, adaptés aux différentes situations rencontrées par les chercheurs. La compréhension de cette méthode repose sur deux concepts clés : l'espace expérimental et la modélisation mathématique des variables étudiées.[13]

2.1 Optimisation du forage par la méthodologie des plans d'expériences

L'objectif de l'optimisation du forage est d'améliorer le taux d'avancement, d'augmenter l'efficacité de l'opération et de réduire les coûts de forage.

L'amélioration des paramètres d'excavation vise à :

- Rationaliser et concevoir le processus de forage.
- Modéliser des phénomènes complexes à travers des expériences, qui peuvent être difficiles à appliquer sur le terrain ou dont les conséquences peuvent être imprévisibles.

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

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

2.2 Principes de base des plans d'expériences

Les plans d'expériences possèdent un vocabulaire et une terminologie qu'il convient de définir

2.2.1 Domaine de facteurs

Un plan d'expérience est une stratégie de conception d'expériences visant à obtenir des conclusions solides et pertinentes de manière efficace et économique. La méthodologie des plans d'expériences repose sur l'idée qu'une expérience bien structurée conduit généralement à une analyse et une interprétation statistique relativement simples des résultats. [14]

2.2.1.1 Facteur

Un facteur désigne toute variable qui doit obligatoirement être contrôlée et qui peut influencer la réponse observée. La distinction principale entre une variable et un facteur réside dans le fait qu'un facteur doit être facilement modifiable. La valeur attribuée à un facteur lors de la réalisation d'une expérience est appelée « niveau ».

2.2.1.2 Réponse

La réponse désigne la variable observée à chaque expérience réalisée. Autrement dit, il s'agit du résultat mesuré dans une étude. Chaque point du domaine d'étude correspond à une réponse spécifique. L'ensemble de ces réponses forme la surface de réponse. La valeur d'une réponse ne peut être modifiée que de manière indirecte, en faisant varier les facteurs.[15]

2.2.1.3 Notion d'espace expérimental

Lorsqu'un expérimentateur lance une étude, il s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur, appelée « réponse », est la variable d'intérêt. La valeur de cette réponse dépend de plusieurs facteurs. Ainsi, au lieu du terme « variable », on utilise le mot « facteur ». La réponse dépend donc d'un ou de plusieurs facteurs.

Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur attribuée à un facteur pour réaliser un essai est appelée « niveau ». Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, ses variations sont généralement limitées entre deux bornes. La borne inférieure représente le niveau bas, et la borne supérieure représente le niveau haut

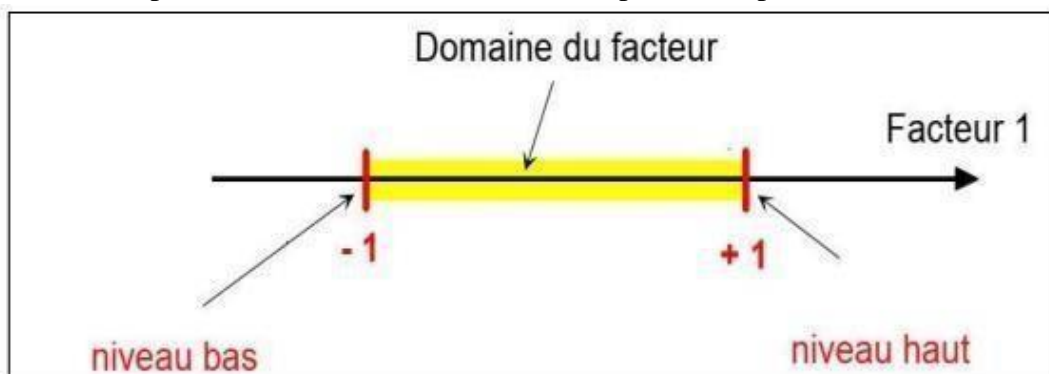


Figure II.1: Le niveau bas du facteur est noté par (-1) et le niveau haut par (+1) [13].

Le domaine de variation d'un facteur comprend toutes les valeurs situées entre le niveau bas et le niveau haut. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre ce facteur entre ces deux niveaux est appelé le domaine de variation du facteur, ou plus simplement le domaine du facteur. Il est courant de noter le niveau bas par (-1) et le niveau haut par (+1).

S'il y a un second facteur, il est également représenté par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Cet axe est disposé orthogonalement au premier. Ainsi, on obtient un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions, appelé l'espace expérimental (Figure II.2) [13].

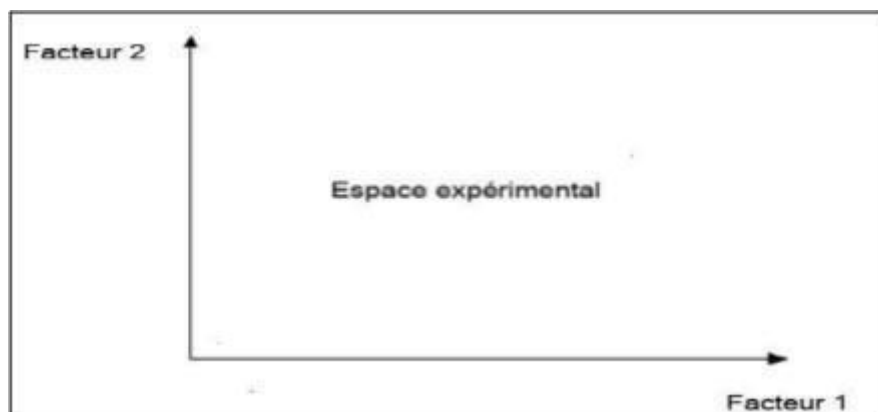


Figure II.2 :Représentation de l'espace expérimental [13]

Dans la pratique, l'expérimentateur choisit une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone spécifique est appelée le domaine d'étude (Figure II.3). Ce domaine est délimité par les niveaux haut et bas de tous les facteurs, et éventuellement par des contraintes entre ces facteurs. Par exemple, si le second facteur est la surcharge du véhicule, définie comme toute masse supplémentaire au poids du véhicule et du chauffeur, le niveau bas de la surcharge pourrait être de 0 kg et le niveau haut de 300 kg. En l'absence de contraintes, le domaine d'étude est constitué de tous les points où les surcharges varient entre 0 et 300 kg, et les vitesses entre 80 et 120 km/h [13].

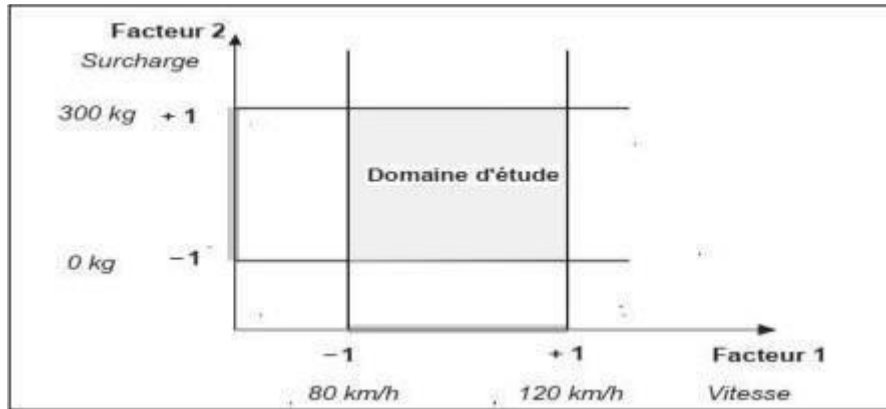


Figure II.3 : Représentation du domaine d'étude [13]

2.2.1.4 notion de surface de réponse

Cela implique que les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental, tandis que y désigne la valeur de la réponse en ce point. Un axe orthogonal à l'espace expérimental est attribué à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace de dimension supérieure à celle de l'espace expérimental. Par exemple, pour un plan à deux facteurs, un espace tridimensionnel est nécessaire pour sa représentation : une dimension pour la réponse et deux dimensions pour les facteurs. Chaque point du domaine d'étude correspond à une réponse. L'ensemble de ces réponses, localisées sur une surface, constitue la surface de réponse (voir Figure II.4). Le défi principal des plans d'expériences réside dans le choix du nombre et de la répartition des points d'expériences. L'objectif est d'obtenir la meilleure précision possible pour la surface de réponse tout en limitant le nombre d'essais.

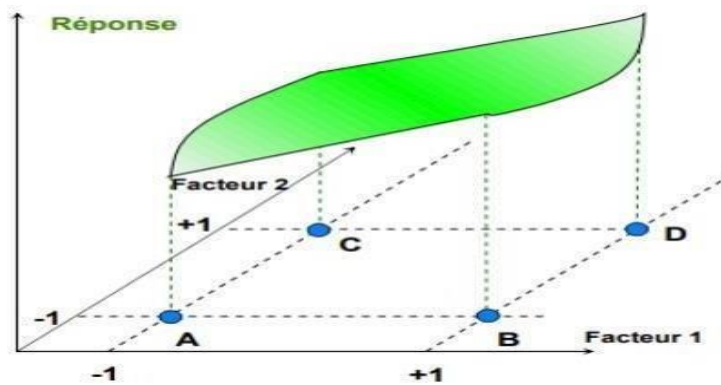


Figure II.4 : Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse [15].

2.2.1.5 .Modélisation mathématique

On choisit au préalable une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On effectue un développement limité de la série de Taylor-Maclaurin. Les dérivées sont supposées constantes, et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé. [14] :

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

Où y : représente la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée durant l'expérimentation et obtenue avec une précision donnée.

X_i : désigne le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue, et 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. Ces coefficients 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 ensuite calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans avoir besoin de réaliser à nouveau les expériences.

e : représente l'erreur totale.

2.2.1.6 Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse, laquelle est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues à déterminer. À la fin du plan d'expériences, on obtient un système de nnn équations (si nnn essais ont été réalisés) à ppp inconnues (si le modèle a priori choisi comporte ppp coefficients). Ce système peut être exprimé de manière simple en notation matricielle [13]

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

Y : est le vecteur des réponses.

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

a : est le vecteur des coefficients.

e : est le vecteur des écarts.

On a ainsi un système de n équations à p inconnues, ce qui signifie que le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues. Pour résoudre ce système, on utilise une méthode de régression classique.

Les estimations des coefficients, notées \hat{a} , sont alors obtenues par la formule suivante :

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

Dans cette formule, X' représente la matrice transposée de X . De nombreux logiciels permettent d'effectuer ce calcul et de fournir directement les valeurs des coefficients.

2.3 Différents types des plans d'expérience

2.3.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Les plans factoriels complets à deux niveaux sont non seulement les plus simples, mais aussi les plus pratiques, car ils servent de fondation à toute étude initiale. Les premiers résultats obtenus avec ces plans peuvent toujours être affinés par des expériences supplémentaires, permettant ainsi d'atteindre le niveau de précision et d'information recherché.[13]

2.3.2 Plans complets à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré, représentant ainsi un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique proposé est un modèle de premier degré par rapport à chaque facteur.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

est la réponse

x : variables de prédiction appelées facteurs

β : 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 indique qu'il y a deux facteurs étudiés.
- L'autre 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Cette notation se généralise facilement : pour un plan impliquant l'étude de k facteurs, chacun prenant deux niveaux, on parlera d'un plan 2.^[1]

2.3.2.1 Représentation d'une étude sous forme de tableau

Les représentations géométriques sont pratiques et très explicites, mais dès que le nombre de facteurs dépasse trois, elles deviennent inutilisables pour les espaces multidimensionnels.

Ce tableau est appelé « tableau d'expérimentation » lorsqu'il est construit avec les unités physiques classiques (Tableau II.1) et « plan d'expériences » lorsqu'il utilise les unités codées (Tableau II.2). Dans ce dernier cas, il est important de rappeler la signification des unités codées en précisant, pour chaque facteur, leurs valeurs en unités physiques habituelles [13].

Table 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

Table I.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 facteur ou le domaine d'étude choisi, remplacer les variables naturelles par des variables codées permet d'uniformiser le domaine de variation de chaque facteur (entre -1 et +1), facilitant ainsi la comparaison des effets des différents facteurs. Il est donc nécessaire de transformer les variables réelles de conception en variables codées, lesquelles sont sans dimension, ont une moyenne de zéro et un écart-type identique. L'objectif de cette opération est de traiter tous les facteurs de manière uniforme et simplifiée. La règle de transformation des variables réelles en variables codées est la suivante :

$$X_i = \frac{2R_i - [R_{\max} + R_{\min}]}{[R_{\max} - R_{\min}]} \quad (\text{II. 6})$$

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.

2.3.2.2 Présentation des résultats d'essais:

Lors de chaque essai, l'expérimentateur mesure la réponse choisie. La réponse du premier essai est notée y_1 , celle du deuxième essai est y_2 , et ainsi de suite. Ces réponses sont inscrites en regard de chaque essai et sont regroupées dans la colonne « Réponse » (Tableau II.3). [15]

Table 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

2.3.2.3 Calcul des coefficients

Les quatre points d'expériences apportent quatre équations

$$y_1 = a_0 + a_1x_{1,-1} + a_2x_{2,-1} + a_{12}x_{1,-1}x_{2,-1}$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_{1,+1} + a_2x_{2,-1} + a_{12}x_{1,+1}x_{2,-1}$$

$$y_3 = a_0 + a_1x_{1,-1} + a_2x_{2,+1} + a_{12}x_{1,-1}x_{2,+1}$$

$$y_4 = a_0 + a_1x_{1,+1} + a_2x_{2,+1} + a_{12}x_{1,+1}x_{2,+1}$$

Partir du modèle, on peut écrire les 4 relations suivantes en remplaçant les variables $X_{i,j}$ par leurs valeurs dans chaque expérience.

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12}$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{II. 7})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12}$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12}$$

La résolution de ce système donne la valeur des coefficients :

$$\hat{a}_0 = \frac{1}{4} (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)$$

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{4} (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{II. 8})$$

$$\hat{a}_2 = \frac{1}{4} (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4)$$

$$\hat{a}_{12} = \frac{1}{4} (y_1 - y_2 - y_3 + y_4)$$

Connaissant les coefficients, on peut écrire le modèle de régression qui servira à faire des prévisions.

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \hat{a}_2x_2 + \hat{a}_{12}x_1x_2 \quad (\text{II. 9})$$

2.3.3 Plans factoriels à k facteurs à deux niveaux

Il est possible d'augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental aura autant de dimensions qu'il y a de facteurs. Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k

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

Il est important de noter que cette notation permet aussi de connaître le nombre d'essais à réaliser.

2.3.4 Avantages et inconvénients des plans factoriels complets

Les plans factoriels complets sont considérés comme des plans « sans risque », car ils permettent de déterminer tous les effets et interactions de manière claire et sans ambiguïté. Le nombre d'essais requis est au moins égal au nombre total de coefficients à estimer. Les essais sont conçus de manière à ce que les coefficients soient estimés avec une variance minimale. Leur simplicité d'utilisation garantit un bon « rendement » par rapport aux résultats obtenus. Cependant, ces plans présentent une limitation majeure : le nombre d'essais augmente de manière exponentielle avec le nombre de facteurs. Par exemple, pour 7 facteurs, il est nécessaire de réaliser 128 expériences, ce qui devient rapidement difficile à mettre en œuvre en pratique.. [15]

2.3.5 plans factoriels fractionnaires à deux niveaux

Les plans factoriels fractionnaires sont des variantes des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs tout en réduisant le nombre d'essais par rapport aux plans factoriels complets. Ces plans ont été développés pour contrer l'augmentation rapide du nombre d'essais dans les plans complets. L'objectif des plans fractionnaires est de diminuer ce nombre d'essais tout en conservant une précision suffisante dans l'analyse des effets des facteurs..

2.3.5.1 Notation des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux, le plan complet est noté 2^k . Le plan fractionnaire, qui représente la moitié du plan complet, comprend $\frac{1}{2} 2^k$ ou 2^{k-1} essais. Chaque élément de cette notation a une signification particulière :

- Le k indique qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.
- Le 1 indique que le nombre d'essais a été divisé par 2^1

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

Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs, chacun prenant deux niveaux, et le plan complet a été divisé par 2^q .

Les plans fractionnaires nécessitent moins d'expériences que les plans factoriels complets. Le nombre d'expériences est donc n^{k-q} , et la matrice des expériences est divisée k fois. [13]

2.3.5.2 Nombre maximum de facteurs étudiés sur un plan de base

Il est possible d'étudier autant de facteurs supplémentaires qu'il y a d'interactions dans le plan de base. Par exemple, dans un plan de base 2^2 , il existe une interaction, ce qui permet d'étudier 3 facteurs : deux sur les colonnes 1 et 2, et un troisième sur la colonne de l'interaction. Dans un plan de base 2^3 , il y a quatre interactions, ce qui permet d'étudier sept facteurs : trois sur les colonnes 1, 2 et 3, et les quatre autres sur les colonnes d'interaction 12, 13, 23 et 123. [13]

Table II.4 : Nombre maximum de facteurs étudiés maximum de facteurs que l'on peut étudier sur différents plans de base. Sur un plan de base donné [13]

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

2.3.6 Les plans pour surfaces de reponse

Les plans du second degré, également appelés plans pour surfaces de réponse [10], servent à élaborer des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Dans le cas de deux facteurs, l'expression est la suivante :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{12} \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 + \mathbf{a}_{11} \mathbf{x}_1^2 + \mathbf{a}_{22} \mathbf{x}_2^2 + \mathbf{e} \quad (\text{II. 11})$$

Ces plans sont particulièrement pertinents lorsque l'on se situe près d'un maximum ou d'un minimum. La théorie développée dans la première partie de cet article s'applique à ces plans. À la fin des expérimentations, un système d'équations est obtenu, dont les coefficients sont calculés à l'aide de la relation suivante {4} :

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (\text{II. 12})$$

Il existe plusieurs types de plans du second degré, dont les principaux sont détaillés ci-dessous.

2.3.6.1 Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont situés au centre de chaque arête des faces du cube (voir Figure II.1). Ce plan comprend douze essais, auxquels il est possible d'ajouter un (ou plusieurs) point(s) central(aux). Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation spécifique : l'erreur de prévision des réponses est identique pour tous les points situés sur une sphère (ou une hypersphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. Il s'agit du critère d'iso-variance par rotation. Le plan de Box-Behnken le plus couramment utilisé est celui qui permet d'étudier trois facteurs [15].

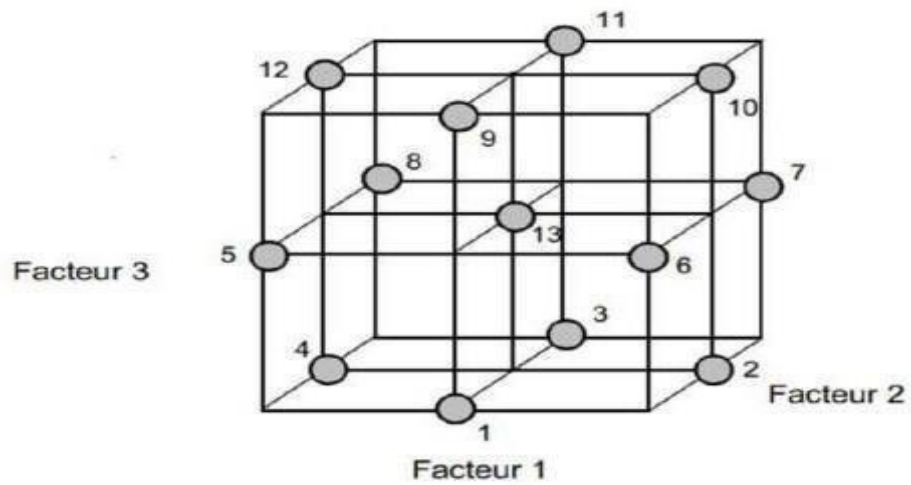


Figure II.5: Plan de Box- Behnken pour trois facteurs [15]

Table II.5: Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs. [15]

N° essai	Facteur1	Facteur2	Facteur3
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

2.3.6.1.1 Les avantages de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken sont des outils expérimentaux utilisés en statistiques et en conception de produits pour étudier la réponse d'un système en fonction de diverses combinaisons de variables d'entrée, tout en minimisant le nombre d'essais nécessaires.

Voici quelques-uns de leurs avantages :

- Efficacité de conception : Les plans de Box-Behnken sont conçus pour optimiser le nombre d'essais nécessaires afin d'obtenir des informations pertinentes sur le système étudié, permettant ainsi d'économiser du temps et des ressources par rapport à d'autres méthodes expérimentales.
- Réduction du nombre d'essais : Par rapport à d'autres plans expérimentaux, tels que les plans factoriels complets, les plans de Box-Behnken nécessitent moins d'essais pour explorer de manière efficace l'espace des variables d'entrée.
- Robustesse aux erreurs de mesure : Ces plans sont capables de résister aux erreurs de mesure et aux petites perturbations, ce qui en fait une méthode fiable pour des expérimentations dans des environnements réels où les conditions peuvent fluctuer.
- Facilité d'analyse : Les plans de Box-Behnken sont conçus pour simplifier l'analyse statistique des résultats expérimentaux, facilitant ainsi la détermination des relations entre les variables d'entrée et la réponse du système.
- Exploration optimisée de l'espace de conception : En utilisant des conceptions optimisées qui équilibrent la couverture de l'espace de conception avec un nombre d'essais minimal, les plans de Box-Behnken permettent d'identifier rapidement les zones d'intérêt et d'optimiser les performances du système. [15].

2.3.6.2 Les plans composites

Un plan composite se compose de trois éléments :

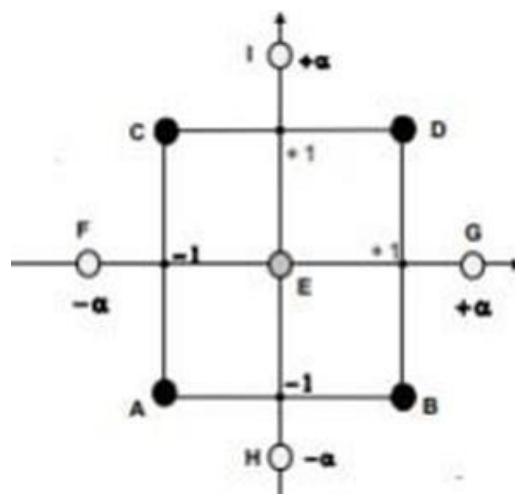


Figure II.6: Plan composite pour deux facteurs. [15]

Les coordonnées des points étoilés dépendent du critère d'optimalité sélectionné (voir annexe 2). En règle générale, on choisit le critère de quasi-orthogonalité ou celui d'isovariance par rotation. Les plans composites sont souvent utilisés pour compléter un premier plan factoriel lorsque les résultats ne peuvent pas être suffisamment expliqués par un modèle de premier degré. Il suffit alors de réaliser les expériences correspondant aux points étoilés et d'effectuer les calculs sur l'ensemble des données obtenues. Les plans composites sont particulièrement adaptés à une collecte progressive des résultats [15].

2.3.6.3 Les plans hybrides

Les plans hybrides ont été développés par Roquemore [13]. Leur but est de concilier deux critères d'optimalité : l'orthogonalité et l'isovariance par rotation. L'orthogonalité garantit la meilleure précision possible pour les coefficients du modèle, tandis que l'isovariance par rotation assure des erreurs de prévision égales à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur souhaite obtenir ces deux propriétés, il est recommandé d'utiliser un plan hybride. Les plans hybrides sont désignés comme suit : on indique d'abord le nombre de facteurs, suivi du nombre de points expérimentaux, avec un seul point central, puis une lettre pour différencier deux plans ayant le même nombre de facteurs et de points expérimentaux. Par exemple, on trouve les plans 311A et 311B, qui permettent d'étudier 3 facteurs en 11 essais. Le tableau 15 présente le plan hybride 311B [13].

Table II.6: Plan hybride 311B [13]

N° essai	Facteur1	Facteur2	Facteur3
1	0	0	2.449
2	0	0	-2.449
3	-0.751	2.106	+1
4	2.106	0.751	+1
5	0.751	-2.106	+1
6	-2.106	-0.751	+1
7	0.751	2.106	-1
8	2.106	-0.751	-1
9	-0.751	-2.106	-1
10	-2.106	0.751	-1
11	0	0	0

Les autres plans hybrides sont les plans 310, 416A, 416B, 416C ou 628A.

2.3.6.4 Les plans de Mozzo

Les plans de Mozzo [1] présentent deux avantages principaux : ils sont séquentiels et le nombre de niveaux d'étude est limité. On peut commencer par analyser deux facteurs avec trois essais, et si l'on souhaite ajouter un troisième facteur, il suffit de réaliser trois essais supplémentaires. Ainsi, douze essais suffisent pour étudier quatre facteurs. Toutefois, les plans de Mozzo ne permettent pas toujours d'établir un modèle du second degré. Dans ce cas, il est nécessaire de recourir aux plans quadratiques gigognes de Mozzo. [13].

Table II.7 : Plans de Mozzo pour 2, 3 ou 4 facteurs [13].

N°essai	Facteur1	Facteur2	Facteur3	Facteur4
1	0.268	+1	-1	-1
2	0.732	-0.732	-1	-1
3	-1	-0.268	-1	-1
4	-0.268	-1	+1	-1
5	-0.732	0.732	+1	-1
6	+1	0.268	+1	-1
7	-0.268	-1	-1	+1
8	-0.732	0.732	-1	+1
9	+1	0.268	-1	+1
10	0.268	+1	+1	+1
11	0.732	-0.732	+1	+1
12	-1	-0.268	+1	+1

2.3.6.5 Les plans de Doehlert

La principale caractéristique des plans de Doehlert [17] réside dans la répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace d'étude. La figure 18 montre l'agencement de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont équidistants du centre du domaine d'étude et se trouvent sur un cercle trigonométrique, formant ainsi un hexagone régulier [15].

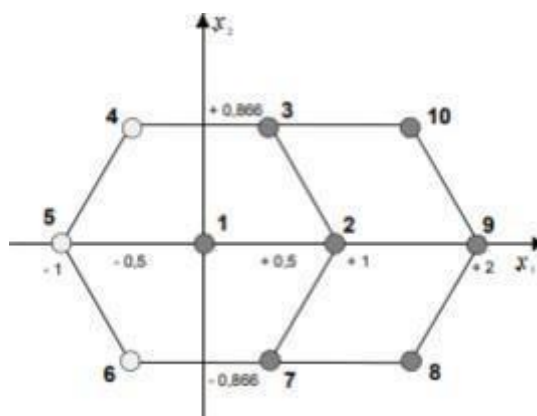


Figure II.7: Plan de Doehlert. [13]

Les points 1 à 7 représentent un premier plan de Doehlert, tandis que les trois points 8, 9 et 10 correspondent à des expériences supplémentaires. Les points 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1 composent un deuxième plan de Doehlert. Si l'expérimentateur souhaite explorer davantage le domaine expérimental, il peut facilement ajouter des points d'expérience supplémentaires, tout en conservant une disposition similaire à celle du plan initial. La figure 18 montre qu'en ajoutant trois points supplémentaires (essais 8, 9 et 10), un nouveau plan de Doehlert peut être obtenu (essais 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1). Ce type de plan est applicable pour un nombre quelconque de facteurs [13].

2.3.6.6 Les plans de D'optimaux

Les contraintes expérimentales ne permettent pas toujours de respecter les conditions idéales des plans d'expériences précédemment mentionnés. Par exemple, les réglages de l'appareil peuvent ne pas permettre d'atteindre les niveaux recommandés par la théorie, ou certaines combinaisons de niveaux peuvent s'avérer dangereuses, comme des réactions explosives pour les chimistes ou des concentrations toxiques pour les médecins. Dans ce cas, les plans D-optimaux sont particulièrement utiles. Le choix de l'emplacement des points expérimentaux nécessite alors un logiciel spécialisé en plans d'expériences. Il suffit de spécifier le nombre d'expériences souhaitées et le modèle a priori, et le logiciel utilise un algorithme d'échange pour déterminer le plan le plus adapté à l'étude [13].

2.3.6.7 Les plans non conventionnels et leur éventuelle réparation

Il peut arriver que l'on dispose d'une série de résultats expérimentaux obtenus sans avoir suivi un plan d'expériences prédéfini. Dans ce cas, il a été démontré qu'il est possible d'exploiter ces résultats, à condition de prendre certaines précautions. Lorsque la répartition des essais ne diffère pas trop des plans classiques, les erreurs sur les coefficients du modèle restent faibles, et les prédictions des réponses sont généralement acceptables. En revanche, si la disposition des essais s'écarte considérablement des plans traditionnels, les erreurs sur les coefficients peuvent devenir importantes, rendant le modèle inutilisable pour des prévisions. Dans ce cas, il est possible de corriger l'expérimentation en ajoutant de nouveaux essais placés de manière appropriée par rapport aux précédents. Les calculs nécessaires pour déterminer ces nouveaux points sont pris en charge par les logiciels spécialisés en plans d'expériences[13].

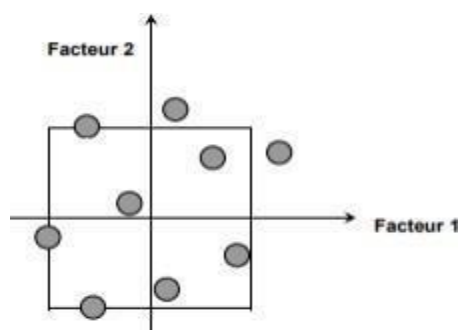


Figure II.8: Exemple de plan non conventionnel. [13]

2.3.7 Autres Plan d'expériences

2.3.7.1 Le plan de Taguchi:

Un plan de Taguchi est une méthode d'expérimentation permettant de concevoir un produit ou un procédé qui fonctionne de manière plus stable et plus fiable dans ses conditions d'exploitation. Ces plans reposent sur l'idée que tous les facteurs influençant la variabilité ne peuvent pas être contrôlés. Les facteurs que l'on ne peut pas maîtriser sont appelés facteurs de bruit. Les plans de Taguchi visent à identifier les facteurs contrôlables (facteurs de contrôle) qui permettent de réduire l'impact des facteurs de bruit au cours de l'expérimentation.

Une des grandes innovations de G. Taguchi a été de développer des outils facilitant cette approche, notamment un ensemble de matrices d'expériences fractionnaires orthogonales standard, adaptées à presque toutes les situations industrielles. Chaque matrice est représentée par un symbole. Par exemple, L8 (27) indique l'étude de 7 facteurs à 2 niveaux, nécessitant la réalisation de 8 essais. L18 (21 × 37) indique l'étude d'un facteur à 2 niveaux et de 7 facteurs à 3 niveaux, avec la nécessité de réaliser 18 essais [13].

2.3.7.2 Les plans de Koshal

Les plans de Koshal sont des plans d'expérimentation qui permettent de déterminer uniquement les effets principaux des facteurs, sans tenir compte des interactions entre ces derniers. Le modèle mathématique associé est le suivant :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (\text{II.13})$$

Bien que peu connus, ces plans sont particulièrement utiles pour aborder un problème de manière préliminaire. Leur principal avantage réside dans le fait qu'ils fournissent directement l'effet des facteurs. De plus, ces plans peuvent constituer la première étape d'un plan factoriel, qu'il est toujours possible d'étendre pour obtenir un plan complet ou fractionnaire

2.3.7.3 Les plans de Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner [16] sont des plans factoriels fractionnaires simplifiés, conçus pour déterminer à la fois les effets des facteurs et les interactions d'ordre deux. Avant même de réaliser l'expérimentation, toutes les autres interactions sont supposées inexistantes. Le modèle mathématique utilisé au début de l'étude est :

(Modèle à insérer ici si nécessaire) [13].

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (\text{II. 14}).$$

2.4 Conclusion

L'utilisation des méthodes d'optimisation permet de résoudre les problèmes scientifiques rencontrés et d'améliorer les paramètres étudiés. Dans ce chapitre, nous avons abordé l'une des méthodes les plus récentes pour l'optimisation des paramètres de forage. Les techniques des plans d'expériences servent à définir l'approche expérimentale pour les problématiques d'étude. Ces méthodes ont connu un développement considérable grâce aux scientifiques et chercheurs dans le domaine du forage, car elles ont surpassé les méthodes traditionnelles, répondant ainsi aux exigences visant à améliorer le processus de forage, réduire le nombre d'expériences nécessaires et, par conséquent, diminuer les coûts associés au forage.

Chapitre III : Application de la méthode RSM design (Box-Behnken)

3 Introduction

L'objectif principal de ce travail est d'analyser l'influence des paramètres étudiés sur le développement du taux de pénétration. Ce chapitre est consacré au traitement des données obtenues en utilisant la méthode des surfaces de réponse, les plans de Box- Behnken, qui ont permis de réduire le nombre d'essais nécessaires et d'identifier les conditions optimales dans le domaine d'étude défini

3.1 Application de la méthode

De manière générale, une surface de réponse désigne la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire en fonction de variables d'entrée appelées variables stimuli. La propriété étudiée, ou réponse Y, est obtenue par l'intermédiaire d'une fonction de réponse explicite qui traduit l'effet des variables d'entrée sur le système. Toute variation de ces variables entraîne ainsi une modification de la réponse du système. Les modèles expérimentaux basés sur les surfaces de réponse tiennent compte du choix des variables stimuli[18].

Pour cette étude, des tests expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de forage vertical qui présente des similitudes avec une machine de forage rotatif. Ce dispositif de forage a été spécialement conçu pour recueillir les données requises concernant les paramètres d'étude.

Les caractéristiques de ce dispositif de forage sont présentées dans le tableau 1.

Tableau III.1: Caractéristiques de la foreuse utilisée

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

La conception de la foreuse utilisée pour mener les divers essais d'étude est illustrée dans la Figure 1

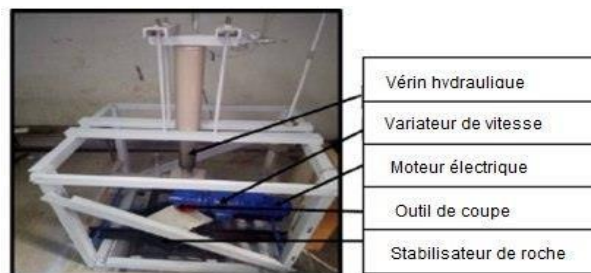


Figure III.1: foreuse pour essais

Les expériences ont été réalisées sur trois paramètres de forage, à savoir le poids sur l'outil (WOB), la vitesse rotation (RPM), et la dureté des roches (RC). Les valeurs attribuées à chaque paramètre d'étude sont répertoriées dans le Tableau 2

Tableau III.2: Valeurs Choisi des facteurs.

Facteurs	Unité	Niveaux		
		80	120	160
WOB	kgf	80	120	160
RPM	Tr/min	118	135	152
RC	Kgf/cm ²	640	1095	1550

3.1.1 Distribution des essais

Le tableau III.3 représente les essais selon le plan utilisé avec des valeurs réels et codés

Table III.3: Plan d'expériences en variable réelles et en variable codées.

Essais	Variable réelles			Variable codées		
	WOB(MT)	RPM(Tr/min)	Rc(kgf/cm ²)	A	B	C
1	80	135	1550	-1	0	+1
2	160	135	1550	+1	0	+1
3	120	152	1550	0	+1	+1
4	120	135	1095	0	0	0
5	120	135	1095	0	0	0
6	120	135	1095	0	0	0
7	80	135	640	-1	0	-1
8	120	118	1550	0	-1	+1
9	160	118	1095	+1	-1	0
10	120	135	1095	0	0	0
11	120	135	1095	0	0	0
12	160	152	1095	+1	+1	0
13	120	152	640	0	+1	-1
14	160	135	640	+1	0	-1
15	80	152	1095	-1	+1	0
16	120	118	640	0	-1	-1
17	80	118	1095	-1	-1	0

Table III.4: Résultats des essais

	Facteur1	Facteur 2	Facteur 3	Réponse 1
Essais	A:WOB	B:RPM	C:Rc	ROP
	kgf	tr/min	kgf/cm²	mm/min
1	80	135	1550	0.48
2	160	135	1550	1.56
3	120	152	1550	1.67
4	120	135	1095	1.21
5	120	135	1095	1.21
6	120	135	1095	1.21
7	80	135	640	1.86
8	120	118	1550	0.81
9	160	118	1095	1.42
10	120	135	1095	1.21
11	120	135	1095	1.21
12	160	152	1095	2.61
13	120	152	640	2.53
14	160	135	640	2.82
15	80	152	1095	1.38
16	120	118	640	1.96
17	80	118	1095	1.11

3.1.2 Traitements des données

L'analyse statistique des données est réalisée à l'aide de la méthode ANOVA (Analysis of Variance). Il s'agit d'une technique statistique visant à généraliser la comparaison des moyennes ou des pourcentages lorsque plusieurs groupes (plus de deux) sont à comparer. Cette méthode peut être considérée comme l'équivalent de la régression linéaire, mais appliquée à des variables qualitatives. Elle permet d'expliquer une variable quantitative Y à partir d'une variable explicative qualitative X, appelée facteur, dont les différentes modalités sont désignées comme niveaux du facteur.

L'analyse repose essentiellement sur l'étude des variances et l'évaluation de la signification statistique à l'aide des valeurs p (p-value), comme l'illustre le tableau 3 présenté ci-dessous.

[19]

Table III.5: Analyse de la variance

Source	Somme des carrés	dl	Moyenne carrée	Valeur -F	Valeur -p	
Modèle	6.40	9	0.7116	61.51	< 0.0001	significan t
A-WOB	1.60	1	1.60	138.49	< 0.0001	
B-RPM	1.04	1	1.04	90.25	< 0.0001	
C-Rc	2.70	1	2.70	233.65	< 0.0001	
AB	0.2116	1	0.2116	18.29	0.0037	
AC	0.0036	1	0.0036	0.3112	0.5943	
BC	0.0210	1	0.0210	1.82	0.2196	
A ²	0.1345	1	0.1345	11.63	0.0113	
B ²	0.2451	1	0.2451	21.18	0.0025	
C ²	0.3572	1	0.3572	30.88	0.0009	
Résiduel	0.0810	7	0.0116			
Total	6.49	16				

Les lois des différents indices définis dans le tableau III 5, sont déterminés comme suit :

- Variance

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y - \bar{y}_i)^2 \quad (III.1)$$

- Total des sommes des carrés (Total sum of squares)

$$sst = (n-1)^2 y \quad (III.2)$$

- La somme des carrés due à la régression du modèle (Régression sum of squares)

$$ssr = (n-1) \frac{s^2 xy}{s^2 x} \quad (III.3)$$

- La somme des carrés due à Résiduel (Error sum of squares)

$$sse = (n - 1)^2 \quad (III. 4)$$

La valeur F du modèle, qui est de 61,51, indique que le modèle est statistiquement significatif. Il n'y a que 0,01 % de chances qu'une valeur F aussi élevée soit due au bruit.

Les valeurs de p inférieures à 0,05 indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, A, B, C, AB, A², B² et C² sont des termes significatifs du modèle, ce qui signifie qu'ils ont un impact notable sur la réponse ROP.

Le tableau montre le bon ajustement du modèle, ce qui est démontré par la faible valeur de la somme des carrés des résidus (0,081) par rapport à la valeur de la somme des carrés totale du modèle (6,49). Ce résultat est étayé par la valeur élevée de R² (0,9875), ce qui témoigne également de la bonne qualité d'ajustement du modèle.

La valeur élevée de R² explique la forte corrélation entre les données mesurées et les données prédites, c'est-à-dire que moins de 0,02 % de la variation est attribuable à d'autres facteurs non inclus dans le modèle.

Ce coefficient est très important pour rendre compte de la qualité de l'ajustement, car il quantifie le degré de relation linéaire entre les valeurs prédites par le modèle théorique (la droite de régression) et les valeurs observées (mesurées).

R² est un indice qui permet d'évaluer l'adéquation du modèle choisi : plus R² est proche de 1, plus le modèle est bien adapté.

Le coefficient de corrélation multiple R² peut être défini selon la formule :

$$R^2 = r^2 = \frac{(s - xy^2)}{(s - x^2s - y^2)} = \frac{1 - (n - 2s^2)}{(n - 1s - y^2)} = \frac{ssr}{sst} \quad (III. 5)$$

3.1.3 Modélisation mathématique

On commence par choisir, de manière a priori, une fonction mathématique permettant de relier la réponse aux différents facteurs. Pour cela, on utilise un développement limité de la série de Taylor-Maclaurin.

3.1.4 Équation finale en termes de facteurs codés

L'équation exprimée en termes de facteurs codés permet de prédire la réponse pour des niveaux spécifiques de chaque facteur. Par convention, les niveaux élevés des facteurs sont codés par +1 et les niveaux faibles par -1.

Cette formulation codée est particulièrement utile pour évaluer l'influence relative des différents facteurs, en comparant directement les coefficients associés à chacun d'eux.

Les modèles mathématiques codés décrivant l'évolution du taux de pénétration (ROP) sont présentés sous les formes développées suivantes:

$$ROP = 1.21 + 0.4475 * A + 0.36125 * B + 0.58125 * C + 0.23 * AB + 0.03 * AC + 0.0725 * BC + 0.17875 * A^2 + 0.24125 * B^2 + 0.29125 * C^2$$

3.1.5 Équation finale en termes de facteurs réels

L'équation exprimée en termes de facteurs réels permet de prédire la réponse pour des niveaux précis de chaque facteur, exprimés dans leurs unités d'origine. Toutefois, cette équation ne convient pas pour évaluer l'influence relative des facteurs, car les coefficients sont ajustés en fonction des unités propres à chaque facteur, et l'ordonnée à l'origine ne

correspond pas nécessairement au centre de l'espace expérimental. Les modèles mathématiques en variables réelles décrivant l'évolution du taux de pénétration (ROP) sont donnés par les équations développées suivantes.:

$$\text{ROP} = 23.9885 + -0.0630917 * \text{WOB} + -0.254991 * \text{RPM} + -0.0058216 * \text{Rc} + 0.000338235 * \text{WOB} * \text{RPM} + 1.64835e-06 * \text{WOB} * \text{Rc} + 9.37298e-06 * \text{RPM} * \text{Rc} + 0.000111719 * \text{WOB}^2 + 0.000834775 * \text{RPM}^2 + 1.40683e-06 * \text{Rc}^2$$

(III.6)

3.1.6 Configuration des résultats

La figure III.2 représente le modèle qui montre les données expérimentales obtenues. La ligne droite représente le taux de pénétration prévu et les points colorés représentent les valeurs de ROP obtenues à partir de l'expérience.

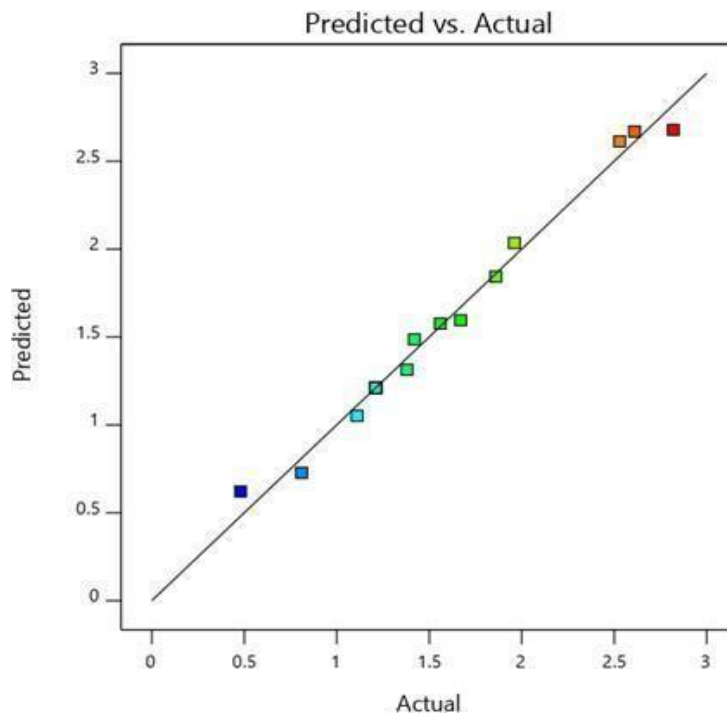


Figure III.2: le modèle qui montre les données expérimentales obtenues

La figure montre que les points représentant les valeurs mesurées coïncident fortement avec la ligne représentant les valeurs prédites, ce qui indique une forte concordance entre les deux réponses en termes de variation des valeurs.

La comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites met en évidence une grande précision de l'ajustement du modèle.

Par conséquent, on peut conclure que le modèle est efficace et approprié pour prédire le comportement du taux de pénétration (ROP)

3.2 Influence des paramètres étudiés sur le ROP

3.2.1 L'effet de WOB sur le ROP

Le graphique montre une relation proportionnelle entre le poids sur l'outil (WOB) et le taux de pénétration (ROP), ce qui signifie que le ROP augmente avec l'augmentation du WOB. La valeur maximale du ROP est atteinte lorsque le WOB est de 160kgf.

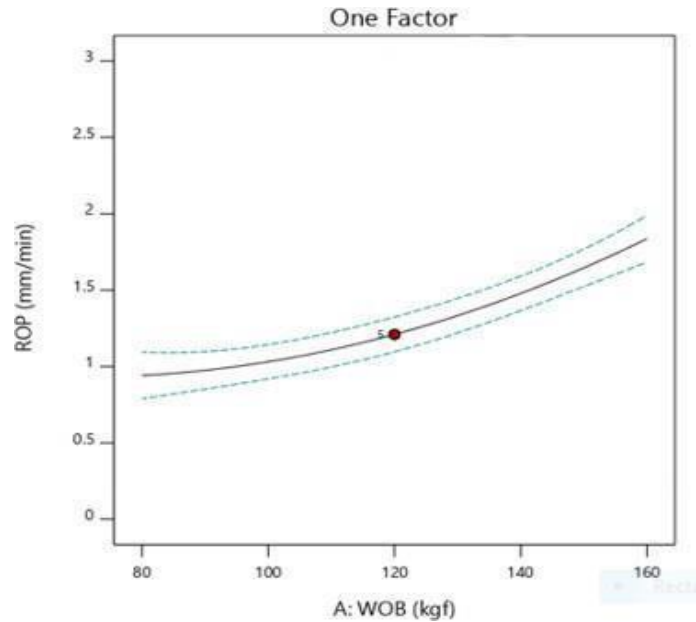


Figure I.3: effet de WOB sur le ROP

3.2.2 L'effet de RPM sur le ROP

La courbe III.4 montre que le taux de pénétration (ROP) augmente progressivement avec l'élévation de la vitesse de rotation (RPM).

En comparaison avec la courbe du poids sur l'outil (WOB), il apparaît que l'influence du RPM sur l'évolution du ROP est moins significative, ce qui indique que le WOB joue un rôle plus important dans l'amélioration des performances.

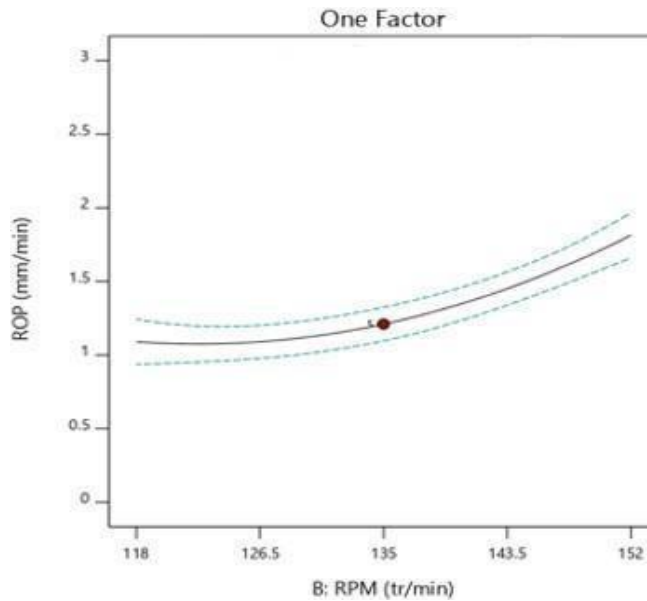


Figure III.4: présente l'effet de RPM sur le ROP

3.2.3 L'effet de RC sur le ROP

La courbe montre une relation inverse entre le taux de pénétration (ROP) et la résistance à la compression (RC).

En d'autres termes, lorsque la valeur de RC augmente, le taux de pénétration diminue. Cela signifie que plus le matériau est résistant à la compression, plus sa pénétration devient difficile.

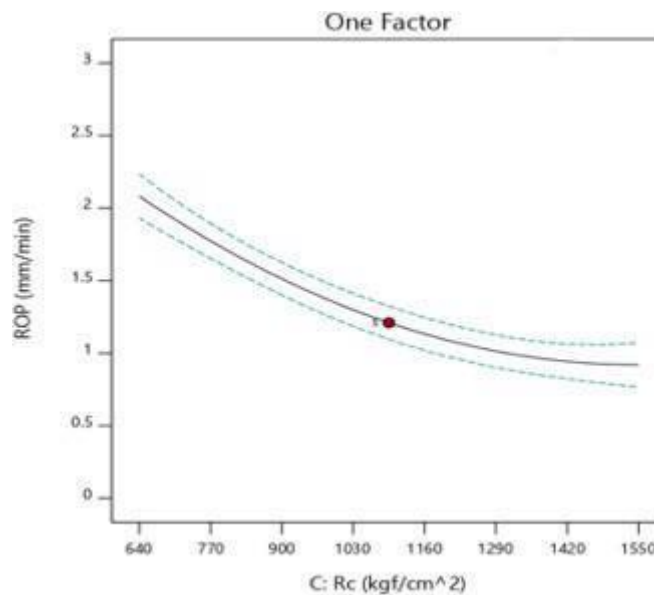


Figure III.5: effet de RC sur le ROP

3.3 Surfaces de réponses:

L'influence des paramètres étudiés sur le taux de pénétration peut être illustrée graphiquement

par la représentation des surfaces de réponse dans un espace à trois dimensions (3D). Ces surfaces permettent de montrer la variation du taux d'avènement en fonction de deux paramètres, tout en maintenant le troisième constant. L'effet des interactions mutuelles des paramètres sur le ROP peut être observé à partir de la nature de la courbure des surfaces de réponse.

Ainsi, dans ce cas, trois facteurs et trois niveaux conduisent à tracer trois surfaces de réponse

- La figure 6 présente la variation de la réponse ROP sous l'effet simultané du poids et de la vitesse de rotation .

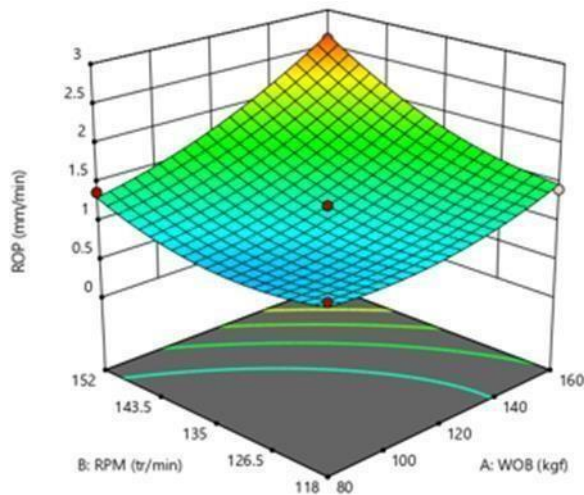


Figure III.6: effet de RPM et WOB sur le ROP

- La figure 7 présente la variation de la réponse ROP sous l'effet simultané du poids et la résistance à la compression

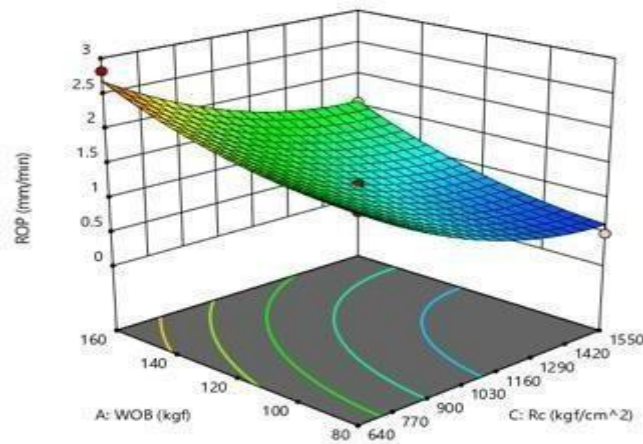


Figure III.7: effet de RC et WOB sur le ROP

Il apparaît que la variation du poids sur le trépan (WOB), dans une plage allant d'environ 80 à 160 kgf, a un effet plus important, se traduisant par une augmentation du taux de pénétration (ROP), comparativement à l'effet de la résistance à la compression (RC), dont la plage varie entre 640 et 1550 kgf/cm².

On remarque également qu'une augmentation de la résistance à la compression entraîne une diminution du taux de pénétration (ROP)

- La figure 8 présente la variation de la réponse ROP sous l'effet simultané résistance à la compression et la vitesse de rotation .et la résistance de compression

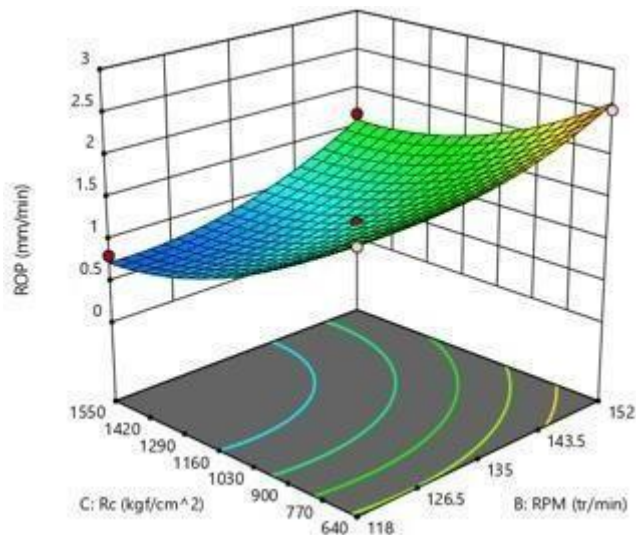


Figure III.8: effet de RC et RPM sur le ROP

Les résultats indiquent que le taux de pénétration (ROP) augmente progressivement avec l'élévation de la vitesse de rotation (RPM) jusqu'à environ 152 tr/min, tandis qu'une augmentation de la résistance à la compression (RC) entraîne une diminution du ROP, ce qui reflète une relation inverse entre RC et ROP

3.4 L'optimisation d'une réponse (ROP)

L'objectif de notre étude est de maximiser le ROP afin qu'il atteigne la valeur maximale accessible. En assurant certaines conditions opératoires, pour la recherche du maximum du ROP en fonction de plusieurs paramètres, il convient de trouver tout point annulant les dérivées partielles.

Si l'on pose le ROP comme réponse prédite (y), et WOB (X1), RPM (X2), et Q (X3) comme facteurs, on obtient le système d'équations suivant

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

(III.7)

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

Tableau (suivant montre les résultats de la résolution des équations par le logiciel Design- Expert 11.

Table III.6: Valeurs optimales des paramètres pour le ROP

WOB	RPM	Rc	ROP
123.679	146.750	1332.362	1.436

3.5 Conclusion

Les analyses des données ont montré que les différents paramètres étudiés ont un impact significatif sur le taux de progression du forage. Il est à noter que le poids sur le trépan (WOB) est le facteur ayant le plus grand impact sur le taux de pénétration (ROP), comparé aux autres facteurs.

L'analyse de la surface de réponse montre qu'il est essentiel de déterminer les valeurs optimales des paramètres étudiés pour améliorer davantage le processus de forage.

L'application de la méthode des surfaces de réponse a permis d'obtenir des informations détaillées sur l'effet de ces paramètres, tout en réduisant au minimum le nombre d'expériences nécessaires.

Conclusion générale

Cette étude vise principalement à améliorer le taux de pénétration (ROP) en réponse aux variations de plusieurs paramètres opérationnels, tels que le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation de l'outil (RPM) et la dureté des roches (RC). Pour atteindre cet objectif, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été adoptée comme outil d'optimisation des performances du processus de forage, en améliorant le taux de pénétration.

Un modèle mathématique a été développé pour décrire le comportement du système de forage, sur la base d'une analyse statistique des données expérimentales. Les résultats de l'étude ont montré que les paramètres étudiés (WOB, RPM, RC) ont un effet significatif sur le taux de pénétration, le poids WOB étant le facteur le plus influent pour maximiser la réponse ROP. Il a également été observé que l'interaction entre certains paramètres, en particulier entre le WOB et le RPM, représente l'impact le plus important sur le taux de pénétration. Les résultats ont indiqué que le meilleur taux de pénétration obtenu est de 1,436 mm/min, pour les valeurs opérationnelles suivantes :

WOB = 123,679 kgf, RPM = 146,750 tr/min, RC = 1332,362 kgf/cm².

L'application de la méthodologie de surface de réponse a prouvé l'efficacité et la précision du modèle développé, en montrant une bonne concordance entre les valeurs prévues et les valeurs expérimentales, ce qui renforce la fiabilité du modèle et sa capacité à prédire précisément le taux de pénétration dans différentes conditions de fonctionnement.

Il convient également de noter qu'il est possible d'envisager, dans de futures études, l'intégration d'autres paramètres, tels que le débit de la boue ou la géométrie des outils de forage, afin d'obtenir des résultats encore plus précis et une compréhension plus approfondie du comportement du taux de pénétration.

[1] Farag ABDULGALIL «COMMANDE NON LINÉAIRE DANS LES SYSTEMES DE FORAGE PETROLIER: CONTRIBUTION A LA SUPPRESSION DU PHENOMENE DE « STICK-SLIP » Le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES DE L'UNIVERSITE PARIS XI ORSAY

[2] Ouellabi-Mosbah-Lia, « Appareil De Forage, Etude Et Dimensionnement -champ Oued Mya Ghardaïa- puit MJR1», Mémoire fin d'étude master, Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.

[3] L'INFORMATION BREVET AU SERVICE DE L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE : CAS DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION DES TRÉPANS PAR INGÉNIERIE INVERSEE Abdelkader BAAZIZIRSIC Laboratory, Aix-Marseille Université, Marseille, France 2014

[4] CHEFFAH-SALIM. «Amélioration des paramètres mécaniques du forage horizontal» Mémoire fin d'étude master . DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA. 2016.

[5] BOUZERARA Ilyas+BELKHIR Houssam+DERRADJI Ayoub «Les problèmes de forage – causes et solutions» Mémoire fin d'étude master. Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2024

[6] Saad BELGANA «Étude et conception d'un système de production d'énergie» MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2017

[7] SAHLI. Nour El Houda_TOUNSI. Sihem.. «Méthodologie pour l'optimisation des pertes de charge dans les forages horizontaux». Mémoire fin d'étude master Département d'Hydraulique Ecole Nationale Polytechnique 2021

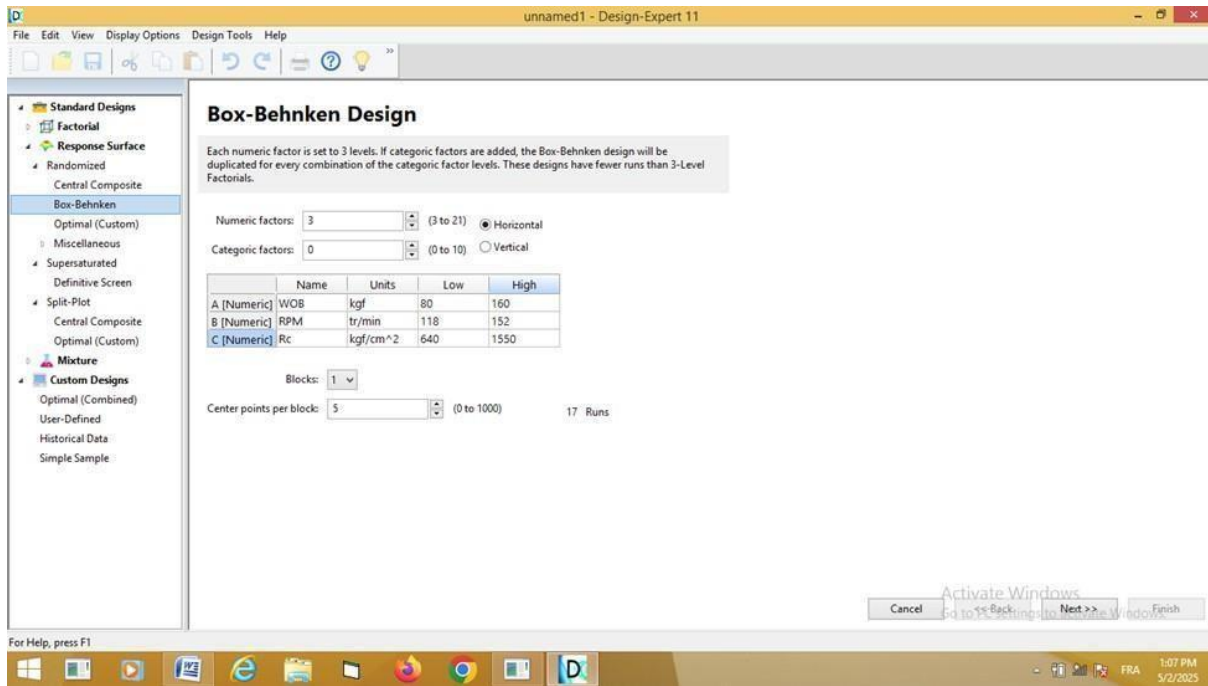
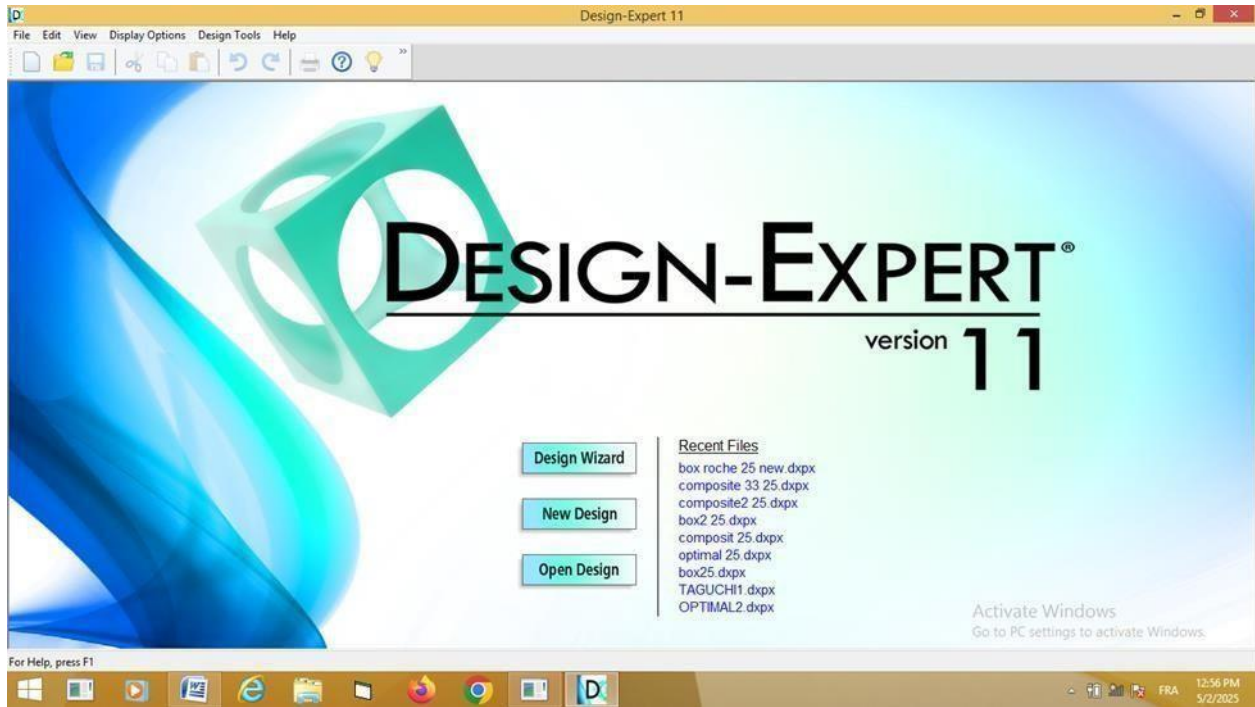
[8] DOGHMANE ILYES. «ETUDE ET AMELIORATION DE LA STRATEGIE DE LA COMMANDE D'UN TOP DRIVE MODELE CANRIG 1050 E500 AU NIVEAU DE ENTP». Mémoire de Master Département En Génie Mécanique Option : Mécatronique UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

[9] BOUCENNA Abdelhak HAOUSSAOUI Nouredine «Application de la méthodologie des plans d'expérience à l'optimisation des processus de forage» Mémoire de Master Département De Génie Mécanique Spécialité : maintenance industrielle UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2021

[10] SSA Boubaker LAHLALI Mohammed Amine «Optimisation des Paramètres Mécanique des Machines de Forage Pétrolier». Mémoire de Master Département Génie Mécanique UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA 2018

-
- [11] Moussamri, Hanafi Chetouani, Fodil. «ANALYSE DE PROCESSUS DE FABRICATION». Mémoire fin d'étude master Département de génie mécanique UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU 2018
- [12] NGUYEN, J. *Technique d'exploitation pétrolière : Le forage*. Editions Technip. Paris : Rueil-Malmaison, 1993, 378 p. ISBN 2-7108-0631-2.
- [13] Jacques GOUPY, Tutoriel, LES PLANS D'EXPERIENCES, Revue MODULAD, 2006
- [14] LINDER R., Les plans d'expériences un outil indispensable à l'expérimentateur. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris 2005
- [15] ABDOULAYE, (A. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier), Thèse de doctorat, Paris Tech-Institut de sciences et technologies, 2010.
- [16] Mémoire : appareil de forage, étude et dimensionnement, cas : champs Hassi Messaoud. Université KasdiMerbah –Ouargla – Année 2012/2013.
- [17] M. DADDOU. ‘Les caractéristiques physique de la boue de forage ‘, SONATRACH Division forage, formation superviseur, édition juin 2009, 47p.
- [18]. Rguig, M., Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plateformes pétrolières offshore fissurées, 2005.
- [19]. BILLEL, A., La modélisation et l'analyse statistique des données expérimentales, in Génie Mécanique 2016/2017, BADJ MOKHTAR - ANNABA. p. 66.

ANNEXE



Std	Run	Factor 1 A:WOB kgf	Factor 2 B:RPM tr/min	Factor 3 C:Rc kgf/cm ²	Response 1 ROP mm/min
7	1	80	135	1550	0.48
8	2	160	135	1550	1.56
12	3	120	152	1550	1.67
14	4	120	135	1095	1.21
15	5	120	135	1095	1.21
17	6	120	135	1095	1.21
5	7	80	135	640	1.88
11	8	120	118	1550	0.81
2	9	160	118	1095	1.42
13	10	120	135	1095	1.21
16	11	120	135	1095	1.21
4	12	160	152	1095	2.61
10	13	120	152	640	2.53
6	14	160	135	640	2.82
3	15	80	152	1095	1.38
9	16	120	118	640	1.96
1	17	80	118	1095	1.11

Build Information

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

Factors

factor	Name	Units	Type	Minimum	Maximum	Code Low	Code high	Meau	Std dev
A	WOB	kgf	Numeric	80.00	160.00	-1 ↔ 80.00	+1 ↔ 160.00	120.00	28.28
B	RPM	tr/min	Numeric	118.00	152.00	-1 ↔ 118.0 0	+1 ↔ 152.00	135.00	12.02
C	Rc	kgf/cm ²	Numeric	640.00	1550.00	-1 ↔ 640.0 0	+1 ↔ 1550.0 0	1095.0 0	321.7 3

