

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DU 20 AOÛT 1955 SKIKDA
Faculté de Technologie
Département De Génie Mécanique



D012119017D

Thèse préparée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat

THEME



**SYSTÈME D'OPTIMISATION DES PARAMÈTRES
GÉOMÉTRIQUE DE L'OUTIL DE FORAGE**



Spécialité : ÉLECTROMÉCANIQUE

Présenté par

Mr. KHENTOUT Abdelkader

Directeur de thèse

KHOUNFAIS Kamel

Soutenu le : 10 / 12 / 2019 devant le jury

Président : BOUZAOUIT Azzedine Professeur Université de SKIKDA

Examineurs :

BENRETEM Abdelouahab Professeur Université de ANNABA

HACHANA Oussama MCA Université de OUARGLA

KHERIEF NACEREDDINE Mohamed MCA ENSET SKIKDA

Remerciements

A Mon Enseignant Mr ‘KHOCHAMAN Lakhdar que Dieu ait pitié de lui J’ai eu l’honneur d’être parmi vos élèves et de bénéficier de votre riche enseignement. Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour moi un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscité mon admiration. Veuillez bien monsieur recevoir mes remerciements pour le grand honneur que vous m’avez fait d’accepter l’encadrement de ce travail.

A Mon Encadreur Mr KHENFAIASSE Kamel Votre compétence, votre encadrement a toujours suscité mon profond respect. Je vous remercie pour votre accueil et vos conseils. Veuillez trouver ici, l’expression de mes gratitude et de ma grande estime. Mes profondes gratitude s’orientent vers KEZZAR Mohamed pour ses judicieux conseils et son support permanent, ainsi que tout le personnel du département Gene mécanique et université de Skikda en générale. Et aussi tout le personnel du département forage - faculté hydrocarbures et université de Ouargla en générale.

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

*Nos mères, sources de tendresse et d'amours pour leurs soutiens tout le long
de notre vie scolaire.*

*Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour
nous aider (Surtout mon père, que Dieu ait pitié de lui).*

Nos frères et nos sœurs, que nous aimons beaucoup.

Notre grande famille.

Nos cher ami (e) s, et enseignants.

*Tout qu'ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail (Rym
Khettabi, Mr. R. Khettabi, I. Tabet, Y. Boudjaada, F. Boudekhana, k.
Kerboua, A.Taabouche, L. Bendaoud, M. Badereddine).*

Que dieu leur accorde santé et prospérité

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclatures	

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 Généralités sur le forage pétrolier

1.1. Introduction	5
1.2. Description d'un processus de forage	5
1.2.1. Installation de forage	7
1.2.2. Garniture de forage.....	9
1.2.3. Trépans (L'outil de forage).....	10
1.3. Progression du forage	11
1.4. Paramètres de Forage	12
1.4.1. Paramètres mécaniques	12
1.4.2. Paramètres hydrauliques.....	15
1.5 . Mesures pendant le forage.....	18
1.6 . Choix de l'outil.....	19
1.6.1 Trépans tricônes (les outils à molettes)	20
1.6.2. Les outils à éléments de coupe fixes (les outils au diamant).....	27
1.6.2.1. Outils diamant nature.....	28
1.6.2.2. Outils PDC	29
1.6.2.3. Outils thermiquement stable (TSP)	36
1.6.2.4. Les outils hybrides	36
1.7. Classifications IADC.....	43
1.8. OUTILS SPECIAUX	44
1.9. Les influences sur le ROP	44
1.9.1. Impact de paramètre mécanique sur le ROP	44
1.9.2. L'influence de paramètre hydraulique sur le ROP.....	45
1.9.2.1. Effet du nettoyage du front de taille sur le ROP	45
1.9.2.2. Effet des caractéristiques de la boue sur le ROP	45
1.10. Conclusion.....	46

Chapitre 2 Optimisation des paramètres opérationnels selon la méthode de MSE et se Taguchi

2.1. Introduction	47
2.2. Etude bibliographique des modèles d'optimisation	47
2.3. L'optimisation de la vitesse d'avancement (ROP).....	58
2.3.1. Optimisation par l'énergie mécanique Spécifique E_s (MSE)	58

2.3.1.1. Contexte et objectifs de l'énergie mécanique Spécifique	58
2.3.1.2. Définition de L'énergie mécanique Spécifique E_s	59
2.3.1.3. Principe de la théorie de l'énergie spécifique E_s	60
2.3.1.4. Coefficient de frottement « Coefficient of Sliding Friction »	60
2.3.1.5. Efficacité mécanique EFFM.....	60
2.3.2. L'optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil PDC par l'utilisation du modèle d'Eckel	61
2.3.2.1. Calcul des coefficients a, b, c à l'aide de la méthode des moindres carrées	62
2.3.2.2. Le modèle d'usure d'un outil PDC	63
2.3.2.3. L'optimisation en temps réel.....	64
2.3.3. Optimisation du ROP par la procédure drill-off.....	65
2.3.4. Méthode d'Arthur Lubinski	65
2.3.5. Méthode d'I.G. Falconer	66
2.4. Autres méthodes mathématiques d'Optimisation (<i>optimisation par Plan d'Expériences</i>).....	66
2.4.1. Principaux avantages des plans d'expériences.....	66
2.4.2. Les plans de Taguchi.....	67
2.4.3. Autres plans.....	72
2.4.4. Analyse de variance	73
2.4.5. Logiciels des plans d'expériences	74
2. 5. Conclusion.....	75

Chapitre 3

Application de la théorie de l'énergie spécifique mécanique, étude de cas

3.1. Introduction	76
3.2. Objectifs du puits	76
3.3. Situation géographique.....	76
3.4. Description du puits	78
3.5. Programme de la boue.....	79
3.6. Contexte géologique.....	81
3.6.1. Aspect stratigraphique.....	81
3.6.1.1. Paléozoïque	81
3.6.1.2. Mésozoïque	82
3.6.2. Litho-stratigraphique cambrienne (caractérisation du réservoir	84
3.7. Application de la théorie MSE dans le cas de terrain.....	85
3.7.1. L'analyse des données	86
3.7.2. Résultat et discussion	87
3.7.2.1. La POR modélisée.....	89
3.7.2.2. Effet de WOB et RPM sur la ROP optimale.....	89
3.7.2.3. Analyse des valeurs optimales WOB et RPM.....	90
3.8. Résolution de problèmes	92
3.9. Conclusion.....	93

Chapitre 4.

Etude expérimentale du comportement dynamique des outils PDC

4.1. Introduction	94
4.2. Présentation des essais de formabilité sur banc de forage (Plate-forme de forage	94
4.2.1. Plate-forme de forage expérimentale	94
4.2.2. Roches utilisées	96
4.3. Résultats expérimentaux	97
4.3.1. Effet de la vitesse de pénétration de l'outil sur le taux de pénétration	98
4.3.2. Effet du paramètre WOB sur le taux de pénétration	99
4.3.3. Effet de la nature de la roche sur le taux de pénétration	100
4.3.4. Impact de l'angle de coupe sur le taux de pénétration	101
4.4. Conclusion	102

Chapitre 5.

Optimisation par la méthode de Taguchi pour des roches homogènes

5.1. Introduction	103
5.2. La Méthode de Taguchi et les techniques de conception	103
5.3. Conception de l'expérience et ses étapes	104
5.4. Interprétation des résultats obtenus	106
5.4.1. Analyse du rapport (S / N)	106
5.4.2. Analyses Statistiques (ANOVA-PARETO)	108
5.4.3. Développement du modèle mathématique	109
5.4.4. Validation de l'expérience	114
5.5. Conclusion	114

Chapitre 6.

Optimisation par la méthode de Taguchi pour chaque roche utilisée

6.1. Introduction	115
6.2. Analysé et Optimisé pour Chaque Rocher	115
6.2.1. Application de la méthode de TAGUCHI	115
6.2.2. Analyse de Taguchi: POR contre B; WOB; RPM	117
6.2.3. Interprétation des résultats obtenus	117
6.2.4. Analyse de régression: ROP contre B; WOB; RPM	121
6.3. Influence des autre Paramètres Géométrie du Taillant	125
6.3.1. Influence de la forme et la section de coupe	125
6.3.2. Influence de la largeur du taillant	127
6.4. Autres impacts sur le taux d'avancement	128
6.5. Conclusion	129
Conclusion générale	130
Références	
Annexes	

Liste des figures

Figure 1.1: Installation offshore	5
Figure 1.2: Installation onshore.....	5
Figure 1.3 : L'opération de forage et ses paramètres	6
Figure 1.4 : Processus de forage.....	7
Figure 1.5 : Pompe à cavité progressive	8
Figure 1.6 : Moteur embarqué dans une garniture de forage	8
Figure 1.7 : La garniture de forage.....	9
Figure 1.8: Les types d'outils en forage pétrolier	11
Figure 1.9: Formation non consolidée.	13
Figure 1.10 : Formation fracturée.	13
Figure 1.11: Formation abrasive.	13
Figure 1.12 : Influence de la pression différentielle au front de taille sur la vitesse d'avancement	17
Figure 1.13 : Influence de la viscosité du fluide sur la vitesse d'avancement.	18
Figure 1.14: Nomenclature des tricônes	21
Figure 1.15 : Représentation de l'Offset.	22
Figure 1.16 : Fracturation de la roche.	22
Figure 1.17: schéma d'une molette d'un outil.....	23
Figure 1.18: Vue de dessus des molettes d'un outil.....	23
Figure 1.19 : Coupe verticale d'un trou foré par un tricône de nuance tendre	23
Figure 1.20: Outils à denture fraisée	25
Figure 1.21 : Caractéristiques. Outils 7/8 acier et carbures.....	26
Figure 1.22 : Outils au carbure.....	26
Figure 1.23 : taillants des outils intégraux	27
Figure 1.24: Trépans à diamants	29
Figure 1.25: Outil PDC	30
Figure 1.26 : exemple d'un outil PDC	30
Figure 1.27 : Structure d'un PDC.....	32
Figure 1.28: Corps en acier.	33
Figure 1.29 : Corps à matrice.	34
Figure 1.30 : Mode de travail d'un outil PDC.....	35
Figure 1.31 : Outils TPS.....	36
Figure 1.32: Outils hybrides.....	37
Figure 1.33 : Conception des Outils hybrides.	37
Figure 1.34 : Effet de la vibration latérale.....	39
Figure 1.35 : Essais comparatifs sur les PDC.	39
Figure 1.36 : Limitation de la vibration axiale.....	40
Figure 1.37 : Concept du partage de la charge de travail par les taillants.....	41
Figure 2.1 : Le founder point.	58
Figure 2.2 : drill-off test	59
Figure 2.3 : Relation entre E_s et le ROP	60
Figure 2.4 : Graphes linéaires de Taguchi.....	69
Figure 2.5 : Triangle des interactions du plan L8.	70
Figure 3.1: Carte de localisation du champ Hassi Messaoud.....	77
Figure 3.2: Situation du puits OMM-302 Bis dans la zone (1A).	78
Figure 3.3: Structure du champ de Hassi Messaoud présentée comme un vaste dôme anticlinal plat avec une direction générale nord-est - sud-ouest	85
Figure 3.4: corrélation entre ROP, RPM, WOB	87

Figure 3.5: ROPop vs ROPmesure.....	89
Figure 3.6: ROPop vs WOBop.....	90
Figure 3.7: ROPop vs RPMOP	90
Figure 3.8: Comparaison du régime optimal.....	91
Figure 3.9: Comparaison de WOB optimale.....	91
Figure 3.10: Effet du couple de rotation	92
Figure 4.1 : Plate-forme de forage.	96
Figure 4.2 : essais de forage.	96
Figure 4.3 : La roche A est extraite d'une mine de calcaire de l'unité ENOF El Ghedir . Skikda.....	97
Figure 4.4 : La roche B est extraite d'une carrière de Hadjar Soud . Skikda	97
Figure 4.5 : La roche C est extraite d'une la carrière de Fel fla . Skikda.....	97
Figure 4.6: Effet du paramètre de vitesse de l'outil de pénétration sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.	98
Figure 4.7: Effet du poids sur le bit sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.	99
Figure 4.8 : Effet de la nature de la roche sur le taux de pénétration des autres paramètres.	100
Figure 4.9: Impact de l'angle de coupe sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.	101
Figure 5.1:Description du système étudié dans la méthode de Taguchi.	103
Figure 5.2:effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration (ROP).	106
Figure 5.3: Principaux effets sur le taux de pénétration (ROP).	107
Figure 5.4: diagramme d'interaction pour ROP avec tous les facteurs	108
Figure 5.5: Valeurs expérimentales et valeurs prédites du taux de pénétration.	112
Figure 5.6: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (ROP).	113
Figure 6.1: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche A).....	118
Figure 6.2: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche A).	118
Figure 6.3: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche B).....	119
Figure 6.4: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche B).....	119
Figure 6.5: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche C).....	120
Figure 6.6: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche C).....	120
Figure 6.7: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche A)	123
Figure 6.8: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche B)	124
Figure 6.9: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche C)	124
Figure 6.10 : Construction d'un cutter PDC	126
Figure 6.11 : Relation d'angle de coupe β 1 avec surface de frottement S 1	126
Figure 6.12 : Relation d'angle de coupe β 2 avec surface de frottement S 2	126
Figure 6.13 : Relation d'angle de coupe β 3 avec surface de frottement S 3	127
Figure 6.14 : distribution des pastilles autour du chemin de forage	128

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Relation entre les débits utilise et les vitesses	16
Tableau 1.2 : le dusage qui pour un débit moyen, pour chaque diamètre de forage	16
Tableau 2.1 - le tableau orthogonal L8.....	69
Tableau 2.2 - Classement des tables standard de TAGUCHI	71
Tableau 2.3 : Analyse de variance	73
Tableau 2.4 - Principaux logiciels de plans d'expériences	74
Tableau 3.1: description du puits	78
Tableau 3.2: Propriétés de la boue	80
Tableau 3.3: les données de forage ont été sauvegardées au cours du processus	86
Tableau 3.4: Variables nécessaires pour le modèle.....	87
Tableau 3.5: paramètres initiaux du premier compteur.....	88
Tableau 3.6: Résultat d'optimisation des paramètres	88
Tableau 4.1- Propriétés de la foreuse	96
Tableau 4.2-Résistance à la compression des roches	97
Tableau 5.1-Facteurs et niveaux sélectionnés	105
Tableau 5.2- le tableau orthogonal L27 Taguchi	105
Tableau 5.3- Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit	106
Tableau 5.4 - les paramètres optimaux de l'outil	107
Tableau 5.5 - Analyse de la variance (ANOVA-Pareto) du forage.....	109
Tableau 5.6 - Résultats de l'ANOVA pour le taux de pénétration (ROP	110
Tableau 5.7 - Résumé du modèle	111
Tableau 5.8 - Statistiques de la régression	114
Tableau 5.9- différence d'erreur entre les réponses prédites et expérimentales	114
Tableau 6.1 - Facteurs et niveaux sélectionnés	115
Tableau 6.2 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche A ($C_s=1550 \text{ kg/cm}^2$	116
Tableau 6.3 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche B ($C_s=750 \text{ kg/cm}^2$	116
Tableau 6.4 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche C ($C_s=750 \text{ kg/cm}^2$	116
Tableau 6.5- Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche A	117
Tableau 6.6- Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche B	117
Tableau 6.7- Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche C	117
Tableau 6.8 - les paramètres optimaux de l'outil	121
Tableau 6.9 - Résultats de l'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE A	122
Tableau 6.10 - Résultats de l'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE B.....	122
Tableau 6.11 - Résultats de l'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE C.....	122
Tableau 6.12 - Résumé du modèle	123
Tableau 6.13 – la relation Entre angle de coupe β et ROP	127
Tableau 6.14 – la relation Entre diamètre de coupeur et ROP	128
Tableau 6.15 – la relation entre densité de coupeur et ROP	128

Nomenclatures

ΔP : la différence entre les pressions fond de puits et formation (kg/cm^2).

V : la vitesse d'avancement (m/s).

V_0 : vitesse que l'on aurait avec un ΔP nul (m/s).

PDC : Polycristalline Diamond Compact.

TSP : diamants polycristallins thermostables.

E_s : l'énergie spécifique (psi).

$E_{s \text{ min}}$: la dureté de la roche (l'énergie spécifique minimum).

a, b, c : des constantes.

μ : Le coefficient de glissement.

ROP : La vitesse d'avancement de l'outil de forage mesuré (m/hr).

ROP_{opt} : La vitesse d'avancement de l'outil de forage optimale (m/hr).

WOB : Le poids sur l'outil mesuré (tonne).

RPM: La vitesse de rotation mesurée << Rotation Par Minute >> (tr/min).

β : l'angle de coupe ($^\circ$).

D_b : Le diamètre de l'outil (in).

AB : La section de puits « l'outil » (in^2).

N : vitesse de rotation (tr/min).

TOR : le torque de l'outil (lbs.ft).

EFFm: l'efficacité mécanique maximum.

CS_i : la résistance de la roche à la compression dans le mètre i .

CCS : Pression de confinement (Confined Compressive Strength) en psi.

W_f : la hauteur des dents finale en fraction.

W_{f0} : la hauteur des dents initiale en fraction.

W_{ci} : Coefficient d'usure dans le mètre i .

A_{abri} : Le coefficient d'abrasivité de la roche dans le mètre i .

H : La profondeur du forage.

H_0 : La profondeur initiale de la descente de l'outil.

C : coefficient de proportionnalité.

W_{ff} : L'usure finale de l'outil en fraction.

\hat{a} : est la variable centrée réduite.

\dot{A} : est la variable courante.

\bar{A} : est la valeur moyenne des variables courantes.

Y_i : la réponse de l'essai.

E_i : L'effet du facteur.

\hat{Y} : la réponse estimée par le modèle.

\bar{V} : le vecteur contenant les effets.

ddl: le degré de liberté.

L27 : une matrice orthogonale de Taguchi.

S / N : rapport signal / bruit.

L : la profondeur de l'anneau gravé (m).

t_d : le temps de pénétration (s).

T : temps d'enregistrement (s).

FORS : dureté apparente de la formation.

pas: la variation entre la position moyenne de la variable.

SC_i : la somme des carrés des différences pour chaque facteur.

C % : le rapport de contribution pour chacun des facteurs.

SCT : l'ensemble des sommes SC_i .

x_{iu} et x_{ju} : les paramètres d'entrée (facteurs).

b_0 : la constante de l'équation de régression.

b_i : les coefficients linéaires.

b_{ii} : les coefficients quadratiques.

b_{ij} : les coefficients d'interaction.

ε : l'erreur de montage.

α : la variance est analysée pour le niveau de signification $\alpha = 5\%$.

Adj SS : Sommes ajustées des carrés.

Seq SS : Séquences séquentielles des carrés.

SS : La somme des carrés.

\bar{y} : la moyenne de la réponse.

\bar{y}_i : la moyenne de la réponse observée pendant l'expérience.

MS_i : les moyennes des carrés.

Adj MS_i : ajustées les moyennes des carrés.

MS_e : le carré moyen d'erreur.

F-Value: test statistique dans lequel la statistique de test suit la loi de Fisher

P-Value: la probabilité pour un modèle statistique.

R-sq : coefficient de détermination.

R-sq(adj): les pics R-carrés ajustés.

S : représente l'écart type de la distance entre les valeurs de données et les valeurs ajustées.

PRESS: La somme d'erreur de prédiction de carrés.

R-sq(pred): la valeur de R2 prédite.

F : force de pénétration.

F_C^{moy} : l'effort moyen atteint au moment de la rupture du copeau.

F_C^{max} : le maximum d'effort atteint au moment de la rupture du copeau.

Introduction

générale

Introduction

On appelle forage l'ensemble des opérations consistant à réaliser un trou. L'utilisation principale des forages est la reconnaissance et l'exploitation des gisements de pétrole ou de gaz naturel. Les autres utilisations, qui sont nombreuses, comprennent notamment ; les forages géologiques ou géophysiques pour la reconnaissance des gisements de minerais, les forages destinés à la recherche des nappes d'eau profondes, au drainage du gaz ou de l'eau dans les exploitations minières. Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, les forages permettent l'injection de mortier de ciment en vue de la consolidation des piles, des appuis de ponts, des digues, etc., ainsi que la consolidation des massifs rocheux avant leur excavation, la reconnaissance du sous-sol par prélèvement d'échantillons (carottage) ce qui permet de déterminer les propriétés des différentes couches de terrain.

Le but d'un forage est la réalisation d'un trou, dans les meilleures conditions techniques et de sécurité à prix minimal. Lorsque la décision de faire un forage est prise, elle implique deux choix :

1. Le choix d'un programme de forage et de reconnaissances des couches, c'est-à-dire les diamètres de forage et de tubage que l'on estime nécessaire pour atteindre l'objectif et les opérations, logs électriques, carottage, tests, nécessaires à la bonne reconnaissance des formations.
2. Le choix de l'appareil de forage permettant d'atteindre cet objectif avec des conditions de sécurité satisfaisantes.

Le premier choix conditionne directement ou indirectement environ du prix du forage. En effet, si l'on examine la répartition du coût terrestre, on a :

1. Emplacement (génie civil, terrain ...etc.)
2. Coûts fixe (déménagement, tubage, compagnies de services pour tubage, cimentation, diagraphies électriques...etc.
3. Coûts proportionnels au temps
4. Complétion

En peut estimer en première approximation que les postes 1, 2 et 3 de cette répartition du coût d'un forage sont directement fonction du programme de forage choisi comme :

Le prix des tubages et le temps nécessaire à leur descente, le prix des compagnies de services pour les cimentations, les tests et l'enregistrement des diagraphies électriques, le

mode de complétion des puits. Ces coûts sont pratiquement incompressibles et indépendant du prix de la machines, du moins au niveau du chantier.

Le deuxième choix, celui l'appareil de forage, définit le prix journalier du forage sont fonction du temps mis pour atteindre l'objectif, ils sont fonction des techniques de forage utilisées. Si l'on examine maintenant la répartition du temps d'un forage terrestre (hors déménagement) on a :

- Forage + manœuvre
- Tubages et attentes
- Instrumentations, reconnaissance des couches et devers

La plus grande partie de ces coûts proportionnels au temps est liée aux forages et manœuvres.

Les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'approfondissement d'un forage sont appelés « les paramètres de forage ».

Le choix des paramètres de forage pris arbitrairement, ou plus simplement non précis, entraîne une augmentation du coût de forage, qui, en absolu, représente un prix important. Dans ce contexte et en raison des coûts très élevés du forage, le recours aux techniques d'optimisation devient essentiel, mais il est nécessaire de réaliser une étape intermédiaire, qui consiste à modéliser, ce qui permet en second lieu de simuler le processus d'avancement d'un outil de forage et les coefficients définissant la nature de la formation traversée. Si cette identification correspond à une image relativement exacte du processus réel, on peut alors étudier théoriquement les paramètres les mieux adaptés à la conduite de forage.

Quel sont les paramètres de forage ? Ils sont très nombreux puisque se sont tous les facteurs qui influent sur la vitesse d'avancement du forage. Citons en quelque uns :

- La nature de la roche, sa formabilité, sa tendance à dévier, son abrasivité.
- Le type d'outil utilisé pour détruire ces roches.
- Le poids et vitesse de rotation de l'outil.
- Les caractéristiques du fluide du forage utilisé pour nettoyer le front de taille, etc.

En fait, on a coutume d'appeler les paramètres de forage les facteurs dont on est maitre en permanence. On peut les regrouper en deux catégories :

- Les paramètres mécaniques : le type de l'outil, le poids sur l'outil et la vitesse de rotation
- Les paramètres hydrauliques : la nature du fluide de forage, et l'énergie hydraulique au niveau de l'outil.

L'objectif principale de ce travail est l'optimisation des paramètres de forage, en se basant sur les différentes études, et les lois empiriques dans le domaine de forage pétrolier ; pour décrypter comment ces divers paramètres influencent les travaux d'approfondissement, donc les différents facteurs qui influent sur la vitesse d'avancement d'un outil de forage, et qu'elles sont leurs influences les uns envers les autres. À cet objectif principal se greffent les sous objectifs suivant :

- Développer un modèle d'optimisation par des formules théoriques et empiriques, adoptées au forage pétrolier.
- Simuler et traiter les données d'un forage.
- Tirer une conjoncture et d'anticiper les défauts et pallier les insuffisances afin de faire un gain optimal en terme du temps, cout et sécurité.

On rappelle brièvement ce qu'on a fait dans cette thèse, le travail est divisé en six chapitres :

Le premier chapitre est partie des généralités et de la bibliographie des machines de forage pétrolier. On a évoqué les composants de la machine de forage. On a davantage concentré sur l'outil de forage car il est l'axe de la recherche et constitue l'élément principal de la machine de forage.

Le deuxième chapitre était consacré aux méthodes et aux modèles d'amélioration en général et en particulier modèle de Taguchi. On a donc déterminé les modèles dans le domaine du forage pétrolier. Ces modèles exploitent les paramètres cités précédemment. Le modèle de Taguchi a été particulièrement ciblé, il est modèle le plus utilisé en laboratoire que les autres. En troisième chapitre, des modèles mathématiques classiques ont été mise en point pour faire appliquer sur une partie véritable d'un puits de pétrole.

Le quatrième chapitre, consacre à une description détaillée de l'appareil d'essai, qui est spécialement conçu pour fournir les paramètres requis, notamment l'impact l'angle de coupe sur du taux de pénétration avec la variation de certains autres paramètres conformes à l'exigence de recherche.

En le cinquième chapitre, on a appliqué le modèle de Taguchi aux données obtenus des expériences, pour faire optimiser les paramètres selon un modèle mathématique approprié

avec une analyse statistique pour valider le modèle utilisé et confirmer les résultats d'optimisation.

En dernier chapitre on a analysé et optimisé les résultats obtenus de la méthode de taguchi pour chaque roche, on a étudié aussi l'impact des autres paramètres sur le taux de pénétration.

Chapitre 1

Généralités sur le forage pétrolier

Chapitre 1.

1.1 Introduction

Un processus de forage est un dispositif qui assure l'extraction de la matière pour réaliser un puits. Cette tâche se déroule via la contribution de plusieurs organes qui se composent de deux groupes : l'installation de forage (plate-forme) située à la surface et la garniture qui opère dans le puits. Ce chapitre présente les composantes intrinsèques à l'installation et à la garniture de forage, leurs interactions et leurs variables.

Aujourd'hui le forage, est devenu une activité très technique. La tendance actuelle est au développement des méthodes ou de moyens d'aide pour assister le foreur dans le choix des différents paramètres du forage pour aller vite et diminuer le prix de revient du mètre foré.

1.2 Description d'un processus de forage

L'exploration pétrolière, que ce soit en mer (offshore) ou sur terre (onshore), nécessite un processus de forage pour extraire la matière et parvenir aux réservoirs d'hydrocarbures. (figure 1.1, 1.2).



Figure 1.1: *Installation offshore*

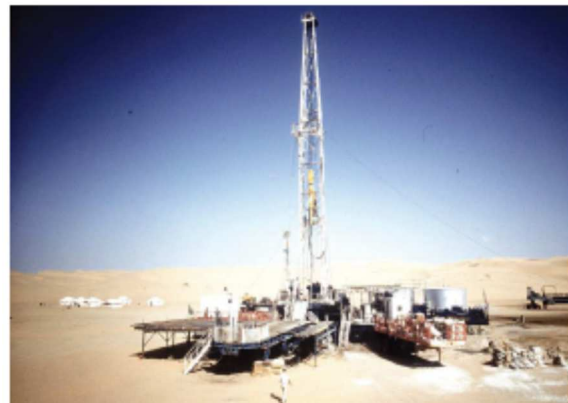


Figure 1.2: *Installation onshore*

La production des hydrocarbures passe par le fonctionnement d'un processus de forage dont le plus répandu dans l'industrie pétrolière se nomme : *système de forage rotary* (figure 1.4).

L'opération de forage s'effectue par un outil animé d'un mouvement de rotation. L'outil (ou trépan) est fixé à l'extrémité inférieure d'une colonne de tiges cylindriques vissées les unes au bout des autres. Au fur et à mesure que le trépan entame la roche au fond du trou, on laisse

descendre le train de tiges en agissant sur le frein du tambour du treuil. Un appareil enregistre en permanence la tension s'exerçant sur le câble, ce qui permet, connaissant le poids des tiges, de régler à chaque instant le poids appliqué sur l'outil. (Figure 1.3).

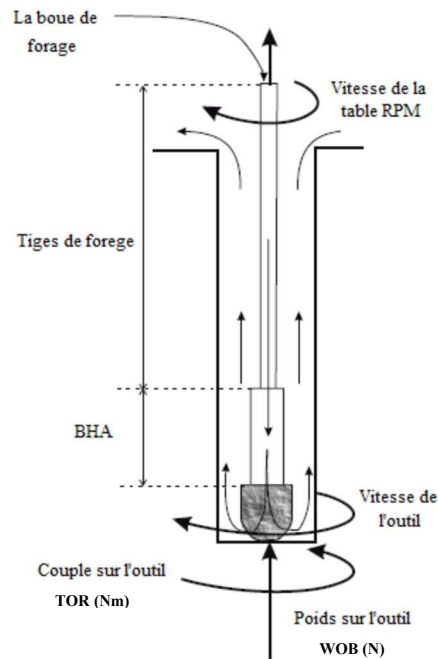


Figure 1.3 : *L'opération de forage et ses paramètres.*

Son fonctionnement dépend de plusieurs organes regroupés en deux sous-ensembles [1]: l'installation et la garniture de forage. L'installation de forage se situe à la surface et sert de support aux instruments nécessaires au pilotage de la garniture. La garniture représente la partie opérative dans le puits. L'application d'une force verticale, sur le trépan, orientée dans la direction du forage est nécessaire pour le déroulement des opérations. Cette action s'effectue parallèlement à la rotation du trépan dont les taillants désagrègent la roche.

La progression du forage requiert la circulation continue et en boucle fermée d'un fluide dont l'un des objectifs consiste à évacuer les déblais générés vers la surface. La nécessité de rechercher des gisements d'hydrocarbures dans des milieux de plus en plus profonds conduit à forer des puits qui s'étalent sur plusieurs kilomètres. Cela rend graduel le forage durant lequel plusieurs phases, séparées par la remontée à la surface de la garniture, sont nécessaires. Ces étapes ont pour but de favoriser la maintenance du processus et d'effectuer le tubage et la cimentation de la partie forée. Lorsque les poches contenant les hydrocarbures sont atteintes, les oléoducs ou les gazoducs sont installés afin d'acheminer le pétrole vers la surface. La figure 1.4 présente les différents constituants d'un processus de forage.

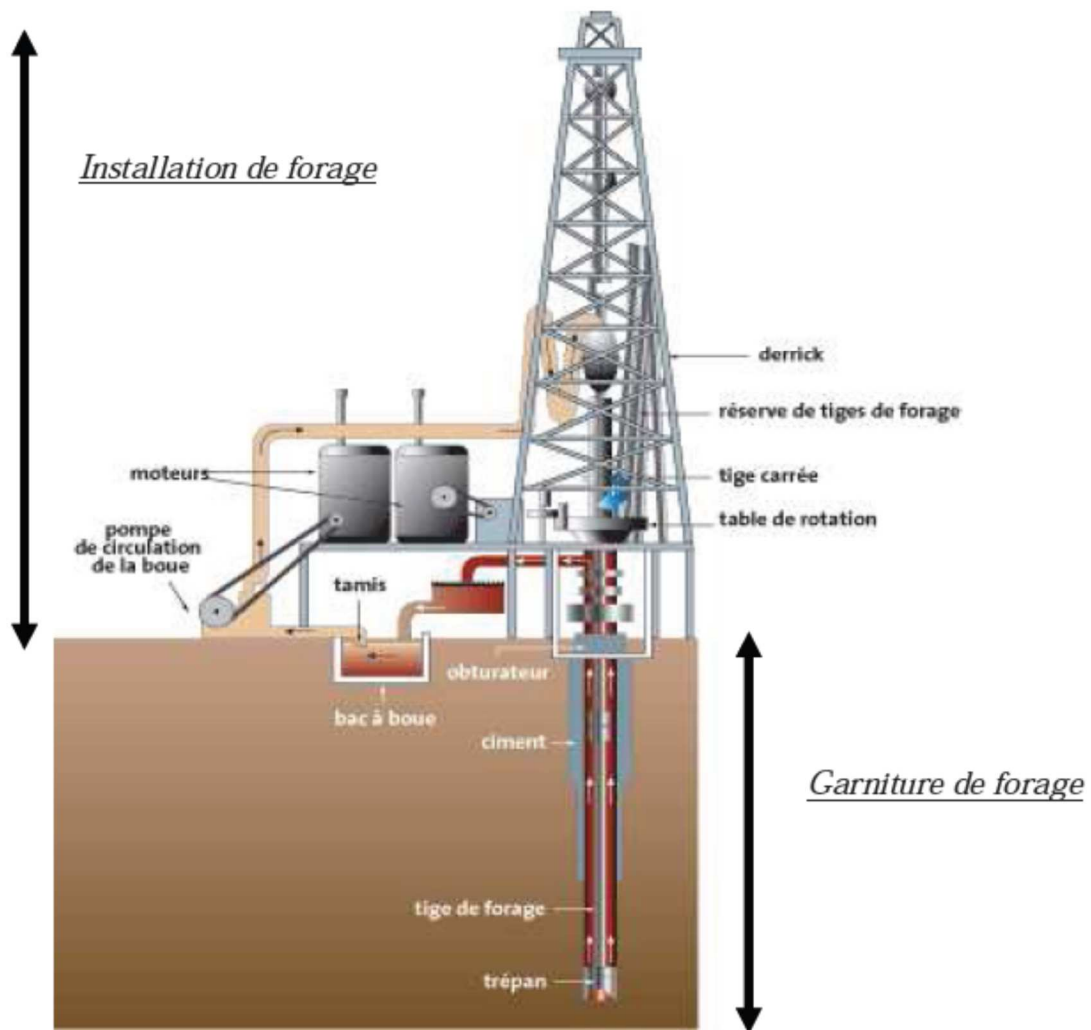


Figure 1.4 : *Processus de forage* [1]

1.2.1 Installation de forage

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

L'installation de forage possède plusieurs modules (figure 1.4) : le système hydraulique (pompe et bac à boue), le système d'alimentation (moteurs), les obturateurs, la table de rotation, les réserves des tiges de forage ainsi que le système de suspension qui renferme le derrick.

- Système hydraulique :

La circulation du fluide dans le processus de forage est assurée par une pompe de circulation. La figure 1.5 présente une pompe connectée à un bac à boue et disposant d'un tamis pour le

filtrage des déblais issus du forage avant la réinjection de ce fluide dans le puits. Plusieurs catégories de pompes de circulation existent dont la pompe à cavités progressives.

La pompe est rotative, volumétrique et constituée d'un engrenage composé de deux éléments hélicoïdaux : le rotor et le stator. La géométrie de l'ensemble comprend plusieurs séries de cavités séparées. La rotation du rotor dans le stator entraîne le déplacement axial du fluide de cavité en cavité, créant ainsi une action de pompage.



Figure 1.5 : *Pompe à cavité progressive* [1]

- **Système d'alimentation**

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : 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.



Figure1.6 : *Moteur embarqué dans une garniture de forage* [1]

- Système de rotation

Le système de rotation regroupe une table de rotation (*rotary table*), une tige d'entraînement (*kelly*) et une tête d'injection (*top drive*).

- Système de suspension

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

1.2.2 Garniture de forage

La garniture de forage est la partie active non visible. Elle est constituée essentiellement des masses tiges (Drill Collars) et des trains de tiges (Drill pipes). A cela se greffent des accessoires tels que les stabilisateurs des masses tiges, les amortisseurs de choc, les systèmes de mesures etc.

La garniture désignée aussi par arbre de forage, en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface (*table de forage*) et le trépan, correspond à la partie opérative dans le puits. Elle effectue plusieurs tâches dont la transmission de l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche, le guide et le contrôle de la trajectoire du puits, la transmission de la force de poussée ainsi que la circulation du fluide.

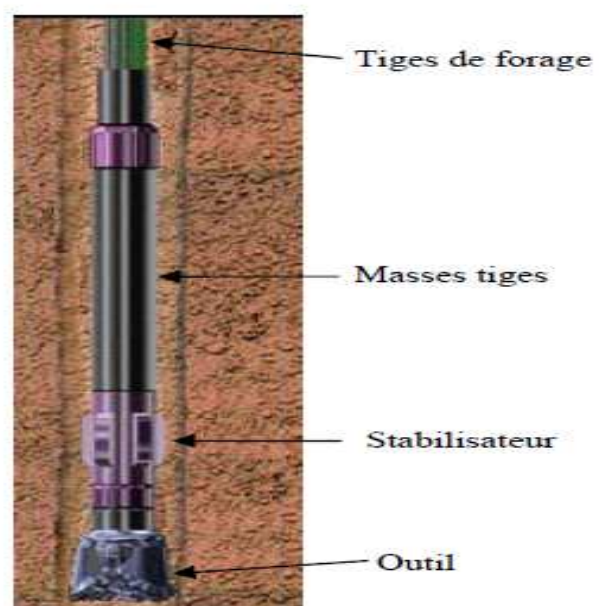


Figure 1.7 : La garniture de forage [2].

- Trains de tiges (Drill pipes)

Ce sont des tubes d'acier d'environ 9 mètres de longueur et d'un diamètre extérieur pouvant aller de 60 à 160 millimètres. Leur épaisseur est de l'ordre du centimètre. Elles sont raccordées les unes aux autres par des joints filetés coniques (*tool-joint*). L'ensemble du train de tiges est sollicité en traction et en torsion due à l'entraînement des tiges à partir de la table de rotation.

- Masses tiges (Drill Collars)

Les masses tiges sont des tubes en acier se situant au-dessus des trains de tiges. Elles contribuent à la création du poids agissant sur le trépan et sont soumises à plusieurs contraintes engendrées par le diamètre du trépan, la production des pertes de charge minimales, la résistance au flambage et la rigidité.

- 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 pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente sa performance. Le pourtour des stabilisateurs, et parfois celui des masses-tiges est constitué de lames spiralées pour faciliter la remonté de la boue. [1]

1.2.3. Trépans (L'outil de forage)

La vitesse d'avancement de forage dépend de la conception de l'outil, de sa forme, et de sa résistance. Il doit travailler le plus longtemps possible pour espacer les manœuvres de remplacement qui sont des temps morts. Une variété de trépans présentant des géométries spécifiques existent. Ils sont conçus pour forer une certaine gamme de roches et sont choisis en fonction des puits à réaliser. Ils se catégorisent en deux : les trépans tricônes et les trépans monobloc (outils à éléments de coupe fixes). Les trépans tricônes sont principalement composés d'acier ou de carbure de tungstène. Tandis que les monoblocs sont composés de diamants, ou de diamants synthétiques. La grande différence entre ces deux familles de trépans réside dans leurs façons d'arracher la roche. [1]



Figure 1.8: Les types d'outils en forage pétrolier. [3]

1.3. Progression du forage

Le forage est un processus graduel combinant plusieurs phases. Lors de chaque phase, l'assemblage de fond est remonté à la surface pour la maintenance du processus, pour le tubage et la cimentation de la partie forée. Le tubage consiste à déployer des tubes en acier dans le puits (*Casing*). Dans certaines situations, le tubage peut être enroulé et correspond au déploiement progressif d'un tube simultanément au forage. Dans toutes les situations le tubage permet de consolider les parois du puits au cours du forage, et de préparer les éléments nécessaires à la production une fois les réservoirs contenant les hydrocarbures atteints.

La cimentation consiste à cimenter l'annulaire à la fin de chaque phase de casing. Ce processus correspond à l'installation d'un anneau de ciment favorisant l'obtention d'un lien étanche et résistant entre le corps du tube et les parois du puits. Pendant le forage la partie basse du puits n'est pas couverte (*Open Hole*) tandis que sa partie supérieure est tubée : c'est le (*Cased Hole*).

Le bon déroulement du forage est conditionné par les états du système de circulation du fluide et du trépan, une pompe hydraulique assure la circulation du fluide. L'injection du fluide sur la roche à perforer s'effectue continuellement et permet l'évacuation des déblais vers la surface. Elle contribue également à la lubrification et au refroidissement des organes du processus de forage et à l'équilibre hydrostatique du puits.

En fonction des performances recherchées, plusieurs types de fluide peuvent être utilisés.

- **Fluide de forage de type boue**

La boue de forage est un mélange d'eau ou d'huile, d'argile (bentonite), d'additifs chimiques

(polymères) et de la baryte (réglage du poids). Elle permet l'évacuation des déblais et contribue à la compréhension de la nature géologique des milieux traversés. Le fluide doit être compatible avec les roches à forer pour garantir le bon déroulement du forage. A titre d'exemple, l'utilisation d'un fluide de forage de type eau favorise la dilatation de certaines formations et occasionne des gênes dans les opérations. Pallier cet inconvénient a nécessité à recourir au fluide de forage de type huile. La boue de forage permet également de contrebalancer la pression des fluides rencontrés en profondeur afin d'éviter d'éventuelles irrptions en surface. Le forage utilisant la boue peut favoriser la rentrée du liquide dans le puits, humidifier les déblais voire les compacter. Ce qui engendre l'encrassement du puits et empêche la circulation du fluide.

- **Fluide de forage de type air ou gaz**

Contrairement à la boue de forage, un fluide gazeux exerce une faible pression au fond du puits. Par conséquent, son utilisation conduit à la dérégulation de la vitesse de pénétration et favorise une évacuation rapide des déblais. La présence de fluide liquide dans plusieurs formations limite son exploitation. L'utilisation d'un fluide de forage de type air ou gaz empêche l'obtention d'informations relatives aux pressions dans le puits.

1.4. Paramètres de Forage

La compréhension des relations entre les différents paramètres de forage, permet d'établir des concepts théoriques et pratiques pour mieux maîtriser l'opération de forage. Ces méthodes sont très utiles pour minimiser les coûts en termes de temps et matériel.

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'approfondissement d'un forage [4].

On les classe en deux catégories:

- les paramètres mécaniques qui concernent le type et la forme de l'outil, le poids, la vitesse de rotation, et les caractéristiques des roches.
- les paramètres hydrauliques qui sont le débit, la pression, la nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité, filtrat).

1.4.1. Paramètres mécaniques

Les terrains traversés par les forages pétroliers présentent une grande variété de dureté ou, plutôt, de forabilité. Il est évident que pour détruire des roches ayant de telles différences de forabilité, on utilisera des outils qui travaillent selon des principes différents.

1.4.1.1. Caractéristiques des roches

La limite élastique et la dureté maximale de la formation sont les propriétés les plus importantes de la formation affectant le ROP (Taux de pénétration (ft/hr)) (figures 1.9 et 1.10). Cependant, la composition minérale de la roche peut changer le ROP. Par exemple, les roches contenant les minéraux durs et abrasifs peuvent causer usure rapide des dents de l'outil de forage (figure 11), par conséquent, la roche sera forée très lentement [5,6].

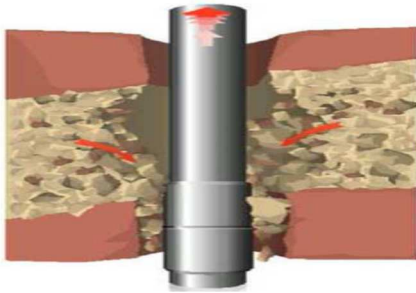


Figure 1.9: Formation non consolidée. [5,6]

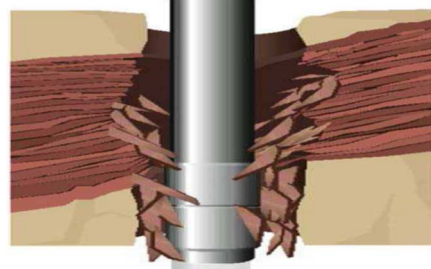


Figure 1.10 : Formation fracturée. [5,6]

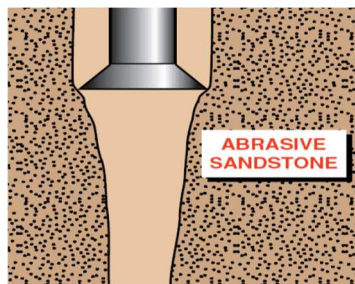


Figure 1.11: Formation abrasive. [5,6]

1.4.1.2. 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 [7].

Le type de l'outil ayant été défini, il faudra lui appliquer un poids et le faire tourner à une vitesse telle que le prix du mètre en résultant soit minimal.

D'après des études en laboratoire et des essais effectués sur les chantiers, il a été constaté que si, à vitesse de rotation constante, on augmente le poids appliqué sur l'outil, on enregistre une augmentation de la vitesse d'avancement. Cette augmentation varie à peu près en proportion directe du poids sur l'outil si le nettoyage de l'outil par la boue est suffisant.

Toutefois, la vitesse d'avancement peut atteindre un maximum si le poids appliqué à l'outil atteint la charge limite qui fait pénétrer entièrement une dent dans la formation. Au-delà de cette charge limite, tout poids supplémentaire est supporté par le corps du cône qui s'applique contre la formation et il en résulte une diminution de la vie du roulement sans augmentation correspondante de la vitesse d'avancement. Cette charge limite est d'autant plus importante que le terrain est plus dur et peut ne pas pouvoir être atteinte. En plus de cette charge limite, le poids sur un outil est limité par sa construction même, c'est-à-dire par son type [4] :

- un outil pour terrain tendre, ayant les dents longues, aura obligatoirement des paliers de dimension limitée, donc acceptant des charges plus faibles,
- par contre, pour un outil pour terrain dur, ayant de petites dents, les paliers sont plus conséquents et acceptent de fortes charges.

Le poids sur l'outil peut également être limité par le poids des masses-tiges utilisées. Si l'on applique sur l'outil un poids plus élevé que celui qui est disponible en masses-tiges, on risque:

- le flambage et la rupture des tiges,
- la déstabilisation des formations tendres,
- la déviation dans les formations à fort pendage.

1.4.1.3. Vitesse de rotation ou RPM (revolution per munite) :

Le poids sur l'outil est étroitement lié à la vitesse de rotation. On ne peut augmenter indéfiniment et simultanément ces deux paramètres sans provoquer un travail extrêmement dur pour le train de sonde et l'outil de forage. D'après les études, il ressort que la vitesse de pénétration croît en proportion directe de la vitesse de rotation dans les terrains tendres, mais pas dans les terrains durs. Pour ces derniers, il existe une vitesse optimum au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus. Cette vitesse maximale de rotation décroît à mesure que la dureté de la formation augmente et la vitesse optimale de rotation décroît quand on augmente le poids sur l'outil.

La vitesse de rotation peut être limitée également [4]:

- par les vibrations du train de tiges (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures),
- par certains types d'outils (à picots) qui travaillent par broyage, le facteur poids est plus important; une vitesse de rotation excessive entraînerait une diminution de la vitesse d'avancement ainsi que la détérioration des pastilles en carbure de tungstène,
- par les frottements en forage dévié.

1.4.2. Paramètres hydrauliques

1.4.2.1. Débit

Il a été dit précédemment que la vitesse d'avancement croît en proportion directe du poids que l'on applique sur l'outil; pour un débit donné, si on augmente progressivement le poids sur l'outil, il peut arriver un moment où l'avancement ne croît plus proportionnellement au poids et peut même diminuer si on continue à augmenter le poids. Ce phénomène à partir duquel il n'y a plus proportionnalité directe entre avancement et poids est appelé point de bourrage de l'outil.

Au-delà de ce point, le débit n'est plus suffisant pour évacuer la totalité des déblais au fur et à mesure qu'ils sont produits par les dents de l'outil et une partie du poids mis sur l'outil est alors support par les déblais.

On peut retarder l'apparition du bourrage en augmentant la vitesse aux jets, ce qui permet un meilleur nettoyage du front de taille.

Le débit a une influence sur l'avancement mais jusqu'à une certaine valeur limite au-delà de laquelle il risque au contraire d'être nuisible par la formation de caves et d'érosion des parois au droit des masses-tiges.

La base de calcul du débit est la vitesse de sédimentation des déblais dans l'annuaire. Le problème réel peut être complexe pour déterminer la vitesse de sédimentation en raison des nombreux paramètres intervenants [4] :

- forme et diamètre équivalent des déblais,
- régime d'écoulement du fluide et de la sédimentation.
- paramètres rhéologiques du fluide.

En pratique, on constate que des vitesses annulaires de 20 à 25 m/min donnent souvent des résultats corrects.

En règle générale, on peut préconiser :

- pour des terrains tendres : vitesse annulaire 30 à 40 m/min,
- pour des terrains durs : vitesse annulaire 25 à 30 m/min.

Pour les débits couramment utilisés, on peut calculer les vitesses de remontée correspondantes:

Tableau 1.1 - Relation entre les débits utilisés et les vitesses [4]

Diamètre de forage (in)	Débit utilisé (l/min)	Vitesse de remontée annulaire (m/min)
17 1/2	3000 - 4000	21 - 28
12 1/4	2000 - 2600	32 - 41
9 7/8	1500 - 1900	42 - 53
8 1/2	1000 - 1600	43 - 69
6	600 - 800	51 - 68

Le fait de vouloir retarder l'apparition du balling up ne doit pas amener le foreur à utiliser un débit tel qu'il y ait :

- en terrain tendre risque de cavage,
- en terrain mal consolidé, érosion des parois par la grande vitesse de la boue; cette érosion peut être gênante lorsque l'on désire avoir un trou bien calibre pour obtenir le maximum d'efficacité d'une garniture stabilisée, augmentation des pertes de charge dans l'annulaire produisant au niveau de l'outil le même effet qu'une augmentation de densité, d'où diminution de l'avancement.
- du fait de l'augmentation des pertes de charge, qui vient s'ajouter à la pression hydrostatique, risque de craquage des formations, d'où pertes de boue.

1.4.2.2. Les jets

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

A titre d'illustration, on peut calculer le dosage qui pour un débit moyen, pour chaque diamètre de forage, correspond à cette fourchette :

Tableau 1.2 - le dosage qui pour un débit moyen, pour chaque diamètre de forage [4]

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

Il est évident que ce critère ne peut pas être appliqué de façon isolée et doit être considéré à la fois dans le contexte de la puissance hydraulique nécessaire mais également avec le risque

occasionne par un diamètre de duses qui peut être source de bouchage par des cuttings ou par des colmatants.

1.4.2.3. La 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 [8].

Des essais en laboratoires ont confirme ce que tout foreur a eu l'occasion d'expérimenter lui-même : l'augmentation de la densité ralentit l'avancement.

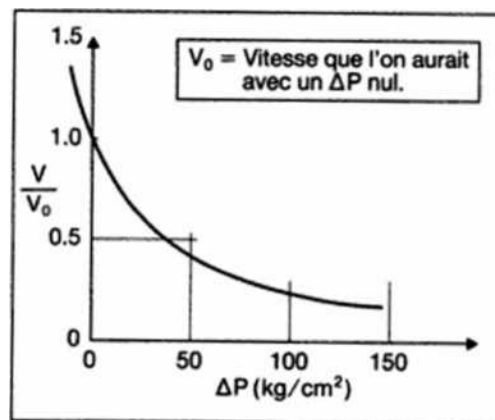


Figure 1.12 : Influence de la pression différentielle au front de taille sur la vitesse d'avancement [4]

On conçoit très bien que la roche soit plus difficile à disloquer quand la pression hydrostatique agissant sur elle augmente.

Cette influence peut s'interpréter à travers la courbe de la figure 1.12 qui représente la variation de la vitesse de pénétration V en fonction de la pression différentielle, ΔP dans le cas des argiles [9].

V_0 : vitesse que l'on aurait avec un ΔP nul et ΔP étant la différence entre les pressions fond de puits et formation. La pression de fond étant la somme de la pression hydrostatique et des pertes de charge annulaires.

1.4.2.4. la 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 aider

à la destruction de la formation.

La courbe de la figure 5 met en évidence cette influence [4].

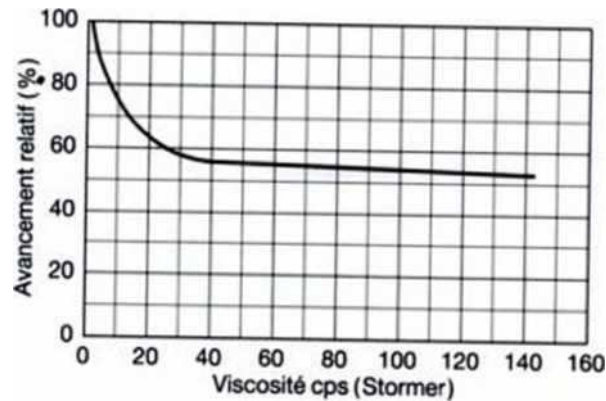


Figure 1.13 : Influence de la viscosité du fluide sur la vitesse d'avancement. [4]

1.4.2.5. Filtrat

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

1.4.2.6. pourcentage d'huile dans la boue

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

1.5. Mesures pendant le forage

De nombreux systèmes permettant l'acquisition des mesures sont incorporés dans le processus de forage et conditionnent le bon déroulement des opérations. Ils assurent la transmission des informations, pendant le forage, vers la surface. Les systèmes de mesures sont transportés dans les puits en étant soit intégrés dans l'assemblage de fond soit embarqués dans les masses tiges. Ils délivrent les mesures relatives aux natures des roches, aux pressions dans le puits, aux températures, aux vibrations, aux chocs, aux couples etc. Quelques mesures peuvent être enregistrées dans les systèmes de mesure et les autres sont transférées à la surface en utilisant le système téléométrique modulé par la boue ou d'autres sources de transmissions de données. Ces appareils de mesures ont révolutionné le monde du forage directionnel en permettant au processus de forage de se munir d'accéléromètres et de magnétomètres fournissant à la

surface les inclinaisons et les azimuts des puits. Les mesures suivantes sont transmises par les systèmes de mesure :

- la vitesse de rotation des trains de tiges et donc du trépan ;
- les types et sévérités des vibrations ;
- la température dans le puits ;
- le couple et le poids agissant sur le trépan ;
- le débit du fluide de forage.

L'augmentation de la fréquence d'acquisition de ces mesures permet d'effectuer en temps-réel un pilotage fin de la garniture de forage. La majorité des dispositifs de mesure intègre ou est en liaison avec des dispositifs nommés digraphes pendant le forage. Ils fournissent des mesures décrivant les propriétés de la formation et caractérisant des informations géologiques telles que, la porosité, la résistivité, l'inclinaison, la résonance magnétique, la pression de la formation etc.

Plusieurs méthodes permettant la transmission des données durant l'exploration des gisements existent :

- **Téléométrie par modulation de boue**

La téléométrie par modulation de boue est la méthode de transmission de données la plus utilisée par les systèmes de mesure. Son fonctionnement nécessite l'exploitation d'une valve modulant le débit de la boue de forage. La modulation de boue s'effectue en fonction de la donnée à transmettre et crée une fluctuation de pression représentant l'information à délivrer. Ces fluctuations se propagent dans le fluide de forage vers la surface où elles sont recueillies par des capteurs de pression. Enfin, elles sont traitées par des calculateurs pour reconstruire l'information transmise.

- **Trains de tiges câblées**

Les trains de tiges câblées sont des instruments de transmission de mesures en pleine expansion. Ils utilisent des câbles électriques logés dans les différents modules des trains de tiges et transportent un signal électrique à la surface. L'avantage de ces systèmes vient de leurs capacités à présenter un taux de transmission de données important par rapport aux

1.6. Choix de l'outil

L'efficacité de l'ensemble des opérations de forage repose sur ce facteur de base : le type de l'outil utilisé. Quelle que soit la puissance disponible d'un appareil de forage (pour la rotation,

l'énergie hydraulique, etc.), seul le type de l'outil choisi fera que cette puissance sera utilisée avec le maximum d'efficacité ou non.

En raison de la grande variété de dureté des formations et de la très grande variété des types d'outils, il n'est pas facile de choisir le meilleur outil pour le terrain que l'on traverse.

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

Pour les terrains durs, le mode de destruction sera différent il faudra utiliser un solide burin, le charger d'un poids supérieur à la résistance à l'écrasement de la roche pour la faire éclater. Les outils pour terrains durs devront donc avoir des dents courtes et robustes, que l'on pourra charger avec des poids importants pour faire éclater la roche. Pour ces outils, le ripage est inutile et même nuisible car il ne pourrait que provoquer une usure prématurée de la denture par frottement et abrasion, voire par rupture [10].

Entre ces deux extrêmes, toute une graduation de dureté a justifié la fabrication de dix à douze nuances d'outils présentant un compromis entre les nécessités du ripage et de l'écrasement on peut les classer en deux grandes catégories :

- Trépans tricônes
- Les outils à diamant (à éléments de coupe fixes)

1.6.1. Trépans tricônes (les outils à molettes)

Les trépans tricônes disposent de trois cônes rotatifs (molettes libres) qui embarquent des plaquettes de coupe conçues en fonction de la roche à forer. Ils peuvent être en acier, en carbure de tungstène ou en diamant. L'arrachage de la roche s'effectue lorsque les cônes effectuent des rotations autour du trépan. Le principal mode de destruction de la roche, par les taillants fixés sur les molettes, est le poinçonnement. Il se déroule par la pénétration verticale du taillant dans la roche sous l'effet d'un effort normal créant un champ de contraintes au voisinage du taillant.

Lorsque les limites à la rupture sont atteintes un déblai se produit. Ce type de trépan est particulièrement adapté lorsque les roches à forer présentent une forte dureté.

Le tricône (outil à 3 molettes) est le plus utilisé. Un outil à molettes est constituée de trois parties principales : les molettes, les roulements et le corps de l'outil. Les molettes présentent des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des

cônes adjacents. Les dents sont soit en acier usinées dans le cône, soit des picots de carbure de tungstène sertis dans des perçages à la surface des cônes. Les mollettes sont montées sur des arbres de roulements qui sont partie intégrante du corps de l'outil.

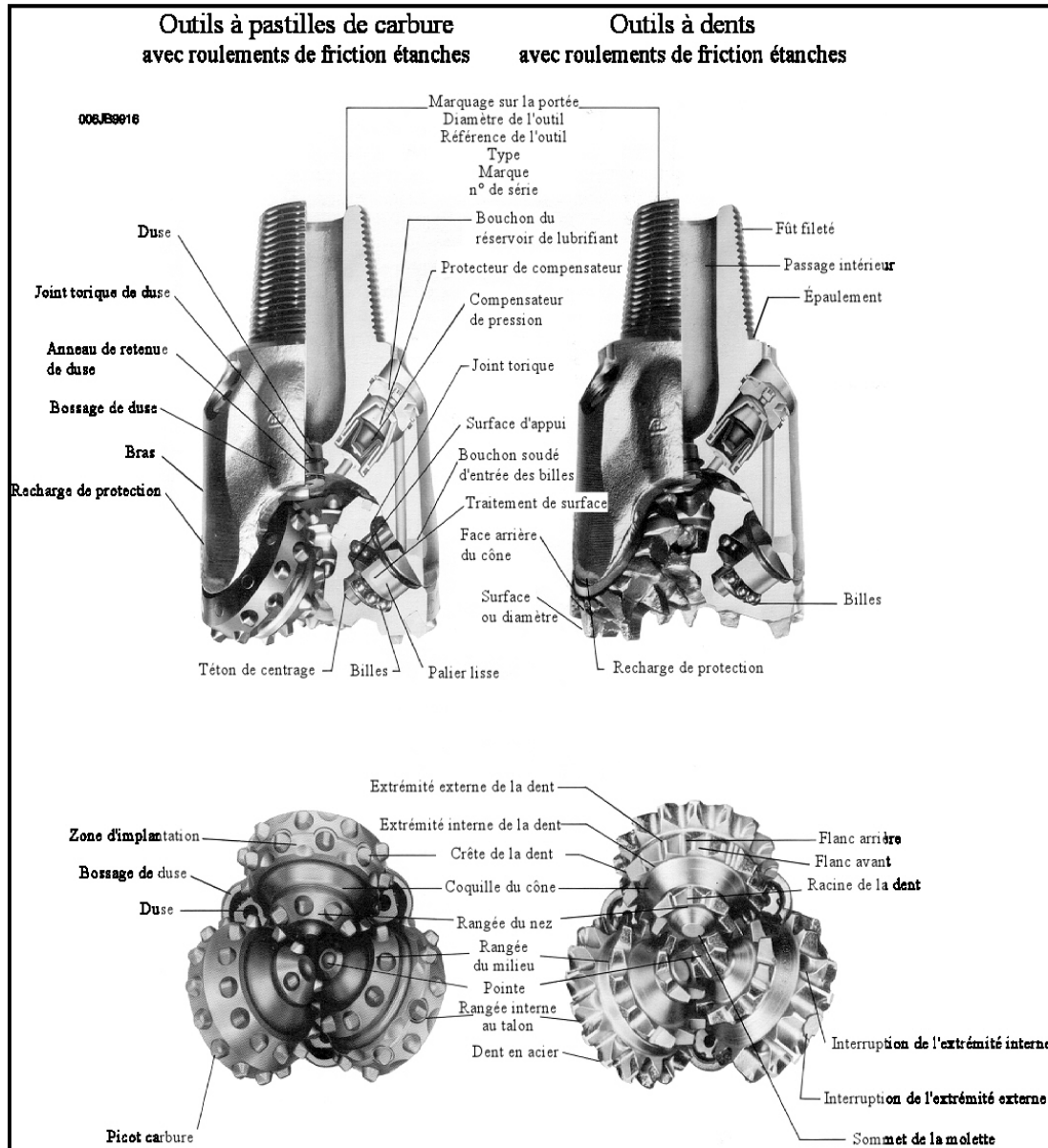
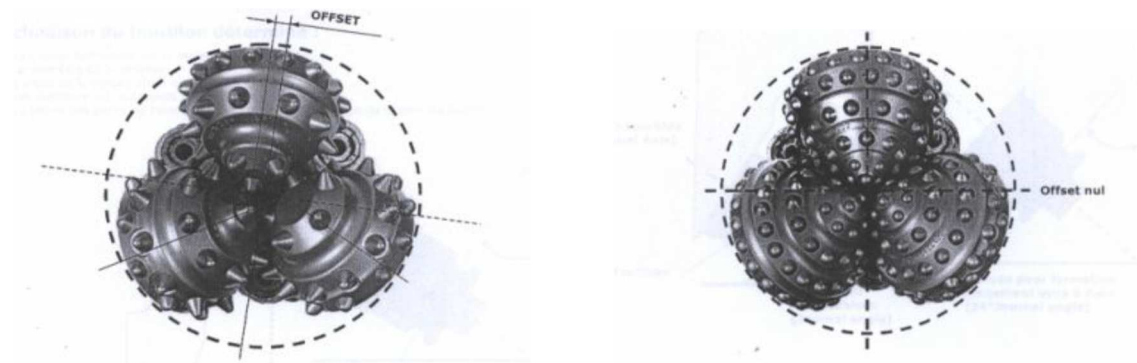


Figure 1.14: Nomenclature des tricônes [4]

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du type de formation à forer. L'action de pénétration dans la roche ou d'écrasement est obtenue par l'application d'un poids plus ou moins élevé, appliqué dans l'axe de l'outil par les masses-tiges. Il en résulte que les dents d'un outil destiné à forer des terrains durs (nous parlerons d'outils durs) auront besoin de supporter des charges importantes pour pénétrer dans les roches. Elles devront être

robustes et auront donc un angle au sommet assez grand et seront courtes. Les dents d'un outil destiné à forer des terrains tendres (nous dirons : outil tendre) seront longues et effilées pour pénétrer facilement dans la roche.



Offset d'un tricône pour terrain tendre

Offset d'un tricône pour terrain dur

Figure 1.15 : Représentation de l'Offset. [11, 5]

- **Mode de destruction de la roche :**

L'efficacité d'un outil à molette dépend de sa capacité à broyer la roche et à évacuer les morceaux de roches forée (cuttings). Ces outils travaillent par :

- compression produisant la pénétration de la dent ou du picot dans la formation et l'éclatement de la roche. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour produire le meilleur avancement ; l'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille. La contrainte de compression appliquée sur la formation induit une fracture (figure 1.16).
- Arrachage du copeau de terrain par ripage de la molette sur elle-même.

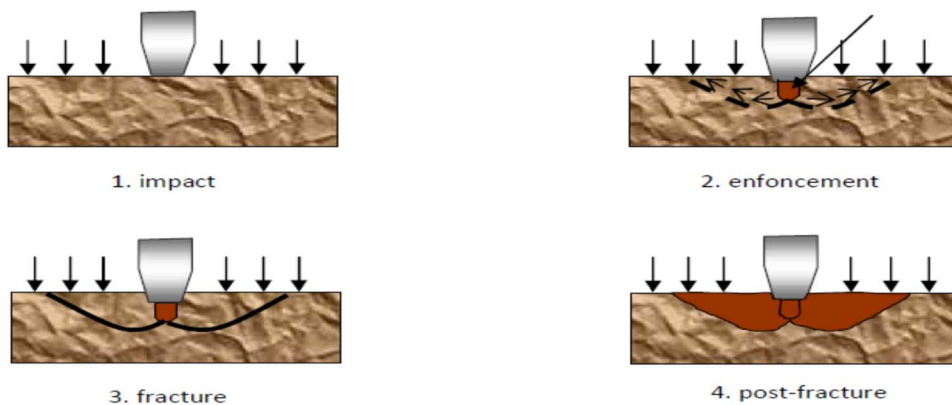


Figure 1.16 : Fracturation de la roche. [11, 5]

L'action de ripage est obtenue principalement grâce aux deux caractéristiques suivantes :

- D'une part, les molettes sont inscrites dans deux (ou trois) cônes de même axe, comme l'indique (la figure 1.17), mais dont les sommets sont distincts et non portés par l'axe de rotation de l'outil. Cette caractéristique ne permet pas le roulement sans glissement de la molette sur le fond du puits, roulement sans glissement qui serait obtenu si la molette était inscrite dans un seul cône dont le sommet serait confondu avec l'axe de rotation de l'outil. L'angle au sommet des cônes formant ces molettes et la position de leur sommet par rapport à l'axe de rotation de l'outil seront d'autant plus différents que l'outil sera destiné au forage de formations plus tendres et, inversement, une molette pour terrain dur sera inscrite dans un seul cône dont le sommet sera sur l'axe de rotation de l'outil.
- D'autre part, les axes portant les molettes ne passent pas par l'axe de rotation de l'outil (figure 1.18) et, pour un outil tendre, l'action de ripage sera d'autant plus grande que l'axe des molettes s'écartera plus de l'axe de rotation de l'outil. Au contraire, un outil de nuance dure aura l'axe de rotation de ses molettes concourant sur l'axe de rotation de l'outil. Ce déplacement de l'axe des molettes par rapport à l'axe de rotation de l'outil, appelé "offset", a une conséquence très importante sur la capacité de l'outil à garder son diamètre. En effet, la mise au diamètre du puits se fait le long d'une ligne AA' (figure 1.18) et la partie arrière de la molette (AB sur la figure 1.17) ou talon aura un mouvement de glissement tout au long de la partie ab de la figure 1.19 qui représente une coupe verticale du puits foré par un outil de nuance tendre. Le volume de terrain abc sera donc détruit uniquement par le glissement des talons des molettes le long de la surface ab. Il est alors clair, par construction, qu'à un renforcement donné du talon des molettes, un outil résistera d'autant moins à l'abrasion qu'il sera de nuance plus tendre. Cette caractéristique est très importante pour la tenue du diamètre des outils.

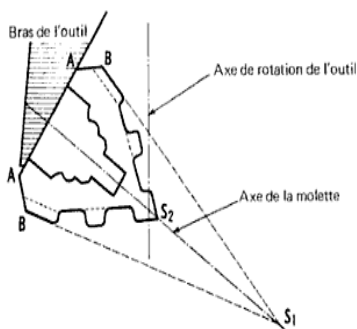


Figure 1.17: schéma d'une molette d'un outil. [10]

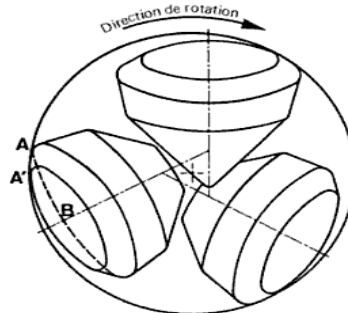


Figure 1.18: Vue de dessus des molettes d'un outil. [10]

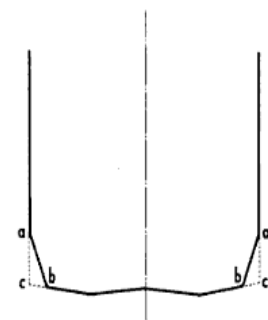


Figure 1.19: Coupe verticale d'un trou foré par un tricône de nuance tendre [10].

La forme de la denture et l'espacement des dents dans chaque rangée joue également un rôle important. Plus les dents sont hautes et espacées et plus il est facile de dégager les éléments de roche détruits par l'action des dents. En outre, le grand espacement des dents diminue le nombre d'arêtes en contact avec le fond du trou et par conséquent, augmente la pénétration dans la roche.

- **Les éléments de coupe**

Les outils à dents acier sont utilisés en début de trou, dans les formations tendres, pour de grandes vitesses de rotation, ainsi que dans les zones où l'épaisseur des couches rend les outils à picots non économiques. Suivant l'usage prévu, toutes les molettes à dents fraisées ont une protection carbure de tungstène sur les dents.

Les outils pour formations tendres sont conçus avec des dents longues, largement espacées, de façon à favoriser la pénétration dans le terrain et l'arrachement de fragments plus importants.

Ces outils sont conçus sans ripage; ainsi les trois molettes roulent pratiquement sur le fond de manière à réduire l'usure des dents par abrasion. L'outil à picots au carbure de tungstène fut initialement conçu pour forer les formations très dures et abrasives composées de silice ou de quartzite qui, du fait de la durée de vie relativement courte des outils à dents, se révélaient très onéreuses à forer. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la métallurgie et de la forme des picots, on a pu développer des outils adaptés pour forer économiquement dans une plus large fourchette de forabilité.

On distingue plusieurs types d'outils à molette :

- **Tricônes à denture fraisée**

Les trois molettes d'un tricône permettant de réaliser les actions d'éclatement et/ou d'arrachement de la roche sont contenues dans un volume très réduit, déterminé par le diamètre de forage. Cette contrainte a conduit à un compromis entre la hauteur des dents, l'épaisseur de la coquille des molettes et la taille des roulements. On comprend ainsi qu'un outil tendre, qui a des dents longues, aura une coquille plus mince et une taille de roulement plus faible qu'un outil dur. Il aura donc une résistance moindre : on ne pourra pas le charger autant qu'un outil dur ou, à paramètres poids et rotation identiques, sa durée de vie sera plus courte. Or, pour tirer le profit maximal de l'action de ripage, on aura intérêt à utiliser une vitesse de rotation relativement élevée. Il en résulte que, souvent, les outils tendres voient leurs roulements périr avant leur denture car, bien que certains prétendent le contraire, la boue

de forage est un piètre lubrifiant. Aussi, pour mieux équilibrer usure de la denture et usure des roulements, on a construit des outils à roulements étanches.

Pratiquement, les outils à roulements étanches ont une durée de vie de 30 à 50 % supérieure à celle des outils ordinaires, mais ils coûtent plus cher et peuvent être utilisés avec profit sur des machines au coût journalier élevé (forage en mer par exemple). Les photos de la figure 1.20 représentent quelques nuances d'outils à dents fraisées.

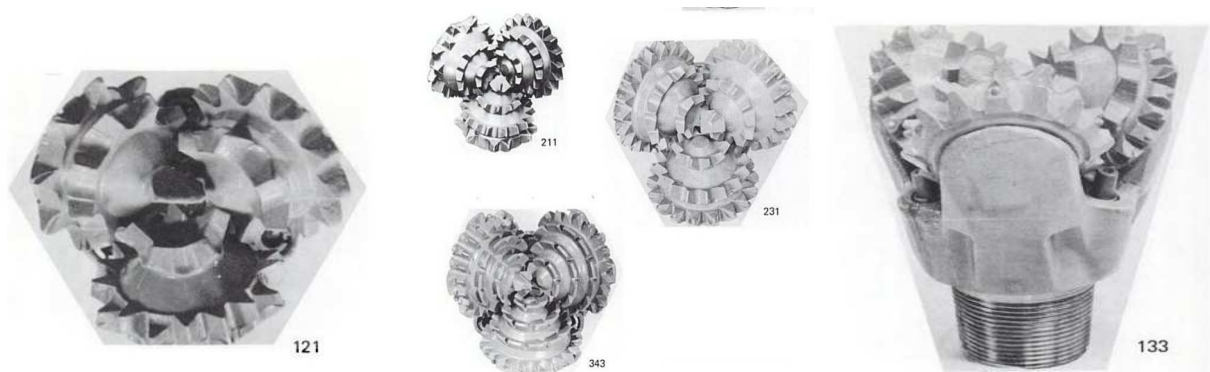


Figure 1.20: Outils à denture fraisée [10].

- **Tricônes au carbure de tungstène**

A l'opposé des outils tendres, les outils à dents fraisées de nuance dure peuvent ne forer que quelques mètres dans certains terrains durs et abrasifs avant d'avoir leur denture totalement usée, bien que leurs roulements restent bons. Pour permettre d'équilibrer la durée de vie de la denture et des roulements, des outils dans lesquels les dents sont remplacées par des bâtonnets de carbure de tungstène sertis dans la coquille ont été construits. Dans les premiers outils, seule l'extrémité hémisphérique des bâtonnets émergeait des molettes, ce qui a valu à ces outils le nom d'outils à pastilles.

Ces outils avaient deux avantages :

- Les pastilles ne s'usaient pratiquement pas, quelle que fût la nature du terrain;
- Les bâtonnets de carbure étant courts, les roulements étaient relativement robustes car il était possible de leur réserver une plus grande part du volume des molettes.

Le carbure de tungstène étant un matériau relativement fragile, ces outils étaient utilisés à des vitesses de rotation assez faibles (40 à 60 tr/min) ; il en résultait une durée de vie des roulements de 2 à 3 fois supérieure à celle des outils à dents fraisées. Les roulements étanches ont été également utilisés mais on n'en tirait pas toujours le meilleur profit car ces outils

n'étaient adaptés qu'à des terrains durs et qui "éclatent" bien. L'entrée dans un banc marneux conduisait souvent à remonter ces outils prématurément, à la suite d'une chute d'avancement.

Il devient dès lors intéressant d'avoir un outil capable de "passer" les bancs marneux en donnant à la pastille de carbure de tungstène la forme d'une dent. Cela a été rendu possible grâce à l'amélioration de la métallurgie du carbure de tungstène et au fait que la hauteur de la dent au carbure pouvait être beaucoup plus faible que celle d'une dent fraisée. La figure 1.21 permet de comparer la hauteur des dents d'outils fraises et au carbure (pour des outils 7/8" Smith). On remarque que la hauteur des dents au carbure est encore relativement grande par rapport au besoin : cela ménage un volume suffisant entre la coquille et le front de taille pour permettre un passage facile de la boue et un entraînement efficace des déblais.

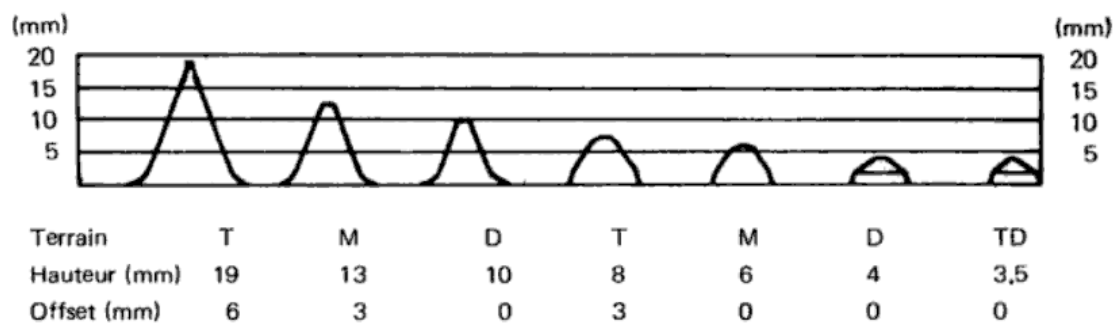


Figure 1.21 : *Caractéristiques. Outils 7/8 acier et carbures.*

Ces outils ont également un ripage plus faible que les outils à dents fraisées correspondants, ce qui fait que, à toutes conditions égales, leur avancement sera plus faible.

Enfin, ces outils ont une durée de vie très longue, car ils seront équipés de roulements étanches, voire de roulements à paliers lisses. Des temps de rotation de 100 à 250 heures ne sont pas rares. La figure 1.22 montre quelques outils au carbure, de nuances tendres à dure.

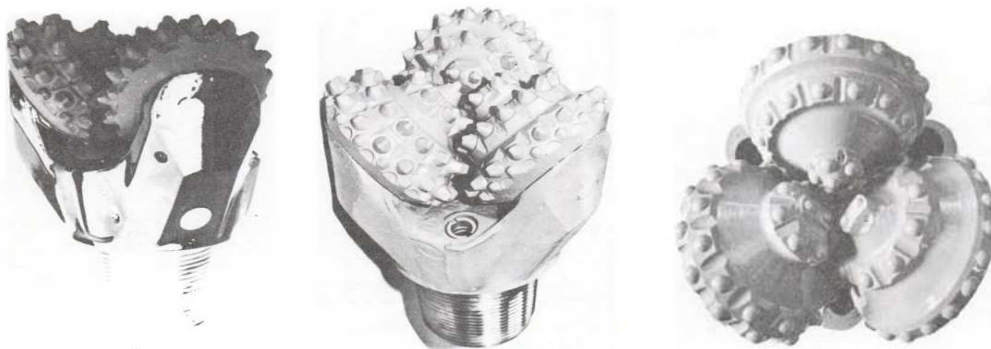


Figure 1.22 : *Outils au carbure. [10]*

- Cas particulier des outils au carbure

Par définition même ces outils ne doivent pas présenter d'usure de la denture, puisque le carbure de tungstène est plus dur que les roches. Il arrive cependant que les outils usés présentent un plus ou moins grand nombre de "picots" cassés. Cela peut être dû à plusieurs raisons qu'il est important de pouvoir discerner :

- La rupture des picots, voire leur perte, peut être due à des défauts de fabrication. Il ne doit s'agir normalement que d'un très faible nombre (quelques pourcent). C'est un problème commercial qui doit se régler avec le fournisseur ;
- La rupture des picots est la conséquence de l'inadaptation de l'outil à la formation forée en général, outil de nuance trop tendre par rapport au terrain foré ou de paramètres poids et/ou rotation excessifs ;
- La rupture des picots résulte du chevauchement des molettes consécutif à une usure excessive des roulements.

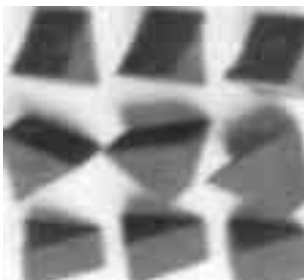
Il importe donc de savoir choisir entre ces trois causes. Cela n'est possible qu'après un examen attentif de l'outil usé.

1.6.2. Les outils à éléments de coupe fixes (les outils au diamant)

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. La rotation du train de tiges entraîne celle du trépan. Ces trépan se composent de diamant naturel ou synthétique brasé sur du carbure de tungstène.

Les outils diamantés sont de trois types :

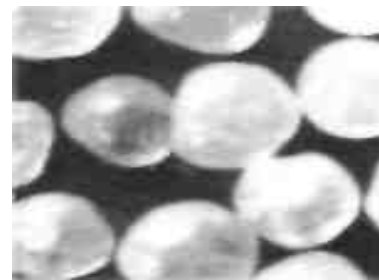
- à diamants naturels (figure 1.23),
- à taillants PDC (Polycrystalline Diamond Compact),
- à taillants TSP ou diamants polycristallins thermostables,
- Les outils hybrides.



TSP



PDC



Diamants naturels

Figure 1.23 : taillants des outils intégraux [4]

1.6.2.1. Outils diamant nature

Ces types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécaniquement différente : le diamant naturel abrase la roche et travaille comme une macro meule, les diamants polycristallins cisailent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux. La forme de tous ces outils de forage est monobloc ce qui leur confère une certaine solidité.

Le diamant (carbone cristallisé) est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80 000 bar (carbure de tungstène : 50 000 ; acier C.45 : 15 000). Son point de fusion est très élevé (3 650 °C) mais il se transforme superficiellement en graphite vers 1 450 °C. Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0.2 gramme). Pour les outils de forage, la taille des pierres se mesure en nombre de pierres par carat et varie généralement entre 2 et 12 pierres au carat. Les trépan à diamants ont été introduits dans l'industrie pétrolière en 1952 par Christensen Diamond Products. Ils sont constitués de trois parties principales : les diamants, la matrice et la tige. Une des caractéristiques la plus importante est l'absence de pièces mobiles, ce qui contribue à une plus grande fiabilité.

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

Bien qu'il existe des règles générales pour le choix de la taille des diamants, l'expérience acquise lors de passes d'outils précédents reste le meilleur des guides.

Les trois profils de base d'outil : arrondi, conique, court ou long correspondent à la plupart des applications. Il y a un nombre presque illimité de variations à l'intérieur de ces catégories. La forme la mieux adaptée à un cas spécifique est un compromis pratique entre la durée de vie maximale de l'outil et la vitesse d'avancement maximale.

Le nez arrondi donne une force plus grande dans les formations dures; le parabolique allonge donne une coupe plus rapide.

Les outils à concrétion diamantée, très utilisés en mines sont assez spécifiques par le fait que les diamants ne sont plus sertis dans la matrice. La concrétion diamantée est un ensemble constitué de diamants de très petites tailles et d'un liant métallique. Les diamants sont repartis dans la masse sur une épaisseur de 5 à 10 mm. Lors du travail de l'outil, les diamants usés se déchaussent mais laissent apparaître d'autres couches de diamants.



Figure 1.24: Trépan à diamants

- Utilisations des outils diamants

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

- Lorsque la durée de vie des outils à molettes est très courte du fait de l'usure des roulements ou des dents, ou de la cassure des dents.
- Lorsque la vitesse d'avancement est très faible (1.5 m/h ou moins), à cause d'une densité de boue élevée, ou d'une puissance hydraulique insuffisante de l'appareil de forage.
- En diamètre six pouces ou moins, ou la durée de vie des outils à molettes est limitée.
- Pour les montées d'inclinaison en forage dirigé.
- Quand le poids sur l'outil est limité.
- En turboforage, ou la vitesse de rotation élevée favorise l'avancement de l'outil diamant.

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

1.6.2.2. Outils PDC

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

L'inconvénient majeur des PDC est de ne pas supporter des températures au-delà de 800 °C.

Ceci interdit de les enchâsser dans une matrice carbure comme des diamants naturels.

Il faut donc les fixer sur la matrice par brasure dans des logements prévus au moulage.

Dans le cas des corps aciers, les pastilles PDC sont également brassées sur des plots cylindriques qui seront ensuite sertis dans des perçages.



Figure 1.25: Outil PDC

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

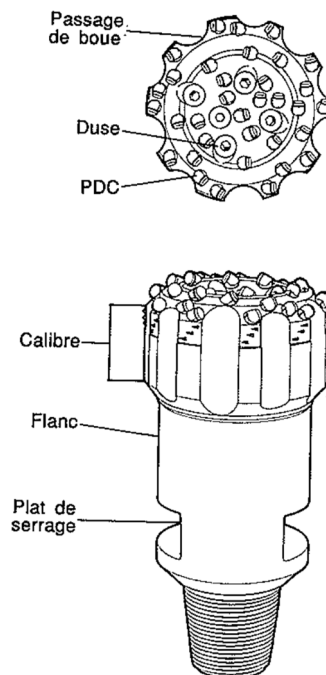


Figure 1.26 : exemple d'un outil PDC [4]

- Conception des outils PDC :

La conception d'un outil de forage PDC est la plupart du temps un problème de compromis. Plusieurs facteurs, qui peuvent être en conflit, sont considérés et constituent une structure de

contraintes fondamentales. Les caractéristiques qui se montrent extrêmement efficaces sur un modèle peuvent être néfastes pour une autre caractéristique.

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

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

- **Profil :**

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

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

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

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

Le profil de l'outil consiste en : Apex (centre géométrique de l'outil) ; Cône ; Nez ; Le flanc (shoulder ou taper) ; L'épaulement (ODR) ; Le diamètre (gauge).

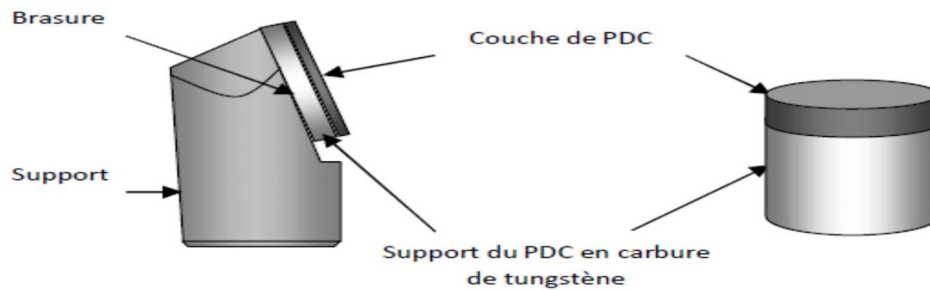


Figure 1.27 : Structure d'un PDC. [11, 5]

- **Les dents (cutters):**

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

Idéalement le concepteur recherche un produit qui :

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

Plus la dureté de la roche augmente, plus le nombre de taillants augmente.

Malheureusement, il y a performance et compromis de coût dans la décision du nombre de cutters.

Augmenter la densité des taillants permet à un outil de forer plus efficacement, de traverser des formations plus abrasives et généralement signifie une plus longue durée de vie. En effet, une durée de vie est prolongée car son temps de travail et son degré d'usure diminuent. L'énergie dissipée par la coupe est calorifique, si le nombre de taillants est optimisé, l'énergie unitaire par taillant est réduite et la température critique (750°) de déstabilisation du PDC ne sera pas atteinte. Cependant, un plus grand nombre de dents rend l'outil plus cher (particulièrement depuis que les composants PDC constituent une grande partie du coût total) et, en général, la vitesse de pénétration diminue.

- **Le corps de l'outil (bit body) :**

Le corps de l'outil (bit body) fournit les fonctions suivantes pendant la durée de vie de l'outil :
 Servir de support pour les dents et les duses et la fixation de ceux-ci ; Accepter les contraintes mécaniques sous les conditions d'opérations de fond ; Diriger et contrôler le courant de boue

pour le nettoyage et le refroidissement des dents ; Permettre la connexion à la garniture de forage.

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

a. Corps en acier :

Le corps en acier supporte d'avantages les contraintes de forage (poids, torque) que le corps à matrice. Il est généralement utilisé quand le concepteur veut maximiser les faces d'attaque pour favoriser la vitesse de pénétration. Cependant, les hauteurs peuvent être limitées par les contraintes mécaniques du corps. Des calculs sont réalisés pour maximiser les contraintes sur la lame pour une hauteur donnée et des programmes de test de fatigue vérifient les contraintes adéquates. L'utilisation de l'acier représente également un avantage pour les outils de grands diamètres en évitant les problèmes complexes de fabrication des corps à matrice. L'inconvénient majeur du corps en acier est qu'il est moins résistant à l'érosion que l'outil matrice et par conséquent plus susceptible d'être endommagé par les fluides de forage abrasifs. Pour combattre ceci, la technique de renforcement (hard facing) peut être appliquée aux sections les plus exposées de l'outil.

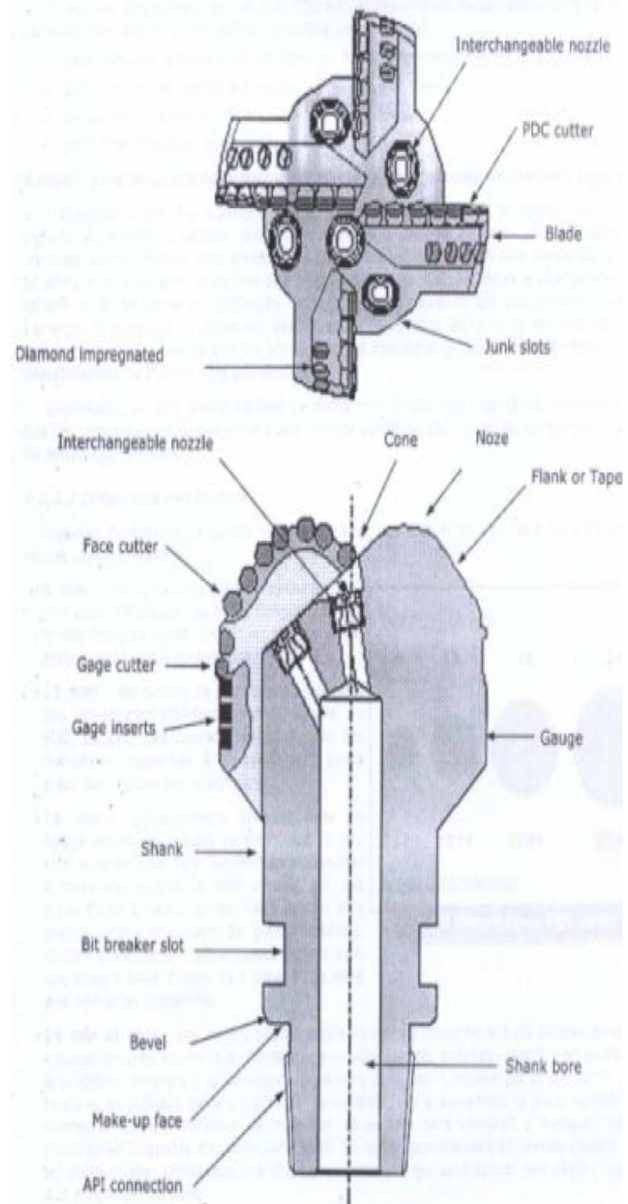


Figure 1.28: Corps en acier. [11, 5]

outils à matrice sont préférés dans les applications où la boue de forage est hautement chargée en solides, où encore lorsqu'une grande puissance hydraulique à l'outil est risquée, ainsi que dans les cas où la durée du forage élevée prime pour des raisons économiques.

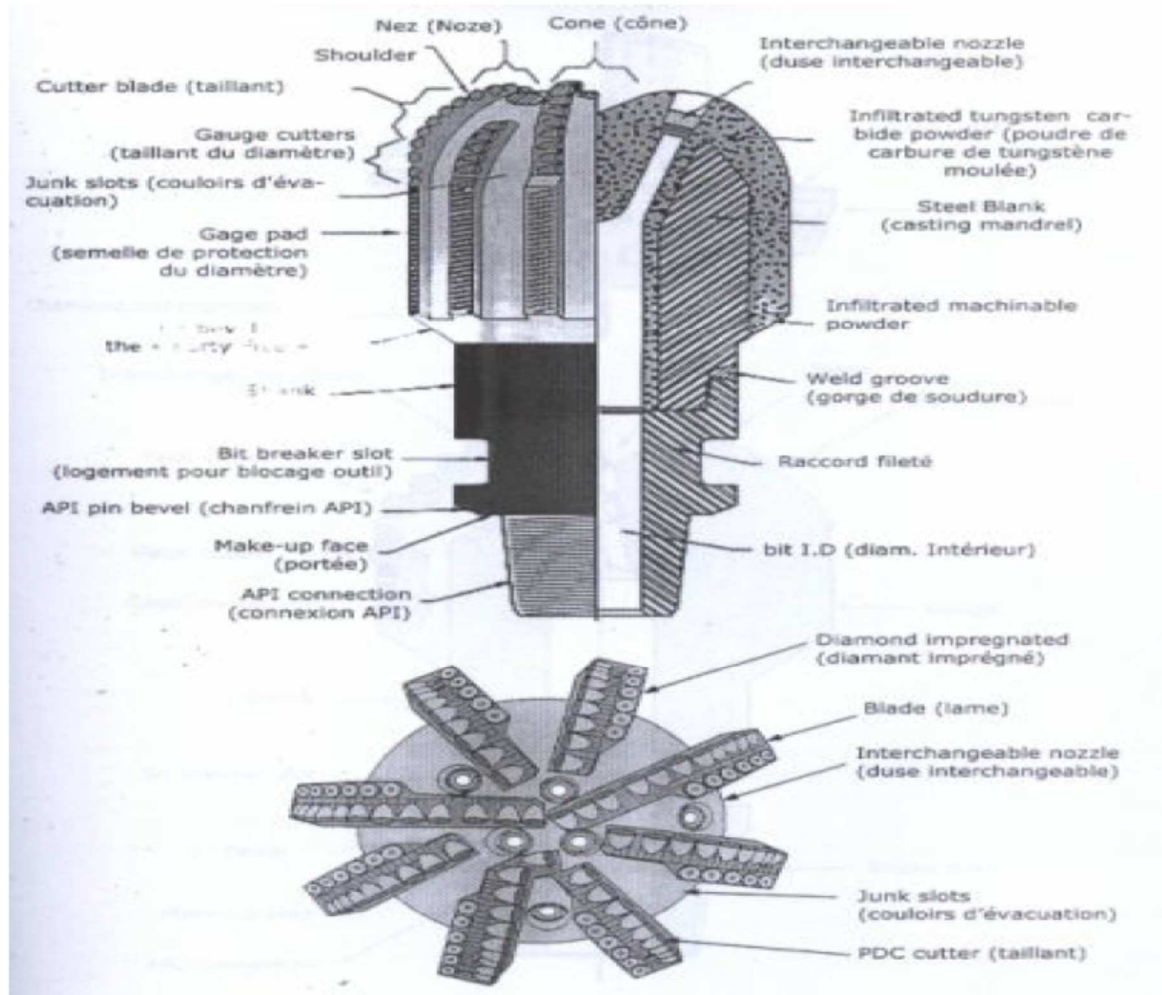


Figure 1.29 : Corps à matrice. [11, 5]

L'action de coupe des outils joue un rôle clé dans l'énergie nécessaire pour forer une formation donnée. Cette caractéristique est généralement présentée en terme 'd'énergie spécifique' qui est définie comme l'énergie exigée pour couper un volume unitaire de formation. Un outil qui brise la roche directement par cisaillement plutôt que d'utiliser la charge compressive, dépense une énergie spécifique inférieure. Ce qui donne au PDC l'action de coupe la plus efficace. En règle générale, la résistance au cisaillement est approximativement la moitié de la résistance compressive.

- Mode de travail des outils PDC

- **Actions de coupe :**

Nous avons vu dans le chapitre concernant les outils à molettes que ceux-ci forent en écrasant et en éclatant la roche avec un poids élevé sur l'outil. La charge de compression verticale provoque l'éclatement de la roche approximativement sur un plan à 40° de l'horizontal. En revanche les outils PDC forent en coupant la formation par cisaillement, pareillement à l'action de coupe d'un outil de tour.

- **Auto-affûtage du cutter PDC :**

Pour garder l'efficacité de l'énergie du mécanisme de cisaillement à un niveau élevé, il est essentiel que les bords des éléments de coupe du PDC restent tranchants. Comme la dent s'use et développe un méplat, l'énergie spécifique du système de coupe augmente autant que le poids qui est exigé pour maintenir une profondeur constante de coupe. Les taillants PDC maintiennent un bord tranchant pendant qu'ils s'usent parce que le carbure de tungstène qui est directement derrière la couche de diamant s'use plus rapidement que le diamant du polycristallin, dû à sa résistance à l'abrasion plus faible. Cela a pour résultat la formation d'une lèvre de diamant qui reste tranchant durant la vie du PDC. Contrairement à cela, les diamants sur un outil diamant naturel s'émousent avec l'usage, prenant une apparence lisse et polie. De même, les dents sur un outil à molettes produisent une usure similaire. Cela résulte en un mécanisme de coupe qui devient moins efficace lorsque l'outil fore. Par conséquent, les outils à molettes et outil diamant tendent à forer à une vitesse d'avancement inférieure lorsqu'ils s'usent, tandis que les outils PDC maintiennent une vitesse d'avancement plus élevée dans l'intervalle total foré.

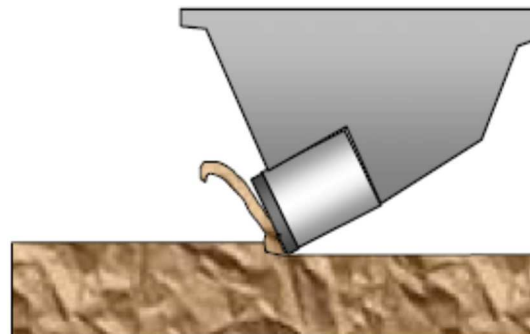


Figure 1.30 : *Mode de travail d'un outil PDC.* [11, 5]

1.6.2.3. Outils thermiquement stable (TSP)

La plus récente nouveauté en matière d'outil diamant est l'utilisation de diamants polycristallins thermiquement stables. Contrairement au PDC, les TSP ont subi un traitement pour éliminer les éléments incompatibles d'un point de vue dilatation thermique, ils pourront donc supporter les températures de fabrication d'une matrice carbure. Leur forme triangulaire présente des arêtes agressives pour le cisaillement de la roche, Leur utilisation est souvent associée à l'action de diamants naturels.



Figure 1.31 : Outils TPS.

Avantage des outils TSP

Le TSP présente de nombreux avantages sur les autres types de diamant :

- Il résiste mieux à la température que le PDC ;
 - Grâce à sa structure polycristalline, il résiste mieux au choc que le diamant naturel (à l'exception du carbonado qui est également polycristalline) ;
 - 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.

1.6.2.4. Les outils hybrides

Enfin, terminons par l'apparition très récente des outils hybrides (combinaison du tricône et du PDC), même si l'idée remonte aux années 50. Le but est de réduire le temps de forage dans les formations les plus complexes, en alliant les avantages des deux types de trépan. L'opérateur peut ainsi obtenir une réduction de 40% du coût du mètre foré. Si on compare avec les trépan tricônes, la ROP est plus élevée et le WOB plus faible avec moins de rebond. Si on compare avec les PDC, il y a une nette amélioration de la longévité dans des formations intercalées, moins de stick-slip, un couple de forage plus bas, une meilleure stabilité et un meilleur contrôle directionnel.



Figure 1.32: Outils hybrides.

- **Conception :**

Un élément secondaire de carbure de tungstène imprégné de diamant est placé derrière la dent en PDC. Ces seconds éléments sont généralement appelés « imprégnés ». Chaque imprégné va de paire avec un PDC spécifique situé à un endroit critique, potentiellement exposé à l'usure. On trouve des outils hybrides aussi bien sur les corps en acier que sur les matrices. Dans les deux cas, les imprégnés contiennent de nombreux petits diamants naturels sur la face exposée au contact de la formation durant les sévères conditions de forage.

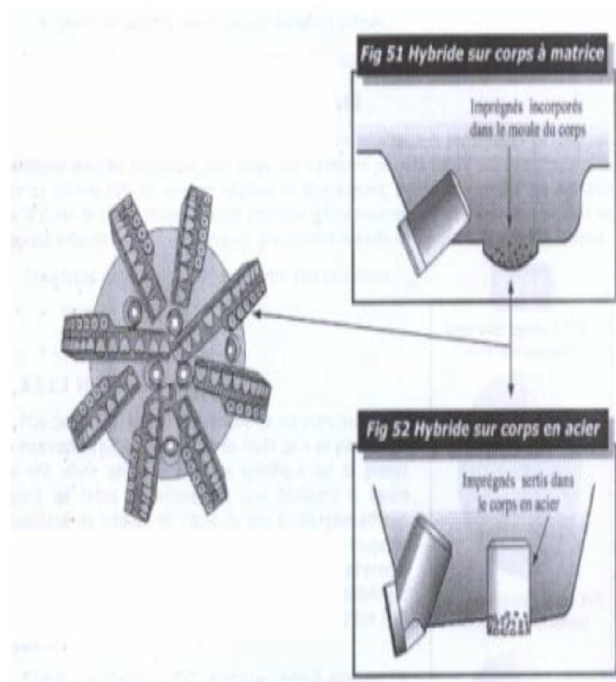


Figure 1.33 : Conception des Outils hybrides. [11, 5]

Les outils hybrides à matrice ont l'imprégné incorporé dans le moule pendant le processus de fabrication du corps (figure 1.33).

Les outils hybrides avec corps en acier utilisent des composants séparés qui sont fabriqués à partir du carbure de tungstène. La plupart des fabricants développent pour un même outil, les deux versions hybride et non-hybride. Cependant, les performances des outils hybrides ont amené une réduction des demandes concernant les outils non-hybrides. D'où la tendance des fabricants à offrir seulement des conceptions hybride.

- **Avantage des outils PDC hybrides :**

Depuis l'introduction de la technologie hybride, les outils PDC hybrides ont constamment dépassé les outils PDC conventionnels en terme de performance par : leur capacité à forer des formations plus dures ; en fournissant une durée de vie plus longue tout en maintenant une vitesse d'avancement élevée.

Ces performances peuvent être attribuées à :

- une amélioration de la stabilité des outils.
- De meilleures caractéristiques de torque.
- La protection des taillants à l'usure par abrasion.
- Une amélioration de la protection du diamètre.
- Moins de taillants pour forer une formation donnée.

Regardons individuellement ces sections qui font que le concept hybride est performant.

1. Amélioration de la stabilité de l'outil :

Les vibrations de fond peuvent être extrêmement nuisibles à la performance de l'outil, en particulier dans les formations plus dures. Les vibrations peuvent causer des chocs importants sur les taillants PDC qui souvent induisent un ébrèchement, un morcellement et une réduction de la durée de vie du taillant.

L'usure accélérée même seulement de quelques taillants dans les régions critiques d'un outil peut réduire grandement la durée de vie de l'ensemble des taillants.

Deux types distincts de vibration peuvent être considérés : Vibration latérale ; Vibration axiale.

A. Vibration latérale :

Plus connu sous le nom « bit whirl », la vibration latérale est le mouvement périodique oblique de l'outil dans un plan X-Y. Le « bit whirl » est un phénomène spécifique qui se produit quand les forces dynamiques de fond déplacent le centre instantané de rotation de l'outil de son centre géométrique.

Quand un outil PDC se met à vibrer latéralement (figure 1.34), il coupe un modèle de fond de trou caractérisé par une empreinte multi-lobes à l'inverse des cercles concentriques engendrés par un outil travaillant dans les bonnes conditions de forage.



Figure 1.34 : *Effet de la vibration latérale.* [11, 5]

Quand un taillant PDC accroche individuellement la formation, le centre de rotation instantané de l'outil est déplacé au point de contact taillant/formation qui, à son tour crée un mouvement tourbillonnant qui transmet l'impact des taillants PDC sur la côte opposée du centre de rotation. Les dommages sont induits du tourbillonnement de l'arrière les taillants.

Dans la technologie des outils hybrides, les taillants PDC sont protégés par les éléments de diamants imprégnés situés derrière eux. Un outil hybride fore mieux qu'un PDC conventionnel parce que les «imprégnés» agissent pour stabiliser l'outil au fond du trou et atténuer sa tendance à vibrer latéralement. De plus, parce que chaque imprégné est situé en arrière et séparément du principal taillant PDC, l'imprégné est positionné de manière à accepter le choc de chaque impact arrière laissant le taillant PDC intact.

La capacité d'un outil PDC hybride (figure 1.35) à contrôler les vibrations latérales a été démontrée sur les champs d'application par la comparaison des performances réalisées, ainsi que par les essais réalisés en laboratoire.

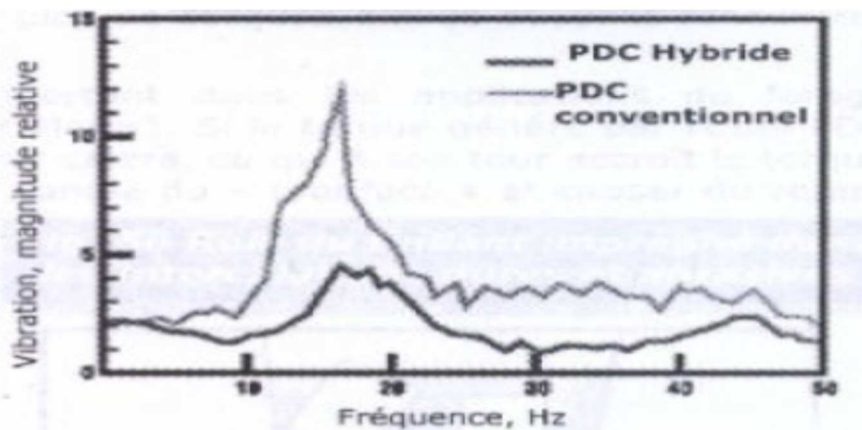


Figure 1.35 : *Essais comparatifs sur les PDC.* [11, 5]

B. Vibrations axiales :

La vibration axiale est le mouvement périodique de bas en haut dans la direction du centre axial de l'outil. Ce mouvement se réfère souvent à un battage de l'outil (bit bounce). Comme l'outil vibre de bas en haut sur le fond du trou, le poids appliqué sur chaque taillant change, faisant varier la profondeur de coupe du taillant PDC, allant d'un minimum quand l'outil est dans la position haute, à un maximum quand l'outil est en position basse. La variation dans la profondeur de coupe se transforme en variation de torque. Ces fluctuations de torque peuvent être une cause de vibration de torsion à l'outil.

Les outils PDC hybrides minimisent cet effet de vibration de torsion en contrôlant la profondeur de coupe. La localisation précise des pastilles imprégnées évitent à l'outil de prendre des profondeurs de coupe inhabituelles et les pics excessifs de torque sont éliminés.

La capacité de l'outil PDC hybride à limiter la vibration axiale a été démontrée par la comparaison des performances des outils sur les lieux de forage. Cela a été également démontré dans les essais de laboratoires (figure 1.36).

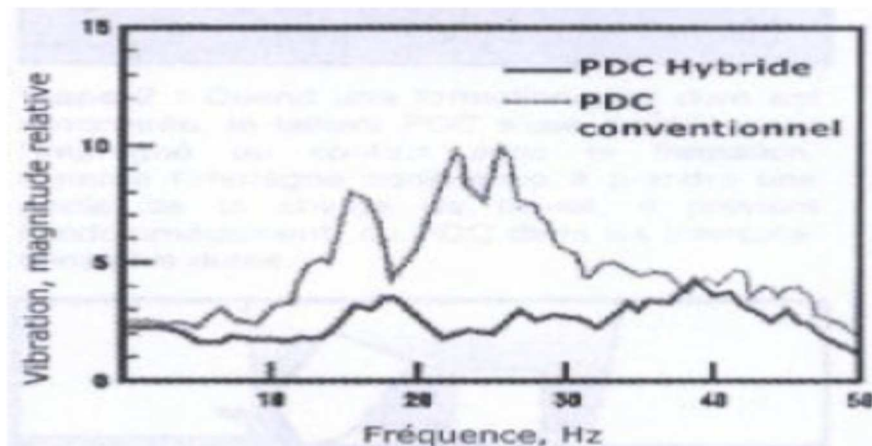


Figure 1.36 : Limitation de la vibration axiale [11, 5].

2. Contrôle du torque :

Pour minimiser les effets du torque sur la résistance à l'usure de l'outil, les fabricants des outils PDC hybrides s'arrangent pour placer chaque imprégné à une distance précise de la pointe du taillant PDC qu'il protège. Cet emplacement produit un plus grand degré de contrôle du torque que sur un outil PDC conventionnel.

Au dessus d'un niveau de vitesse de pénétration, les imprégnés servent de contrôleur de pénétration. En effet, pour une formation donnée, le torque est principalement fonction du poids sur l'outil et de la profondeur de coupe. En limitant la pénétration, les imprégnés situés

à l'arrière du taillant PDC servent ainsi à éliminer les pics de torques élevés souvent rencontrés dans les formations dures et non homogènes.

Le contrôle du torque est particulièrement important dans les applications de forage directionnel avec moteur PDM (positive displacement motor). Si le torque généré par l'outil PDC excède le torque maximum fixé pour le PDM, le moteur calera, ce qui à son tour accroît le torque réactif dans la BHA lequel peut entraîner la perte de l'angle du « tool face » et causer du retard dans le forage.

Une alternative pour résoudre les problèmes de torque élevé est d'utiliser un outil PDC moins agressif qui produit un changement donné de poids sur l'outil, cependant cette approche permet d'obtenir un torque maximum plus bas mais en sacrifiant la vitesse d'avancement. Les outils PDC hybrides permettent de résoudre ce problème en maintenant l'efficacité des paramètres opérationnels en réduisant les pics de torque.

3. Protection des taillants contre l'usure par abrasion :

Parce que les cutters imprégnés contiennent du diamant naturel dans les éléments de coupe, ils peuvent jouer un rôle important dans la protection des taillants PDC dans les forages avec intercalations de formations dures et abrasives. Chaque imprégné fait office de partenaire dans le partage de la charge de travail. Par suite de ce partage, les taux d'usure du PDC sont réduits dans les sections des formations plus longues dures, plus abrasives, résultant à une plus longue durée de vie des structures de coupe. Les illustrations ci-contre (Figure 1.37) montrent le concept du partage de la charge de travail par les taillants.

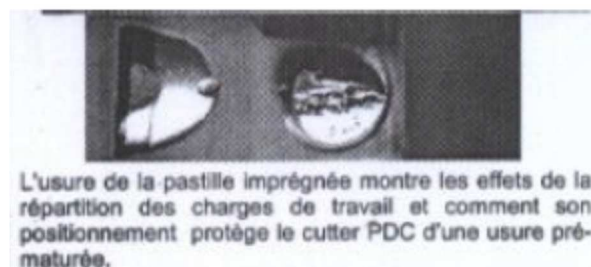
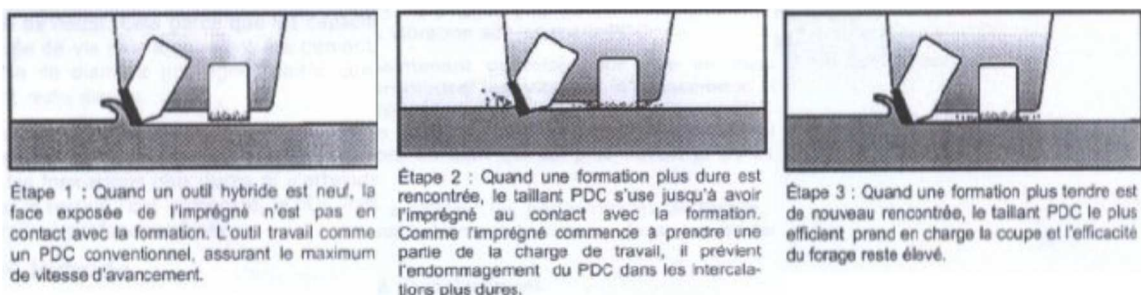


Figure 1.37 : Concept du partage de la charge de travail par les taillants. [11,5]

Les imprégnés produisent un moyen de protection supplémentaire des surfaces critiques du diamètre de l'outil. Les applications de forage directionnel au moteur « steerable » peuvent transmettre des charges latérales considérables sur un outil et exposer les « gauge cutters » à des dégâts par impact. Les imprégnés produisent une mesure supplémentaire de protection en maintenant une capacité effective de coupe aux sections du diamètre.

4. Diminution du nombre de taillant :

Dans la conception d'un outil, il y a toujours un compromis entre la vitesse de pénétration et la durée de vie de l'outil. Pour forer une formation plus dure, un outil peut être conçu avec un nombre élevé de taillants de travail avec pour objectif d'assurer une certaine durée de vie. Cependant, cette approche est au détriment de la vitesse d'avancement. De même, un outil peut être dessiné avec un nombre réduit de taillants plus agressifs. Chaque taillant accepte alors plus de poids (charge axiale) et produit une coupe plus profonde, la vitesse d'avancement est plus importante mais la durée de vie se trouve diminuée.

Par rapport aux outils PDC conventionnels, les outils hybrides permettent un compromis plus favorable entre la vitesse d'avancement et la durabilité de l'outil. Cela parce que les capacités à forer des formations plus dures ou à maintenir une durée de vie plus longue ont été démontrées à travers la stratégie du positionnement de la pastille de diamant imprégné (plutôt que par addition de taillants PDC), ainsi la vitesse d'avancement reste élevée.

Pour forer à vitesse d'avancement équivalente, un outil PDC hybride aura besoin approximativement de 10 à 15% de poids supplémentaire sur l'outil par rapport à son équivalent non-hybride. Cependant le non-hybride ne forera pas les formations plus dures ni n'atteindra la profondeur forée du PDC hybride.

Les performances sur le terrain l'ont démontré, le PDC hybride est plus rapide pour un même terrain traversé et une même profondeur forée.

5. Evolution dans la conception du PDC hybride :

Lorsque les outils PDC hybrides ont été introduits, le phénomène de vibration latérale (bit whirl) était méconnu ainsi que les effets nuisibles des vibrations sur les outils PDC.

L'emplacement des pastilles imprégnées est maintenant optimisé pour être en mesure d'apporter le maximum de protection sans compromettre les vitesses d'avancement. Par l'utilisation d'emplacement précis des pastilles imprégnées pour protéger les taillants PDC et accroître la durée de vie (plutôt que de surcharger les faces de l'outil de cutters PDC

supplémentaires), le concepteur a toute latitude pour développer un outil qui est ouvert et agressif, donc plus rapide.

Depuis l'apparition des outils PDC hybrides, pour améliorer les performances de forage, les pastilles imprégnées subissent de constantes modifications notamment dans les secteurs suivants :

- Analyse du placement en termes de nombre et d'emplacement.
- Surface de couverture des pastilles imprégnées.
- Hauteur au dessus de la formation (exposition).
- Forme.
- Composition.

1.7. Classifications IADC

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

- Le premier caractère (D, M, S, T, O) définit le type d'élément de coupe : diamant, PDC et corps fritte, PDC et corps acier, TSP, autres types.

D pour les outils diamant naturel à corps fritté ; **M** pour les PDC à corps fritté (alliage à base de carbure de tungstène) ; **S** pour les PDC à corps acier ; **T** pour les TSP à corps fritté (alliage à base de carbure de tungstène) ; **O** pour les autres types.

- Le deuxième caractère (chiffre de 1 à 9) définit le type et la forme générale du profil.
- Le troisième caractère concerne l'hydraulique en général.
- Le quatrième caractère (chiffres de 0 à 9) définit la taille des éléments de coupe et leur densité sur l'outil.

Les outils au diamant sont très utilisés dans les forages profonds dans lesquels les temps de manœuvre sont très longs. Ce sont des outils coûteux. En outre, le volume de recherches effectuées au sujet de ces outils semble avoir été beaucoup plus faible que celui relatif aux outils à molettes. Leur forme et leur mode d'utilisation sont très empiriques. L'apparition des outils au carbure à roulements étanches et paliers lisses a restreint leur domaine d'application. L'intérêt de ces outils réside dans le fait que leur durée de travail n'est pas limitée par la tenue

des roulements. Par contre, leur principe de fonctionnement est totalement différent de celui des outils à molettes classiques et leurs domaines d'application sont plus limités.

1.8. OUTILS SPECIAUX

Des outils spéciaux peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes particuliers de forage. Ce sont les outils à lames. L'outil à lames est pratiquement abandonné à l'heure actuelle. Il était destiné au forage des terrains très tendres et homogènes. Son principal inconvénient était de nécessiter un couple important et une grande vitesse de rotation, ce qui crée un risque certain de rupture du train de tiges.

1.9. Les influences sur le ROP

1.9.1. Impact de paramètre mécanique sur le ROP :

Pour les outils diamants, il est important de respecter les paramètres indiqués par le fabricant car les efforts s'appliquant sur l'outil ont été pris en compte pour le réaliser.

En règle générale [5, 6], ne pas dépasser 500 Kg de poids sur l'outil par taillant PDC de ½" (13 mm) actif (c'est à dire participant activement à la destruction de la roche, ne pas compter les taillants de grande taille servant à maintenir le diamètre) ; ceci fait approximativement 12 tonnes sur un outil 6" comportant 9 lames et 25 PDC actifs de 13 mm.

Pour les outils à diamant naturel, le poids est un paramètre important. Par contre les outils PDC, la vitesse de rotation est le paramètre le plus important, c'est pour cela qu'il est important de ne pas appliquer tout de suite des poids trop importants quand l'outil est encore neuf et donc très agressif et fragile.

Influence des formations sur les paramètres utilisés :

- **Roches abrasives** : privilégier le poids et réduire le ROP (augmentation de la profondeur de coupe diminuer le nombre de révolutions par mètre et diminuer d'autant le trajet total que les taillants auront à faire dans la roche abrasive).
- **Roches compactes** : et/ou plastiques : garder un poids suffisant mais augmenter le ROP (zone de proportionnalité) ; dans les roches non abrasives (carbonates, argiles, évaporites), la vitesse n'endommage pas notamment la structure de coupe mais influence très favorablement les coûts de forage.

1.9.2. L'influence de paramètre hydraulique sur le ROP

Pour refroidir correctement les diamants et éviter de les 'brûler', il est important d'avoir un débit de circulation important [11, 5].

Le respect d'un débit de circulation élevé est prépondérant pour ce type d'outil tout d'abord pour refroidir les taillants et ensuite pour nettoyer le front de taille.

1.9.2.1.Effet du nettoyage du front de taille sur le ROP

Comme pour les outils à molettes, l'évacuation des déblais de front de taille a une très grande influence sur le ROP. Avec les PDC [11, 5], dans les formations tendres, il est préférable d'augmenter le débit plutôt que la vitesse du jet de boue à la sortie des duses. Avec une boue à l'huile ou dans certains types d'argiles, on prendra des valeurs plus faibles. Dans des formations plus dures, de la boue à l'eau, une puissance de 3 à 5 HP/in².

La notion de puissance hydraulique par in² de trou est commode à utiliser mais ne recouvre pas de réalité particulière ; un bon design hydraulique (radiale) avec si possible une duse par lame ou une duse pour deux lames et des lames suffisamment hautes (pour éviter un colmatage prématuré aux reprises de fond ou au changement brusques de formations), doit être préférée. En effet, un petit outil sera toujours mieux nettoyé qu'un gros du fait de la décroissance rapide des vitesses de fluides dès que l'on s'éloigne notablement des duses (tant verticalement que rapidement).

Par ailleurs, l'utilisation de duses dont le diamètre est à 12/32 doit être évitée à cause du risque de bouchage de telles duses par les débris divers qui se trouvent dans la boue en forage réel (bacs sales ou graviers dans les tiges, cuttings (déblais) pénétrant en circulation inverse lors des ajouts de tiges...).

Il faut savoir que le ou les passages d'eau colmatés lors du forage (souvent suite à une obstruction des duses) ne se débouchent jamais et finissent par arrêter l'outil complètement par compaction des déblais dans les passages d'eau correspondants ; Ceux-ci arrivent alors rigoureusement au raz de la face de l'outil, empêchant toute pénétration des taillants.

1.9.2.2.Effet des caractéristiques de la boue sur le ROP

Les effets de la densité, de la filtration, de la viscosité et de la teneur en solides sur le ROP sont similaires à ceux des outils tricônes.

Pour les outils à diamants naturels [11, 5], comme pour les outils à molettes, la boue à l'huile a un effet plutôt néfaste sur le ROP, du fait du mode de destruction de la roche (la roche tend à passer sous les diamants rendus plus glissants plutôt que d'être entraînée par eux...).

Par contre, la boue à l'huile a tendance à améliorer les performances des PDC et des TSP (lorsque ces derniers travaillent à la façon des PDC en mode cisailant).

Cependant, dans le cas précis des outils PDC [5, 6], le processus de destruction de la roche par cisaillement est moins sensible à la pression différentielle, car les fluides passant plus rapidement sous la surface du fond par l'arrière des PDC permettant l'équilibrage des pressions de part et d'autre du déblais (la fissure de décollement du déblais se fait dans le sens de déplacement du taillant contrairement au cas du picot où le déblais progresse en sens inverse du picot et être maintenu).

La boue à l'eau a tendance à favoriser le bourrage des PDC dans certains types d'argiles.

1.10 Conclusion

De nombreux facteurs affectent la vitesse d'approfondissement du forage tels que :

- la nature de la roche, sa fordailité, sa tendance à dévier, son abrasivité ;
- Le type d'outil utilisé pour détruire ces roches ;
- Le poids et la vitesse de rotation de l'outil ;
- Les caractéristiques du fluide de forage utilisé pour nettoyer le front de taille, etc.

L'ensemble de ces facteurs définissent les paramètres du forage. La connaissance et l'utilisation des paramètres de forage optimaux seront donc déterminantes d'un forage performant au niveau du temps, et du coût opérationnel.

Chapitre 2

Optimisation des paramètres opérationnels selon la méthode de MSE et se Taguchi

Chapitre 2.

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les modèles mathématiques pour améliorer le taux de pénétration utilisés dans le domaine de forage pétrolier comme la méthode de l'énergie mécanique spécifique MSE, ainsi que quelques d'autres méthodes d'optimisation modernes, tels que les plans d'expériences en particulier. On va baser dans le travail actuel sur la méthode de Taguchi.

2.2. Etude bibliographique des modèles d'optimisation

Tant en recherche qu'en industrie de nouvelles techniques et machines sont en train de se développer pour perfectionner la procédure de forage. Pour atteindre ce but de nombreuses études ont été portées sur le concept d'énergie spécifique mécanique (E_s), avec d'autres méthodes d'optimisation. Afin d'apercevoir l'efficacité de ce concept il faut faire une enquête approfondie de la littérature et les résultats de recherches antérieures.

Les recherches de Teale [12] en 1965, sont des premières et des plus importantes études réalisées dans ce cadre. L'objectif de ces recherches est la minimisation de E_s pour le forage maximale possible et l'obtention d'un taux de pénétration maximal. Teale souligne que la fragmentation des débris en " fragments plus petits que nécessaire "pourrait avoir un effet disproportionné sur l'énergie nécessaire au forage d'un volume donné, car les roches brisées en morceaux plus petits nécessitent plus d'énergie, par contre la consommation d'énergie réduite lorsque les roches sont brisées en morceaux trop gros. Les résultats obtenus des tests de cette théorie et a constaté que la E_s comparée à la vitesse de pénétration entraînait soit un rendement minimum, soit un point de rendement décroissant.

Pessier et la Fear [13] ont élaboré la méthode d'énergie mécanique spécifique qui a été développé par Teale. Ils ont effectué des tests de simulation par l'ordinateur et des tests dans le laboratoire afin de quantifier et de développer un modèle équilibré d'énergie de forage sous pression hydrostatiques. Ils ont prévenu d'une équation (2.1) d'énergie mécanique spécifique et ils ont trouvé de meilleures méthodes d'identification pour résoudre les problèmes des outils de forage, qui sont plus rapides et fiables en surveillant continuellement E_s et μ , comme dans l'équation (2.2).

$$E_s = \text{WOB} \left(\frac{1}{A_B} + \frac{13,33 \mu\text{N}}{D_B \text{ ROP}} \right) \quad (\text{Eq 2.1})$$

$$\mu = 36 \frac{\text{TOR}}{D_B \text{ WOB}} \quad (\text{Eq 2.2})$$

Dans le contexte de la recherche dans le même domaine, Fear [14] a quantifié les paramètres de forage contrôlables pour observer les effets sur la performance de ROP basée sur la similitude de formation. Il a estimé l'effet des paramètres de forage contrôlables sur le comportement de forage. Les sections de l'outil de forage ont été subdivisées en sous-sections afin de minimiser la variation de ROP en raison de l'état de l'outil.

Le premier test utilisant la E_s comme métrique a été fait en 1997, par Ersoy et Waller. Leur étude a été basé sur la comparaison de la taille des débris de forage sur trois types de bit ; un foret à picots PDC, un foret imprégné de diamant et un hybride. Les résultats de test a été montré que l'outil PDC produit des particules de tailles plus grandes que l'outil imprégné de diamant, ça c'est logique, car une plus grande taille physique des épingles par rapport aux diamants imprégnés qui permet au bit de mieux moudre, ce qui conduit à une ROP plus grande. Au cours des tests ils ont observé que l'augmentation du poids entraîne une augmentation de ROP, jusqu'à un point où un poids plus élevé entraîne un blocage, pas une augmentation de ROP. Ils ont également observé qu'une énergie mécanique spécifique très faible pouvait être obtenue avec un poids optimal sur l'outil qui assure un bon compromis entre la production régulière de débris et l'usure équilibrée de l'outil.

Sur le même niveau, et aussi en 1997, Huang et Wang ont développés un modèle expérimental selon les tests de forage. Ont été mis en point une équation pour calculer l'énergie spécifique requise pour couper le trait de scie. Les testes montrent qu'à très faible poids sur l'outil, le niveau d'énergie était dominé par le frottement, et que l'augmentation du poids sur l'outil correspond à un couple important et à une énergie spécifique plus faible. Les résultats de cette étude n'ont pas indiqué qu'il existe un poids optimal sur l'outil qui donne une énergie spécifique optimale.

Un nouveau travail d'Ersoy en 2003 dans le but d'atteindre la pénétration optimale de foret. Il a évalué l'efficacité de plusieurs types de coupe de la roche en utilisant le E_s , y compris le sciage, le découpage, l'excavation et le forage. Il a montré qu'un débit élevé est associée à une faible E_s jusqu'à une certaine limite, ou une nouvelle augmentation du taux d'alimentation

entraîne une diminution minimale de l' E_s . Les résultats de ce travail confirment qu'une très grande profondeur de coupe a également conduit une usure excessive de l'outil.

Les procédés conventionnels sont déjà très bien maîtrisés mais les procédés et les techniques modernes sont encore en cours de se développer. Plusieurs études ont été réalisées, afin de mettre au point des techniques sophistiquées d'enregistrement de trous et d'évaluer l'efficacité des techniques de forages empiriquement. Grâce au développement scientifique, une nouvelle génération d'innovations ont été apportées dans le domaine de forage utilisant le E_s pour améliorer la conception des outils et des plates-formes, ainsi que perfectionner de nombreux autres paramètres.

Dans ce contexte, Caicedo et Calhoun ont présenté en 2005, une nouvelle technique pour prédire la vitesse d'avancement d'un outil selon le E_s . Pour prouver l'efficacité de cette technique, des essais en temps réel ont été réalisés. Le concept proposé a été validé expérimentalement avec succès.

Un autre travail utilisant E_s , basé sur l'optimisation de la vitesse d'avancement a été réalisé par Dupriest, Koederlitz et Weis, en 2005. Ils ont amélioré le système d'enregistrement des données du forage pour calculer le E_s sur la base des données disponibles à la surface du site du forage. Ils ont examiné l'efficacité de l'opération de forage par la surveillance de la E_s . Les résultats de travail sont utiles pour détecter avec précision les problèmes de forage pour trouver les moyens appropriés pour les limiter ou les éliminer. L'établissement Exxon Mobile a utilisé la surveillance E_s à l'ensemble de son organisation mondiale sur tous les appareils de forage du monde entier, forant environ 4,5 millions de pieds par an.

En 2007, Dupriest, avec Remmert et Witt, ont pu avoir économisé 54 millions de dollars et établi 50 nouveaux records de forage, tout en mettant en œuvre l'un des meilleurs records de sécurité du secteur. Les résultats de leurs travaux ont été contribué à améliorer les dispositifs de surveillance à mesure, et à développer la conception du système Bottom Hole Assembly, ainsi à établir des enregistrements lithologiques basés sur des puits forés précédemment dans une région donnée. C'était particulièrement intéressant au Qatar.

La fiabilité de la méthode a été conduite à des succès à travers le monde entier, au titre d'exemple en Australie les comportements problématiques de forage ont été résolus grâce à la gestion des E_s . Sept puits ont été forés en un temps record dans des régions historiquement difficiles à forer en raison de forages instables. En Allemagne il n'a pas utilisé la surveillance

MSE, cependant a été pu modifier les BHA afin d'améliorer le contrôle des vibrations, ce qui entraîne le perfectionnement du comportement des outils.

Dupriest a souligné en 2009 que la vitesse d'avancement réduite avec la dégradation de la capacité de guidage des outils et le tourbillonnement. Ce problème a été résolu avec succès à l'aide de la méthode de surveillance E_s .

L'un des facteurs importants qui déterminent le comportement de l'outil sont les performances des caractéristiques hydrauliques. En 2008 Armenta a présenté une approche appelée 'Drilling Specific Energy'. Cette approche améliore la méthode de E_s qui a été développée par Teale en ce qui concerne les caractéristiques hydrauliques.

Sur le même niveau, Hussein Rabia [15] a présenté une approche basée sur le principe d'énergie spécifique pour simplifier la sélection de l'outil. L'énergie spécifique (E_s) est définie comme l'énergie nécessaire pour la suppression d'un volume unitaire de la roche. La comparaison de la sélection des bits, sur la base du coût et de l'énergie spécifique, a été faite. Il a indiqué que l'énergie spécifique peut également être utilisée comme un critère pour le choix de type de bit approprié pour une section de trou. L'application potentielle de l'énergie spécifique dans le développement et l'exploration des puits a été étudiée.

Pour comprendre le problème d'optimisation des paramètres de forage et les différentes méthodes de résolutions proposées par les auteurs, il existe deux méthodes d'optimisation fondamentales, une méthode utilisant des modèles analytiques tels que la méthode de Galle et Woods [16], et l'autre méthode basée sur l'utilisation des modèles numériques (statistiques) tels que l'analyse de régression multiple [17].

L'une des premières et des plus importantes études réalisées, en ce qui concerne la détermination optimale de forage, l'étude réalisée par Bourgoyne et Young [17]. Ils ont construit un modèle de taux de pénétration linéaire et ils ont effectué une analyse de régression multiple des données de forage afin de sélectionner le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, et les paramètres hydrauliques tels que la pression, la nature, et le circuit de circulation du fluide de forage. Ils ont analysé les effets de la résistance de la formation, la profondeur, et le compactage de la formation, avec le diamètre de l'outil, et l'usure des bits. Ils ont constaté que la procédure d'analyse par régression peut être utilisée pour évaluer un grand nombre de constantes de l'équation de la vitesse de pénétration. Ils ont noté que les données de plusieurs puits doivent être obtenues pour la régression des évaluations des constantes. Ils ont utilisé les données de 25 puits pour obtenir a_1, a_2, \dots, a_8 constantes. Les résultats de l'analyse montrent

que l'utilisation d'équations d'optimisation relativement simple permet de réduire environ de 10% des coûts de forage. Et voilà l'équation de Bourgoyne et Yong :

$$\text{ROP} = \exp(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j * x_j) \quad (\text{Eq 2.3})$$

La première méthode pour déterminer les techniques optimale de forage a été proposée en 1958 par Speer [18].cette étude appuie sur les interrelations des différents facteurs affectent le taux de pénétration tel que le poids avec la vitesse de rotation et les paramètres hydraulique avec la forabilité de la formation. Il a combiné cinq relations dans un seul tableau pour déterminer la technique optimale de forage à partir d'un minimum de données d'essais sur le terrain.

Parmi les travaux ont été faites dans le but d'améliorer la performance de forage, l'étude de Lummus [19]. Pour une opération de forage performante, Lummus a examiné l'impact des principaux paramètres de forage sur le comportement de forage. Il a également proposé une méthodologie d'optimisation de forage. Lummus a nité que les paramètres hydrauliques sont les deux des facteurs les plus importants qui affectent l'optimisation des opérations de forage. De plus, le matériel de manutention de la boue devrait avoir assez de puissance pour répondre aux exigences.

Graham et Muench [20] sont parmi les premiers chercheurs qui ont mené des évaluations sur les données de forage pour déterminer le poids optimal sur le l'outil et la vitesse de rotation. Ils ont utilisé une méthode d'analyse mathématique pour les coûts liés au forage dans des circonstances optimales. Des expressions mathématiques empiriques ont été établies pour définir la duré de vie de l'outil et la fréquence de forage en fonction de la profondeur, la vitesse de rotation et le poids sur l'outil. L'étude a permis de proposer un poids sur l'outil et une vitesse de rotation optimaux afin de minimiser les coûts total dans toutes les conditions de forage.

Sur le niveaux d'optimisation des paramètres de forage, les travaux de Galle et Woods [16] ont devenu une référence important de recherche. Ils sont les premiers auteurs qui ont travaillé sur la modélisation du taux de pénétration d'un outil tricône. Ils ont fondé un modèle mathématique combine les effets des paramètres d forage. Les graphiques et les procédures des applications sur le terrain ont été produits pour déterminer le meilleur rapport de poids et de la vitesse de rotation. Ils ont supposé une relation du taux d'usure de la dent en fonction du

temps par rapport à l'inverse du poids du bit et le diamètre du trépan. La vitesse de forage en fonction de WOB et RPM est présentée suivant l'équation (2.4).

$$\frac{dF}{dt} = C_{fd} \frac{\bar{W}^k r}{a^p} \quad (\text{Eq 2.4})$$

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

$$a = 0,028125 h^2 + 6,0 h + 1 \quad (\text{Eq 2.5})$$

$k = 1.0$ (pour la plupart des formations, à l'exception des formations très tendres, 0.6 pour des formations très tendres), $p = 0,5$ (pour la dent de type auto-affûtage ou déchetage)

Galle et Woods ont également défini les équations des taux de forage et de la durée de vie respectivement (Eq 2.6) et (Eq 2.9).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A_f} \frac{i}{am} \quad (\text{Eq 2.6})$$

Ou

$$i = N + 4,348 \cdot 10^{-5} \cdot N^3 \quad (\text{Eq 2.7})$$

$$m = 1359,1 - 714,19 \log_{10} \bar{W} \quad (\text{Eq 2.8})$$

$$B = S \frac{L}{N} \quad (\text{Eq 2.9})$$

De nombreux chercheurs ont adopté le modèle de Galle et Woods afin de développer une politique d'optimisation des paramètres mécaniques de forage, comme Lubinski [21], qui a exploité ce model pour interpréter les relations mathématiques de poids et de la vitesse de rotation pour minimiser le coût.

Dans le même cadre, Bingham [22] a proposé une équation du taux de pénétration basée sur des données empiriques. Il a montré que l'équation du taux de pénétration est une fonction du poids appliqué sur l'outil et de la vitesse de rotation, avec le poids de seuil a été supposé négligeable. L'exposant du poids de bit, a_5 a été déterminé expérimentalement dans les conditions fréquentes comme suit.

$$R = K \left(\frac{WOB}{D_b} \right)^{a_5} N \quad (\text{Eq 2.10})$$

D'autres études ont été élaborées, notamment celle qui a réalisé de Reed [23] dans le but de l'optimisation les paramètres mécaniques et hydrauliques de forage. Reed a développé un modèle de forage optimal en fonction du poids et de la vitesse pour minimiser les coûts opérationnels. L'objectif principal de travail est non seulement l'optimisation du poids et de la vitesse mais aussi la conception et le traitement de la boue.

Young [24] a réalisé un système informatique pour contrôler le poids sur l'outil et la vitesse de rotation. Il a développé quatre équations : du poids, de la hauteur de la dent d'outil, du débit en fonction de la vitesse de rotation de l'outil, et de taux d'usure de la dent. Les résultats offrent des solutions optimales des pour une meilleure opération de forage.

Guo XZ [25] a décrit une analyse théorique de la fonction objective de pénétration et de coût, et il a présenté la méthode de recherche des paramètres optimaux de forage. Le modèle utilisé dans ce travail est essentiellement la modification de modèle de Young. Il examiné les caractéristiques et l'importance pratique de la combinaison d'un graphe iso-coût, et la détermination des résultats économiques pour chaque combinaison de poids et de la vitesse d'outil et fournir une base scientifique pour modifier les paramètres de forage.

Wilson et Bentsen [26] ont été développé trois méthodes d'optimisation du poids sur l'outil et de la vitesse de rotation. La première méthode basée sur la détermination du Point d'optimisation pour le coût le plus bas. La deuxième méthode définie l'intervalle d'optimisation proportionnel a l'intervalle de sélection des couts bas. La troisième méthode possède un multi-Intervalle d'optimisation pour minimiser une série d'intervalles des coûts. Les résultats montrent que le modèle peut avoir comme une référence pour forage performant en termes de coûts et de comportement.

Dans le même contexte, Akgun [27] a étudié les paramètres de forage contrôlables qui affect le taux de pénétration. La boue, le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, et le type de l'outil sont les paramètres de forage contrôlables étudiés. Une sélection appropriée des paramètres a été signalée pour améliorer le taux d'avancement de manière significative. Un concept de «technique limite» de la vitesse de forage a été introduit dont la vitesse a une limite ne peut être la dépassée sans risquer la sécurité des opérations de forage. Les paramètres WOB et RPM doivent être à des valeurs maximales pour les coûts opérationnels minimaux et pour assurer la stabilité de l'outil. Le débit de la boue doit être sélectionné à une valeur optimale pour le bon nettoyage des trous.

Une nouvelle approche d'optimisation de forage a été appliquée et vérifiée par Teale, Bratli et Hareland [28]. Des modèles de la vitesse de pénétration (ROP) pour tous les types d'outils ont été élaborées et vérifiés pour minimiser les coûts de forage sur chaque section du trou. Un logiciel utilisant ces modèles permet la simulation de ROP, sous les effets de toutes les conditions opératoires.

Les paramètres hydrauliques jouent un rôle articulaire au cours de forage. Pour comprendre l'implication de ces paramètres dans l'opération de forage, Bizanti et Blick [29] ont effectué des tests sur la vitesse de retrait des déblais du fond du trou. Ils ont utilisé des techniques d'analyse de régression pour indiquer comment le taux d'enlèvement des déblais affecte le forage. Après l'analyse de régression, ils ont présenté les valeurs de R^2 et de F pour décrire le degré de corrélation. Les résultats basés sur les équations de régression développées permettent d'offrir le nettoyage optimal du fond du trou, qui sert à améliorer le taux de pénétration et à minimiser les coûts de forage.

Ozbayoglu et Omurlu [30] ont réalisé une étude pour optimiser mathématiquement les paramètres de forage, afin de réduire les coûts de forage. Ils ont estimé que le poids du bit, la vitesse de rotation, type et l'usure de bit, et les paramètres hydrauliques ont un impact direct sur le taux de pénétration. Une équation analytique des coûts de forage a été définie, cette équation examine un taux de pénétration non-linéaire. Les données réelles des paramètres de forage recueillies sur la littérature ont été optimisées en utilisant les équations de certains modèles mathématiques. Ils ont observé que les coûts de forage ont été réduits jusqu'à quatre fois.

Sur ce plan Maurer [31] a dérivé l'équation de taux de pénétration en fonction des caractéristiques de la roche. L'équation a été fondée sur la condition de «nettoyage parfait» dont tous les débris de la roche sont considérés comme étant retirés entre les impacts de la dent. Une relation entre le taux de forage, le poids sur l'outil et la vitesse de rotation a été obtenue dans la condition que le trou est parfaitement nettoyé. Il a également mentionné que les relations obtenues sont en fonction de la profondeur de forage. L'équation du taux d'avancement a été exprimée sous la forme suivante (Eq 2.11).

$$\frac{dF}{dt} = \frac{4}{\pi D_b^2} \frac{dV}{dt} \quad (\text{Eq 2.11})$$

Où F est la distance forée par outil, V est le volume de roche enlevée, et D_b est le diamètre du bit.

Gelfgat et al. [32] ont publié un livre sur l'analyse et l'optimisation de processus de forage des puits aux États-Unis. Les informations statistiques ont été révélées à partir de puits forés préalablement, et les réglages des paramètres de forage ont été autorisés. Ils ont mentionné qu'on ne peut pas optimiser les processus de forage dans les divers pays en raison de manque d'équipements de travail fiable pour atteindre des opérations de forage performant.

Al Betairi et al [33] ont présenté une étude de cas pour l'optimisation des opérations de forage dans la région du golfe Persique. Le modèle de forage proposé par Bourgoyne et Young [17] a été appliqué dans leur travail, et le système d'analyse statistique a été validé. Ils ont observé que la sévérité de l'effet de colinéarité sur chaque paramètre influe inversement sur le taux de pénétration. La précision de l'estimation du poids et de la vitesse de rotation optimaux est subie en raison de la présence de multi-colinéarité dans le modèle proposé.

Sur le même plan, Reza et Alcocer [34] ont développé un modèle dynamique non linéaire multidimensionnelle des opérations de forage profond. Ils ont appliqué le théorème de Buckingham Pi, ce théorème utilisé pour générer les équations des formes adimensionnelles. Trois équations ont été développées : de taux de pénétration, de taux de ternissement et de taux d'usure des roulements de bits. L'étude reflète les effets des paramètres mécaniques et hydraulique de forage tels que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, le diamètre de bits, diamètre de la buse de bits, les caractéristiques du fluide de forage (densité et viscosité), le débit de circulation et la pression différentielle du fluide de forage, la dureté de la roche, le coefficient de transfert de température sur les données de trois équations. Une méthode d'analyse de régression linéaire a été appliquée. Ils ont défini le taux de pénétration comme indiqué dans l'équation (Eq 2.12).

$$\frac{F}{Nd_p} = C_1 \left[\frac{Nd_p^2}{v} \right]^a \left[\frac{Nd_p^3}{Q} \right]^b \left[\frac{Ed_p}{W} \right]^c \left[\frac{\Delta pd_p}{W} \right]^d \quad (\text{Eq 2.12})$$

Où C_1 , a , b , c , et d sont des coefficients à calculer. Afin de trouver ces coefficients en utilisant les données disponibles.

Warren [35] a présenté un modèle de ROP inclut l'effet de deux facteurs, la génération des déblais et le processus d'élimination des débris. L'équation de taux pénétration a été dérivés sous forme de deux termes, travaillant uniquement avec une parfaite prise en charge de nettoyage du trou. Le premier terme définit le taux maximum de soutien sous l'effet de WOB sans le taux de pénétration de la dent, le second terme compte tenu la pénétration de la dent dans la formation. L'équation a été trouvée pour ajuster les données expérimentales des dents.

Miska [36] a présenté trois équations différentielles qui régissent : le taux de pénétration, le taux d'usure des dents, et le taux de portent de roulement. Les équations données ont été utilisées avec succès pour prédire le taux de pénétration optimal dans certaines conditions principales. Trois conditions ont été énumérés: le nettoyage du font de trou est adéquat, le trépan est correctement sélectionné suivant la formation forée, et la formation est considérés comme homogène.

À partir des années cinquante, l'exploitation des hydrocarbures en offshore se développe face à l'augmentation de la demande énergétique. Les progrès technologies offshores développées en mer ouvrent la porte à l'exploration et l'exploitation dans une grande partie des mers du globe malgré le coût élevé de cette technique. Dans la suit des travaux qui portent sur ce type de forage, Maidla et Ohara [37] ont testé un modèle de forage sur les données de forage en mer et ils ont comparé les résultats avec le modèle de Bourgoyne et Young. L'objectif de travail est de mesurer et choisir l'outil, le poids et la vitesse de rotation des tiges pour réduire les coûts de forage. Ils Ont conclu que le ROP de forages dans la même zone pourrait être prédite sur la base des coefficients calculés à partir des données de forage en résultant des coûts économiques.

De nouvelles méthodes actuellement en développement, sont basé sur l'introduction des éléments d'informatique dans les systèmes de forage.

Pour évaluer les performances d'outil, Wojitanowicz et Kuro, [38] en 1987 ont examinés le comportement de outils, tant sur le plan informatique que sur le plan expérimental. ils ont conclu qu'un poids sur l'outil et une vitesse de rotation optimaux entraîneraient une performance maximale de l'outil, ce qui conduit à un taux de pénétration maximal. Les donnés de mesure des facteurs de performance en temps réel sont utilisés pour calculer les paramètres de forage optimaux.

Parmi les plus importantes réalisations en ce domaine, l'étude de Mitchell [39] en 1995. Mitchell dans son livre a présenté la sélection du poids sur le l'outil et de la vitesse de rotation optimaux. L'identification de la commande de la direction du trou de forage a été considérée à la sélection des paramètres optimaux. Il a également donné la méthode d'étudier la sélection du poids et de la vitesse optimaux.

Cooper et al. [40] ont développé un programme de simulateur de forage. Le simulateur contenait des propriétés pourraient analyser les effets de changement des paramètres de

fonctionnement afin d'optimiser les opérations de forage. Le simulateur possède un algorithme qui détermine le taux de pénétration de forage et le taux d'usure de l'outil.

Dans le même cadre Serpen [41] a réalisé une étude d'optimisation informatisée de forage. Les programmes informatiques ont été développés pour six méthodes d'optimisation. Le travail renferme les méthodes suivantes: la méthode de Galle-Woods, l'approche de l'énergie Constant de forage, l'approche des tests drill-off, l'approche de régression multiple, l'approche de régression multiple modifié, l'optimisation de forage hydraulique. L'étude a pour but de déterminer les paramètres optimisés de forage, ainsi d'aider les ingénieurs de planification pour faire des estimations efficaces des paramètres.

SC Malguarnera [42] a formulé un système d'équations sur les interactions des paramètres de forages. Ces équations sont basées sur les observations dans le laboratoire et sur le terrain. Ensuite les équations ont été intégrées dans les programmes informatiques pour fournir la simulation de course de bits, et l'optimisation de l'état de fonctionnement. Le modèle de forage développé constitue un moyen systématique pour la modélisation mathématique.

Bonet, Cunha et Prado [21] ont analysé le coût opérationnel de forage d'exploitation, pour des formations homogènes. L'objectif principal de ce travail est de trouver les paramètres de forage optimaux pour chaque outil utilisé. Un programme informatique a été conçu pour simplifier l'utilisation de la méthode.

Plusieurs études ont été engagées pour comprendre la manière dont se développent les stratégies et les processus de forage profond. Parmi ces études, celle qui a été réalisée par Wardlaw [43]. Wardlaw a donné la relation entre l'efficacité du forage et le taux de pénétration contrôlée avec la vitesse de rotation, ou le poids sur l'outil. Il a montré que les deux paramètres contrôlables sont manipulés par plusieurs facteurs, tels que la pression différentielle du fond, les caractéristiques de la boue, le débit de circulation, la vitesse du jet et de la conception de l'outil. Les diagrammes donnés ont été utilisés pour la détermination des paramètres de forage optimaux.

De nombreuses études détaillées et efficaces ont été réalisées dans le domaine de l'optimisation de forage, la plupart de ces études vise à réduire les coûts. Au niveau de l'industrie du forage, les premiers travaux n'ont pu bien avancer à cause de la nature des systèmes de mesure et d'enregistrement de données. Outre à cause de manque des moyens de

communications, qui a bloqué les études, et les mettent que dans le cadre de traitement de l'analyse des données de puits.

Les progrès des systèmes de mesure et d'enregistrement, notamment de segment de la communication, qui assure le transfert des données de forage sert à gérer les données disponibles, et soutenir l'optimisation de forage sur une base beaucoup plus fiable.

2.3. L'optimisation de la vitesse d'avancement (ROP)

2.3.1. Optimisation par l'énergie mécanique Spécifique E_s (MSE)

La méthode de l'énergie mécanique spécifique E_s a pour but d'améliorer le comportement de l'opération de forage, tant en terme économique (minimiser les coûts opérationnels), qu'en terme de sécurité (limiter l'usure d'outil).

2.3.1.1. Contexte et objectifs de l'énergie mécanique Spécifique

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

Par définition le founder point [44, 45] est le point où le ROP ne répond plus linéairement avec l'augmentation du WOB. On peut considérer le WOB dans ce point comme le poids optimum.

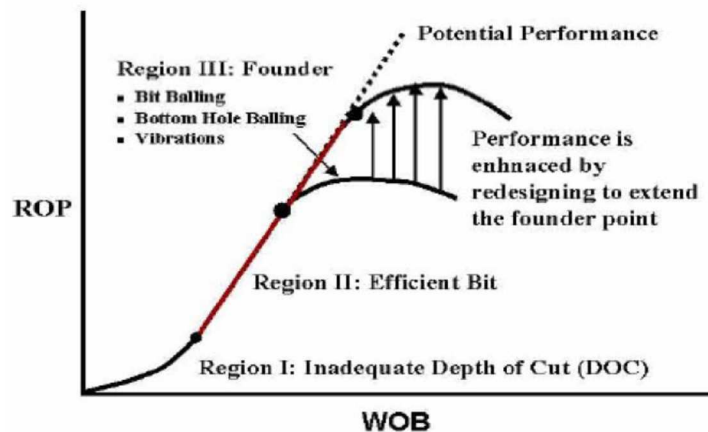


Figure 2.1 : Le founder point. [45, 46]

Théoriquement, il n'y a pas une équation mathématique qui peut expliquer l'effet du founder point, et on ne peut déterminer le founder point que par le test drill-off. Comme indiqué dans la figure 2.2.

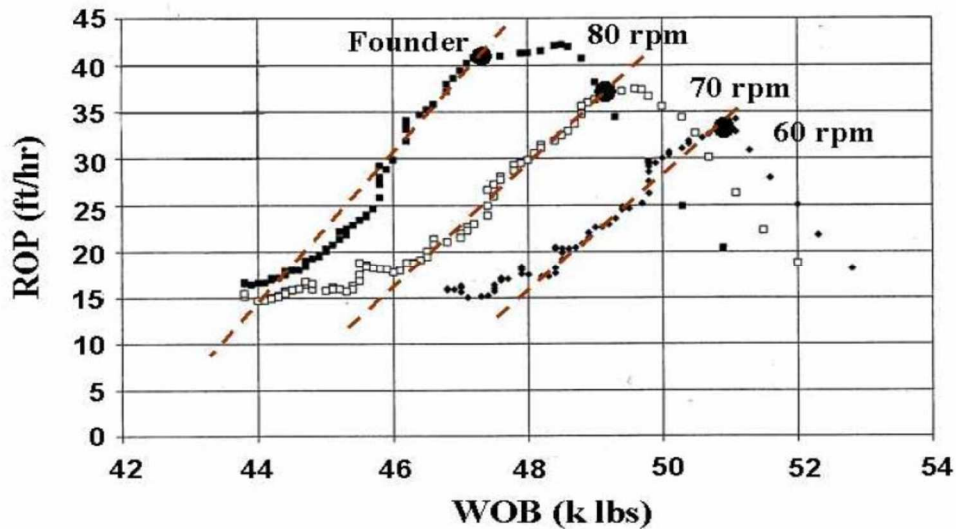


Figure 2.2 : drill-off test [45, 46]

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

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

2.3.1.2. Définition de L'énergie mécanique Spécifique E_s :

L'énergie mécanique spécifique est la quantité d'énergie exigée pour enlever un volume unitaire de roche. [12, 47]

Le forage d'un volume donné demande une certaine quantité d'énergie minimum. Cette quantité dépend de type de l'outil utilisé et de la nature (la résistance à la pression).

Le torque de l'outil est une mesure utile pour prévoir l'énergie requise. Le torque, n'est pas un paramètre à optimiser mais c'est un résultat du à certains WOB et RPM appliqués sur l'outil.

Le degré de bris de la roche pourrait avoir un effet disproportionné sur l'énergie nécessaire au forage, car les roches brisées en morceaux plus petits nécessitent plus d'énergie, par contre la consommation d'énergie diminue lorsque la roche est brisée en morceaux trop gros.

2.3.1.3. Principe de la théorie de l'énergie spécifique E_s :

L'énergie mécanique spécifique est inversement liée avec le taux de pénétration. La figure suivante indique cette relation.

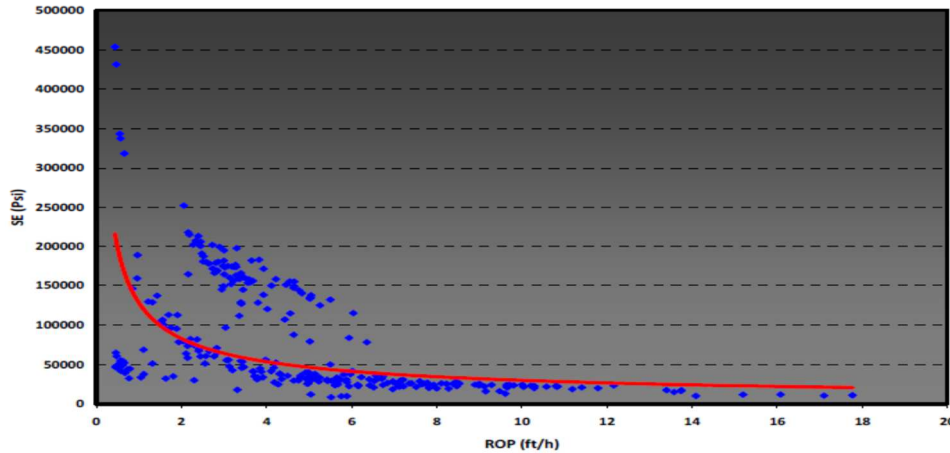


Figure 2.3 : Relation entre E_s et le ROP. [48]

Le paramètre de l' E_s est une mesure utile pour présager la puissance requise (le torque de l'outil et le RPM) pour un type particulier d'outil afin de forer à un ROP donné dans un type de roche donné. La théorie d' E_s n'est pas nouvelle, elle a été employée pour l'évaluation rapide des performances de l'outil pendant des années. L'équation (2.13) montre la relation de l'énergie mécanique spécifique avec les paramètres mécanique. [13,49]

$$E_s = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 \cdot \pi \cdot N \cdot TOR}{A_B \cdot ROP} \quad (\text{Eq 2.13})$$

2.3.1.4. Coefficient de frottement « Coefficient of Sliding Friction » μ :

Le coefficient de frottement μ (Eq 2.2) a été introduit pour exprimer le Torque (TOR) tant qu'une fonction de poids sur l'outil (WOB), ce coefficient sera utilisé par la suite pour calculer les valeurs de l'énergie spécifique imposée dans les cas où les mesures du Torque (TOR) sont fiables Comme suite. [13,49]

2.3.1.5. Efficacité mécanique EFF_M :

L'énergie spécifique minimum est atteinte quand l'énergie spécifique s'approche, ou est presque égale à, la résistance à la compression C_s de la roche [49,12]. L'efficacité mécanique (EFF_M) pour n'importe quel type d'outil est alors calculée comme suit :

$$EFF_M = 100 \cdot \frac{E_{s \min}}{E_s} \quad (\text{Eq 2.14})$$

Ou : Es min est la dureté de la roche

Le couple associé à l'outil pour un type particulier d'outil dans un type donné de roche (CCS) est calculé selon l'équation (2.15), qui est dérivée de l'équation (2.13) et de l'équation (2.14), comme suit :

$$\text{TOR} = \left(\frac{\text{CCS}}{\text{EFF}_M} - \frac{4 \cdot \text{WOB}}{\pi \cdot D_B^2} \right) \cdot \left(\frac{D_B^2 \cdot \text{ROP}}{480 \cdot N} \right) \quad (\text{Eq 2.15})$$

Substituant E_s en termes d'efficacité et de couple mécaniques en fonction du WOB et résolvant l'équation (2.13) pour ROP, le taux de pénétration peut être calculé avec l'équation (2.16), comme suit :

$$\text{ROP} = \frac{13,33 \cdot \mu \cdot N}{D_B \left(\frac{\text{CCS}}{\text{EFF}_M \cdot \text{WOB}} - \frac{1}{A_B} \right)} \quad (\text{Eq 2.16})$$

Au moyen du modèle d'énergie mécanique spécifique de Pessier, on peut définir suffisamment le coefficient de frottement en glissement, l'efficacité, le WOB, et le RPM pour chaque type d'outil en fonction de la nature de la roche à l'outil.

REMARQUE

L'organigramme de la méthode d'utilisation qui concerne le modèle a été joint sur l'annexe 1

2.3.2. L'optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil PDC par l'utilisation du modèle d'Eckel.

L'optimisation du temps de réalisation d'un puits pétrolier peut être effectué par l'ajustement d'un ou plusieurs paramètres, Ceci peut être réalisé essentiellement par :

- la minimisation du prix de mètre foré.
- La minimisation des problèmes de forage.

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

Pour déterminer les paramètres optimaux on utilise le modèle d'Eckel présente par l'équation suivante [50, 51]:

$$ROP = a WOB^b RPM^c \quad (\text{Eq 2.17})$$

a,b,c : des constantes.

Afin de définir les coefficients a, b, c dans chaque K mètres forés on utilise la méthode des moindres carrées. [50]

2.3.2.1. Calcul des coefficients a, b, c à l'aide de la méthode des moindres carrées:

Dans le but de calculer les coefficients a, b, c on procède comme suit:

d'après l'équation Eq 2.17 :

$$\log(ROP) = \log(a) + b \cdot \log(WOB) + c \cdot \log(RPM) \quad (\text{Eq 2.18})$$

La minimisation de la vitesse d'avancement se fait par la minimisation de la fonction log (ROP).

L'erreur commise au point i s'écrit :

$$e_i = \log(ROP_i) - (\log(a) + b \cdot \log(WOB_i) + c \cdot \log(RPM_i)) \quad (\text{Eq 2.19})$$

Afin de simplifier l'écriture on pose $\hat{a} = \log(a)$.

La somme des erreurs quadratiques commises dans l'intervalle [j-k, j] peut s'écrire sous la forme suivante :

$$z_j = \sum_{i=j-k}^j e_i^2 \quad (\text{Eq 2.20})$$

Dont j représente le point dans lequel on optimise les paramètres.

Une condition nécessaire et indispensable pour que z soit minimale dans l'espace de ces coefficient est que :

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial \hat{a}} \sum_{i=j-k}^j \log(ROP_i) - (\hat{a} + b \cdot \log(WOB_i) + c \cdot \log(RPM_i)) = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial b} \sum_{i=j-k}^j (\log(ROP_i) \cdot \log(WOB_i) - (\hat{a} \cdot \log(WOB_i) + b \cdot (\log(WOB_i))^2 + c \cdot \log(RPM_i) \cdot \log(WOB_i))) = 0 \\ \frac{\partial z}{\partial c} \sum_{i=j-k}^j (\log(ROP_i) \cdot \log(RPM_i) - (\hat{a} \cdot \log(RPM_i) + b \cdot \log(WOB_i) \cdot \log(RPM_i) + c \cdot (\log(RPM_i))^2)) = 0 \end{cases}$$

RPM_i, WOB_i et le ROP_i sont les paramètres mécaniques appliquées et la vitesse d'avancement obtenue pour chaque mètre foré dans un puits voisin et ils sont connues à partir de l'enregistrement instantané des paramètres (mud logging).

Alors on a 3 équations et 3 inconnues, on résout ce système pour calculer les coefficients a,b,c qui définissent l'équation de l'rop en fonction de l'rpm et du wob dans l'intervalle [j-k, j] :

$$ROP = a_j \cdot WOB^{b_j} \cdot RPM^{c_j} \quad (\text{Eq 2.21})$$

Et de-là on définit les paramètres optimaux qui nous permettent d'avoir la vitesse d'avancement optimale au point j :

$$ROP_{opt j} = a_j \cdot WOB_{opt j}^{b_j} \cdot RPM_{opt j}^{c_j} \quad (\text{Eq 2.22})$$

Dont:

$$WOB_{opt j} = \min_{j-k+1 \leq i \leq j} (WOB(i)) \text{ si } b_j < 0$$

$$WOB_{opt j} = \max_{j-k+1 \leq i \leq j} (WOB(i)) \text{ si } b_j \geq 0$$

$$RPM_{opt j} = \min_{j-k+1 \leq i \leq j} (RPM(i)) \text{ si } c_j < 0$$

$$RPM_{opt j} = \max_{j-k+1 \leq i \leq j} (RPM(i)) \text{ si } c_j \geq 0$$

$$(i, k) \in \mathbb{N}, \text{ et } j \in \mathbb{N} - [0, k - 1], \text{ et } (i, j, k) \leq n$$

Dont n est le nombre des points sur les quels on fait l'optimisation. [51]

2.3.2.2. Le modèle d'usure d'un outil PDC :

Afin d'optimiser l'usure générée par l'application des nouveaux paramètres on utilise le modèle de Hareland et Rampersad qui définit l'usure des dents de l'outil en fonction des paramètres appliqué et la vitesse d'avancement obtenue et les caractéristique de formation:

$$W_f = W_{f0} - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \quad (\text{Eq 2.23})$$

On suppose que l'usure est linéaire :

$$W_{f0} - W_f = C \cdot (H - H_0) \quad (\text{Eq 2.24})$$

On calcule la constante C à partir des données de forage d'un puits voisin :

$$C = (W_{f0} - W_{ff}) / (H_f - H_0) \quad (\text{Eq 2.25})$$

Alors on a :

$$W_f = 1 - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \quad (\text{Eq 2.26})$$

$$W_f = W_{f0} - C \cdot (H - H_0) \quad (\text{Eq 2.27})$$

$$\text{On suppose : } D_i = W_{ci} \cdot A_{abri} \cdot CS_i \quad (\text{Eq 2.28})$$

$$\text{De 2.26 et 2.28 on a } W_f = W_{f0} - \frac{1}{8} \sum_{i=1}^j D_i \cdot WOB_i \cdot ROP_i \quad (\text{Eq 2.29})$$

Et alors :

$$C \cdot (H - H_0) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^j D_i \cdot WOB_i \cdot ROP_i \quad (\text{Eq 2.30})$$

Dont :

$$j = H - H_0$$

A partir des données de puits voisin et des équations 2.27 et 2.29 on peut déterminer les coefficients. [51]

2.3.2.3. L'optimisation en temps réel :

On a vue précédemment l'optimisation des paramètres de forage sur la base des données d'un puits voisin, mais le problème dans cette supposition est l'hétérogénéité horizontale de la formation, d'un côté et la variation arbitraire de la profondeur d'une région à une autre d'un autre coté ce qui influe sur les résultats de l'optimisation. Le développement informatique important a permis de construire des processeurs de plus en plus puissant capable d'analyser et de traiter les données très rapidement, ce qui nous permet d'effectué l'analyse des données enregistré dans les mètres précédents en temps réel. Afin d'avoir le plus grand rendement possible on construit un système qui permet d'effectuer le drill off teste dans les premier mètres forés pour choisir les paramètres optimaux, et qui modifie les paramètres appliqué après l'enregistrement d'une variation de la vitesse d'avancement ou du torque, ce qui indique un changement de formation, et appliquer les paramètres adéquats à cette formation.

En pratique, afin de réalisé les meilleurs performances ce système doit être relié à un système de forage automatique afin d'appliqué les paramètres précise. [51]

REMARQUE

L'organigramme de la méthode d'utilisation qui concerne le modèle a été joint sur l'annexe 2

2.3.3. Optimisation du ROP par la procédure drill-off :

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

- Choisir un poids sur l'outil (WOB) de départ et un RPM (le RPM doit être maintenu constant durant le test).
- Forer avec le WOB initial pour quelques minutes pour stabiliser les conditions de fond.
- Bloquer le frein.
- Enregistrer le temps pour forer avec une valeur prédéterminée de ΔWOB , généralement de 2000 à 4000 lbf.
- Calculer le ROP moyen sur le WOB en utilisant la formule suivante

$$ROP = L \cdot \frac{1}{E.A} \cdot \frac{\Delta WOB}{\Delta T} \quad (\text{Eq 2.31})$$

- Répéter les étapes d et e pour établir un graphe.
- Répéter le test drill-off pour différent RPM.

La réalisation du drill-off test se fait manuellement, ce qui le rend un peu difficile à réaliser. Le foreur doit utiliser les courbes enregistré durant le test en sélectionnant le WOB et le RPM correspondant à la valeur de ROP la plus grande. [49]

2.3.4. Méthode d'Arthur Lubinski :

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

Comme le montre les équations (2.32 et 2.33), le ROP est égal à la somme du changement de la longueur de la garniture qui est proportionnelle au changement du WOB. Cette méthode néglige les effets dynamiques et les frottements entre le trou et la garniture [49].

$$ROP = \frac{dD}{dT} + K \frac{dWOB}{dT} \quad (\text{Eq 2.32})$$

$$K = \frac{L}{144.E.A} \quad (\text{Eq 2.33})$$

2.3.5. Méthode d'I.G. Falconer :

Cette recherche utilise le torque et le WOB du fond (TOR, WOB), pour calculer le torque adimensionnel (Eq 2.34) et la dureté apparente de la formation (FORS, Eq 2.35). L'objectif de cette étude est de distinguer entre les effets de l'outil de forage et les effets de la lithologie pendant le forage [49].

$$\text{TOR}_D = \frac{\text{TOR}}{\text{WOB.D}_B} \quad (\text{Eq 2.34})$$

$$\text{FORS} = \frac{5.\text{WOB.RPM}}{12.\text{ROP.D}_B} \quad (\text{Eq 2.35})$$

2.4. Autres méthodes mathématiques d'Optimisation (*optimisation par Plan d'Experiences*)

L'optimisation de forage vise à optimiser les variables contrôlables pendant le fonctionnement de forage tels que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation des bits et les propriétés de la boue afin de réduire les coûts opérationnels et augmenter l'efficacité de forage. L'objectif de l'optimisation des paramètres de forage est d'arriver à la méthode permettant d'améliorer (rationnaliser) la conception de processus de forage.

Un bon nombre des phénomènes complexes et difficile à appréhender et à modéliser, seule la réalisation d'expériences va permettre de résoudre cette difficulté. Sans une méthode systématique et ordonnée il est sans doute que ces expériences vont mener à des obstacles tels que des modèles inapplicables, résultats irraisonnables et décevante, etc.

C'est pourquoi la méthodologie des plans d'expérience est recommandée afin traiter cette problématique.

Cette partie consacré aux notions fondamentales des plans d'expériences, pour mettre en évidence son intérêt, et donner un préface pour que son application au cours des chapitres suivants soit compréhensible.

2.4.1. Principaux avantages des plans d'expériences

Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . [53]

Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $y=f(x_i)$

Les méthodes des plans d'expériences a pour buts :

- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un procédé
- Optimisation des réglages d'un procédé
- Modélisation des réponses étudiées
- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé
- Diminution du nombre d'essais
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs
- Détection des interactions entre facteurs
- Une précision optimum des résultats

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse [54]. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

2.4.2. Les plans de Taguchi

La méthodologie Taguchi de mise en œuvre des plans d'expériences est l'un des outils de la qualité, au même titre que l'Analyse des Modes de Défaillance et l'Étude des Criticités (A.M.D. E.C) ou l'Analyse de la Valeur.

Sa contribution majeure a consisté à combiner les techniques de l'ingénierie et des statistiques pour obtenir une amélioration rapide des coûts et de la qualité. Dans ce but, TAGUCHI propose des plans fractionnaires orthogonaux appelés « tables standards » permettant de résoudre la plupart des problèmes. TAGUCHI considère dans ses plans que la plupart des interactions sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées.

- Objectif de méthode

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

différents opérateurs, etc.





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

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

Graphes linéaires associés à un modèle

La méthode Taguchi est basée sur une représentation graphique du modèle qui distingue 4 groupes de facteurs en fonction de leur difficulté à être modifiés :

- 1- Rond vide : facteurs très difficiles à modifier donc changement de modalité doit être rare.
- 2- Cercle concentrique : facteurs moyennement difficiles à modifier donc changement de modalité doit être peu fréquent.
- 3- Cercle entourant un rond plein : facteurs assez faciles à modifier donc changement de modalité peut être assez fréquent.
- 4- Rond plein : facteurs très faciles à modifier donc changement de modalité peuvent être très fréquent. Les sommets des graphes indiquent les facteurs et les interactions qui sont représentés par un trait entre 2 nœuds (facteurs). Les numéros sur le graphe linéaire sont ceux des colonnes associées aux facteurs et interactions. [56]

Group	Modification	Symbole
1	Difficile	
2	Peu difficile	
3	Facile	
4	très facile	

Exemple de graphe

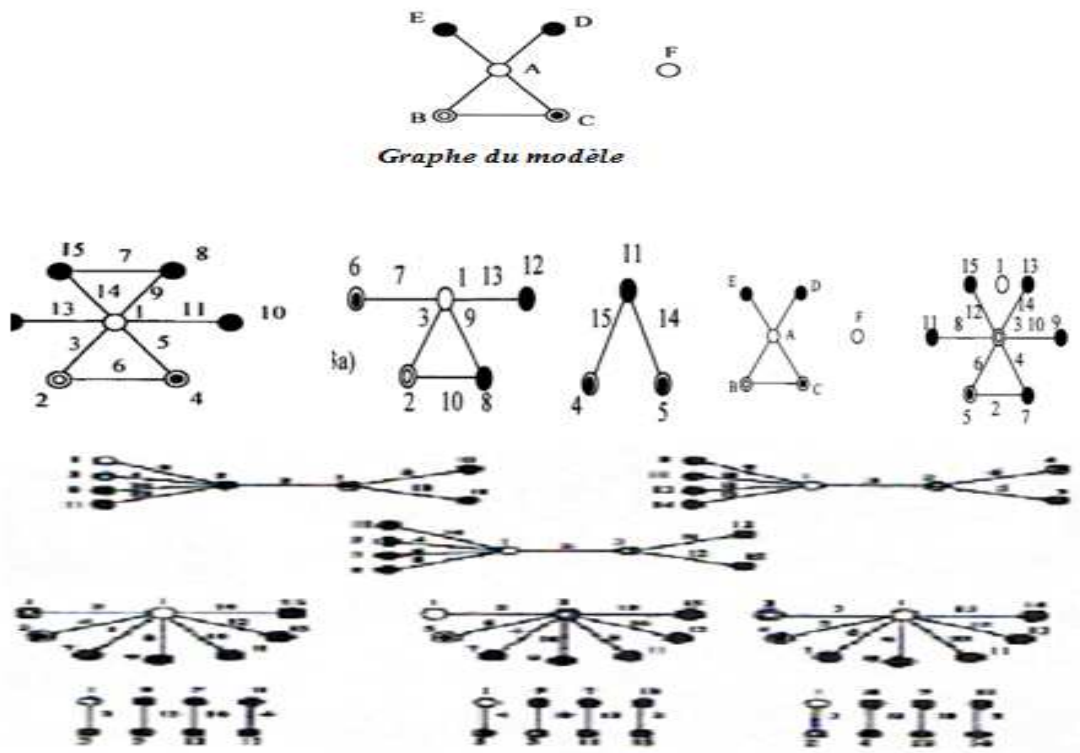


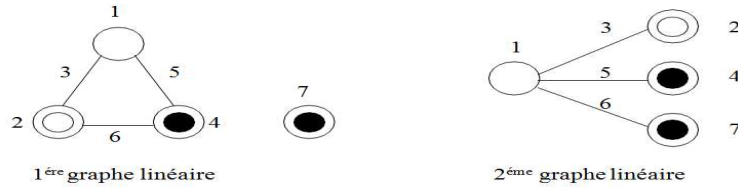
Figure 2.4 : *Graphes linéaires de Taguchi.* [56,57]

Prenons, à titre d'exemple la table L8 (2^7). Cette table comporte 8 expériences, on pourra donc étudier au maximum 7 facteurs, puisque la moyenne consomme 1ddl. [52]

Tableau 2.1 - le tableau orthogonal L8 [52]

n°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
groupes	1	2	2	3	3	3	3

A cette table est associé 2 graphes linéaires.



Ces graphes indiquent sous forme graphique les modèles que l'on peut étudier. A partir des deux graphes deux modèles sont envisageables. [52]

$$\hat{Y} = I + A + B + C + D + AB + BC + AC$$

en plaçant le facteur :

A	dans la colonne	1
B	dans la colonne	2
C	dans la colonne	4
D	dans la colonne	7
AB	dans la colonne	3
BC	dans la colonne	6
AC	dans la colonne	5

$$\hat{Y} = I + A + B + C + D + AB + AC + AD$$

en plaçant le facteur :

A	dans la colonne	1
B	dans la colonne	2
C	dans la colonne	4
D	dans la colonne	7
AB	dans la colonne	3
AC	dans la colonne	5
AD	dans la colonne	6

Triangle des interactions

Avec certaines tables standards, on trouve parfois le triangle des interactions. Ce triangle est particulièrement intéressant, car il indique les alias. Le triangle des interactions de la table L8 est le suivant (figure 2.14) [52]:

	2	3	4	5	6	7
(1)	3	2	5	4	7	6
	(2)	1	6	7	4	5
		(3)	7	6	5	4
			(4)	1	2	3
				(5)	3	2
					(6)	1

Figure 2.5 - Triangle des interactions du plan L8. [52]

Grâce au graphe linéaire, les facteurs ont été placés comme désiré :

$$A \Rightarrow 1 \quad B \Rightarrow 2 \quad C \Rightarrow 4 \quad D \Rightarrow 7$$

Les interactions et les alias se lisent aux intersections entre les lignes et les colonnes. Par exemple l'interaction AB se voit à l'intersection entre la colonne 2 et la ligne (1). La colonne 3 correspond donc à l'interaction AB. L'interaction ABC est confondue avec l'effet du facteur D (intersection entre la ligne (3) et la colonne 4). A partir de ce triangle, on peut réaliser un tableau permettant de définir tous les alias. Ce tableau peut mettre en évidence certaines ambiguïtés sur les résultats. Lorsqu'un doute subsiste, le seul moyen de le lever est de réaliser des essais supplémentaires de façon à désaliaser les effets confondus. [52]

Les différentes tables et leurs propriétés

TAGUCHI propose 18 tables orthogonales, cependant toutes ces tables n'ont pas les mêmes propriétés. Elles peuvent être classées en 3 familles:

- L'étude des interactions est impossible.
- L'étude des interactions est limitée
- L'étude des interactions est possible Le tableau 2.7 présente ce classement. [52]

Tableau 2.2 - Classement des tables standard de TAGUCHI.

	Plan à 2 niveaux	Plan à 3 niveaux	Plan à 2 et 3 niveaux	Plan à plus de 3 niveaux
Etude des Interactions Impossibles	L ₁₂ (2 ¹¹)		L ₃₆ (2 ¹¹ x 3 ¹¹)	
Etude des Interactions Limités			L ₁₈ (2 ¹ x 3 ⁷)	L ₃₂ (2 ¹ x 4 ⁹) L ₅₀ (2 ¹ x 5 ¹¹)
Etude des Interactions Possibles	L ₄ (2 ³) L ₈ (2 ⁷) L ₁₆ (2 ¹⁵) L ₃₂ (2 ³¹) L ₆₄ (2 ⁶³)	L ₉ (3 ⁴) L ₂₇ (3 ¹³) L ₈₁ (3 ⁴⁰)	L ₃₆ (2 ³ x 3 ¹³) L ₅₄ (2 ¹ x 3 ²⁵)	L ₁₆ (4 ⁵) L ₆₄ (4 ²¹) L ₂₅ (5 ⁶)

Ces différentes tables sont consultables dans l'ouvrage de (PILLET) [52].

- *L'étude des interactions est impossible.*

Dans ce type de tables, on suppose que les interactions sont très peu influentes et sont réparties uniformément sur l'ensemble des facteurs. Ainsi dans le cas où elles ne seraient pas nulles, l'erreur d'interprétation se répartira sur l'ensemble des actions du modèle. Ces tables conviennent parfaitement lors d'une première phase de recherche d'extremum dans le but d'identifier les facteurs influents, où la précision du modèle a peu d'importance. L'objectif est un balayage rapide sur un grand nombre de facteurs, de façon à éviter une recherche inutile d'optimum faisant intervenir des facteurs sans influence. [52]

- *L'étude des interactions est limitée*

Ces tables ne permettent d'étudier qu'une interaction bien ciblée. L'utilisation de ces tables est assez proche du cas précédent. Elles sont bien adaptées pour une première phase d'optimisation qui consisterait à déterminer les facteurs influents et leurs interactions. [52]

- *L'étude des interactions est possible*

Pour ces tables, il existe des graphes linéaires et des triangles d'interactions. Ces tables permettent plutôt la définition d'un modèle rigoureux. Elles sont plutôt utilisées pour rechercher une valeur nominale. Une utilisation intéressante est alors de construire un modèle polynomial rigoureux de la fonction objectif sur un domaine bien précisé, puis de se servir de ce modèle pour chercher un optimum. [52]

2.4.3. Autres plans

Plans de surfaces et de réponse (RSM)

Les plans de surface de réponse, ou plans de seconde degré (Goupy, 2006), est une méthode d'optimisation qui a pour principal but l'évaluation des relations pouvant exister entre les différentes réponses, ainsi que les facteurs appelés (X_1 X_2 X_3 ... etc). Plusieurs plans factoriels sont employés par cette technique pour l'analyse des résultats à savoir le plan Box-Behnken et le plan composite centré (Pengpeng, 2014).

Plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux du plan Box-Behnken sont représentés au milieu des arêtes de chacun des côtés d'un cube. C'est un plan qui peut comporter jusqu'à douze essais, auxquels on peut ajouter des points au centre.

Autres Il existe bien naturellement d'autres plans d'expériences pouvant assurer la fonction de

screening. Cependant, dans la majorité des cas, ces alternatives supplémentaires ne possèdent pas les avantages des plans vus précédemment.

2.4.4. Analyse de variance

L'analyse de variance des résultats (*Analysis of Variance*) permet de déterminer quels sont les facteurs dont l'influence est significative à un risque donné sur la caractéristique de qualité.

Elle permet également de déterminer le pourcentage de contribution de chaque facteur sur le processus d'adsorption [Roy, 1990]. Le tableau de l'analyse de variance est représenté par le Tableau 2.8.

Tableau 2.3 : *Analyse de variance* [55]

Source	Degré de liberté (ddl)	Somme des Carrés (SC)	Variance (Va)	F-ratio	(%) Contribution
A	(ddl)A	SCA	SCA/(ddl)A	VA/ VE	SCA/ SCT
B	(ddl)B	SCB	SCB/(ddl)B	VB/ VE	SCB/ SCT
C	(ddl)C	SCC	SCC/(ddl)C	VC/ VE	SCC/ SCT
Erreur	(ddl)E	SCE	SCE/(ddl)E		SCE/ SCT
total	(ddl)T	SCT			

Plus le pourcentage de contribution du facteur est grand, plus son effet sur la réponse est grand.

Le degré de liberté (ddl) indique le nombre de variables indépendantes et qui se calcule de la façon suivante :

$$(\text{ddl})_T = N - 1 ; (\text{ddl})_P = k - 1 ; (\text{ddl})_E = (\text{ddl})_T - \sum (\text{ddl})_P$$

où $(\text{ddl})_T$ est le nombre total de degré de liberté, N est le nombre total d'expériences, $(\text{ddl})_P$ est le degré de liberté de chaque paramètre, k est le nombre de niveaux du paramètre et $(\text{ddl})_E$ est le degré de liberté de l'erreur.

La dernière étape de la méthode Taguchi et les autres plans consiste à prédire et vérifier la caractéristique de qualité (Test de confirmation) en utilisant la combinaison optimale des facteurs. Le rapport (S/B) prédit, noté η_{opt} , en utilisant le niveau optimal des paramètres du processus peut être calculé par la relation :

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (\text{Eq 2.40})$$

Où $\bar{\eta}_i$ est la valeur moyenne du rapport S/B au niveau optimal du paramètre i et k est le nombre de paramètres. [55]

2.4.5. Logiciels des plans d'expériences

Les logiciels des plans d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans particuliers. On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique. Les logiciels des plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tous les domaines d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'isoreponses, pour construire les surfaces de réponses et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer de multiples analyses et de regarder ces données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expériences. [58]

Nous indiquons ci-dessous les principaux logiciels des plans d'expériences et les sites internet correspondants. Quelques uns d'entre eux mettent à disposition des personnes intéressées des versions de démonstration et certains des versions complètes simplement limitées dans le temps [59].

Tableau 2.4 - Principaux logiciels de plans d'expériences. [60]

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

2. 5. Conclusion

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents paramètres possibles, pour optimiser les performances du système étudié en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences.

Ces plans ont été développés au début du siècle par l'anglais Ronald FISHER et le français Jacques HADAMARD. Mais leurs techniques ont peu pénétré le domaine industriel du fait de leur caractère trop théorique et de la complexité de leur mise en œuvre. Une des contributions majeures de G.Taguchi est d'avoir vulgarisé ces techniques en proposant une panoplie de plans standard auxquels sont associés des dispositifs pratiques.

Chapitre 3

Application de la théorie de l'énergie spécifique mécanique, étude de cas

Chapitre 3

3.1. Introduction

Ce chapitre inclut le cas d'étude qui contient l'application du modèle de Pessier de l'énergétique spécifique, tel qu'on l'a présenté dans le chapitre précédent.

On a donc résumé brièvement les programmes de forage du puits OMM-302 Bis, ainsi que son fonctionnement, sa description géologique et son emplacement. Ce puits est situé dans la zone A1 du champ de Hassi Messaoud.

L'application de l'optimisation est basée sur les données de paramètres de forage ont été sauvegardées lors de l'opération de forage. [61]

3.2. Objectifs du puits

OMM-302 Bis est un puits de développement vertical a été foré dans la zone 1A du champ Hassi Messaoud. La proposition du puits Bis suit les meilleurs paramètres pétrophysiques du secteur (en particulier dans les D5, D4 et D2) révélés par l'interprétation des journaux de puits OMM302, confirmés par un excellent historique de production.

Le puits a plusieurs objectifs:

- Profondeur finale: 3474 m (3538 m TVD, -3384 m TVDSS)
- Cible: cambrien (R2).
- Pression attendue dans le réservoir: 300 kg / cm²
- Ne dépasser pas le TNP global <5%.
- Atteindre les objectifs d'acquisition de l'exploitation forestière.
- Terminer toutes les opérations en se référant aux normes SONATRACH HSE.

3.3. Situation géographique:

Le gisement Hassi Messaoud est situé à 800 km au sud-est d'Alger, entre les méridiens 5° 30 6° 00 et les parallèles 31 ° 00 et 32 ° 00N (Fig. 1). Il est à 350 km de la frontière algérienne -

tunisienne et à 80 km à l'est d'Ouargla. Le champ Hassi Messaoud est considéré comme le plus grand gisement de pétrole de la province triasique. En raison de sa taille et de ses réserves, il s'agit du plus grand champ pétrolifère algérien et sa superficie est d'environ 2 200 km².

Il est limité de :

- NW au gisement d'Ouargla, Guellala, Benkahla et Haoud Berkaoui.
- SW par le dépôt d'el Gassi, Zotti et El Agreb.
- SE par le gisement de Rhoude-El-Baguel et Mesdar.
- Est par le gisement de Ghadames.

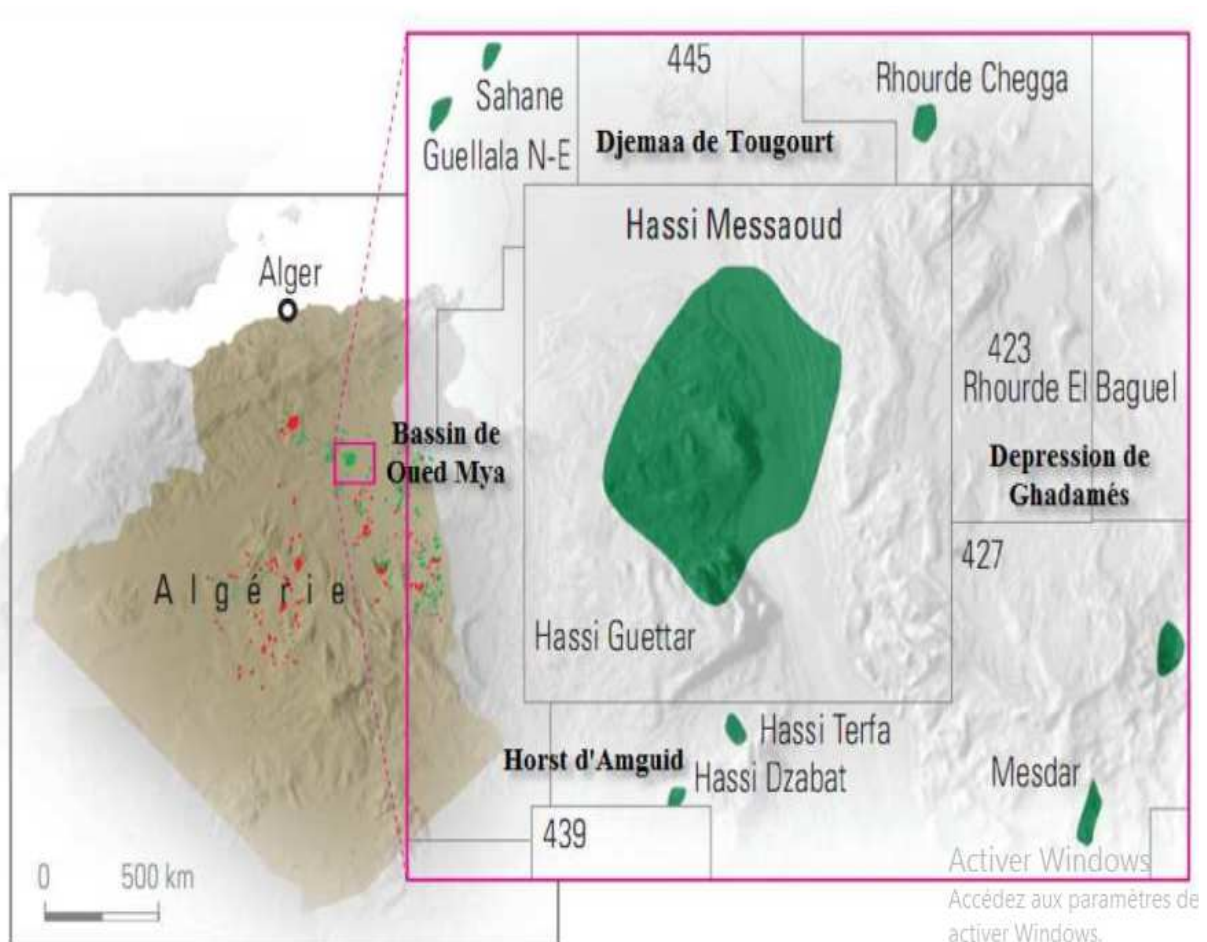


Figure 3.1: Carte de localisation du champ Hassi Messaoud

emplacement de surface	LSA	X=792658.038 Y=130579.695
	Latitude	31*43'55.08000''N
	Longitude	5*47'13.63856''E
	UTM zone 31	X=764 077.023
		Y=3 513 837.983
puits situé dans le système de coordonnées	UTM zone 31 sur le nord du Sahara, Clarke 1880 (Ce système servira de référence dans tous les documents)	
élevations	niveau du sol	143.23m au-dessus du niveau moyen de la mer (AMSL)
	table rotative élévation	10.5m au dessus du sol (AGL)
	table rotative élévation	154m au-dessus du niveau moyen de la mer (AMSL)
puits TD	3474 m TVD	- 3320 m TVDSS

3.5. Programme de la boue:

L'huile INVERMUL est le système de fluide de forage de base et ses procédures d'exploitation ont été conçues pour atteindre les objectifs suivants:

- Assurer un nettoyage efficace des trous pendant le forage du trou 26 "
- Eviter les pertes dans la formation de surface non consolidée.

Une boue à haute viscosité sera utilisée pour percer le trou 26 ". Les risques de forage dans cet intervalle seront principalement dus à un problème de perte totale de circulation dans le sable non consolidé de «Mio Pliocène» et le calcaire de «Carbonate éocène et sénonien». Des pilules LCM et / ou des bouchons de ciment peuvent être nécessaires. À l'approche du point de tubage, la perte de fluide de la boue sera contrôlée et l'YP sera réduit à ± 30 afin de faciliter la mise en place et le scellement du tubage, respectivement. Le travail de ciment supérieur à travers l'anneau sera effectué si nécessaire.

Pour nettoyer les trous, il est recommandé d'utiliser la boue de bentonite. Il faut laisser suffisamment de temps à la bentonite mélangée pour assurer une hydratation complète. [61]

- **Minimiser les ECD** en contrôlant la quantité d'accumulation de solides à faible gravité (LGS) dans le fluide et en optimisant les débits.
- **Fournir des caractéristiques efficaces** de nettoyage des trous afin de minimiser le chargement annulaire des déblais.
- **Sceller efficacement** les zones poreuses, minimiser les pertes de fluide dans la formation et fournir un bon morceau de filtration.
- Éviter d'endommager le réservoir.

Tableau 3.2: *Propriétés de la boue*

Propriétés	36''/26''	16'	12 ^{1/4} ''	8 ^{1/2} ''
système de boue	Bentonitique	OBM	OBM	OBM
pois de la boue (SG)	1.05	1.25	2.02 avant LD2	1.40
Yr, Ib/100 ft ²	40 -60	18 - 24	10 - 14	10 - 12
HPHT FL	AP±20 àTD	<10	<10	<10
ML				
LOGS%	<5	<5	<5	<5
Analyse Hydraulique 3diff Yp	exigé	exigé	exigé	exigé
Débit de la pompe (l/min)	3500	2800	2600	1800

3.6 Contexte géologique:

La Figure qui montre plus de détails à l'Annexe.

3.6.1. Aspect stratigraphique:

Le champ de Hassi Messaoud est aussi large que la mole, ce qui fait qu'une partie importante de la série stratigraphique du Paléozoïque est absente, ce qui élimine tout témoin de l'histoire géologique pendant 230 millions d'années.

3.6.1.1. Paléozoïque:

Les formations paléozoïques recouvrent le socle de manière discordante; c'est la discordance panafricaine. De haut en bas:

A. Cambrian: (3440 m)

Se compose essentiellement de grès hétérogènes, fins à très grossiers, entrecoupés de siltites argileuses laminées, micacées. L'épaisseur moyenne est de 590m.

B. Ordovicien: 3328m

Sur le plan régional, l'ordovicien est composé de plusieurs unités lithologiques aux séries incomplètes. Pour le champ Hassi Messaoud, de haut en bas, nous n'avons que quatre (4) unités lithologiques:

▪ Zone d'alternance: 3378m :

L'épaisseur moyenne est de 20 mètres. L'Alternance irrégulière de grès quartzeux finement argileux et d'argile noire limoneuse et abondance de Tigillites et de quelques Lingulidae (OrdovicianActual), la fraction minérale est composée de glauconite et de sidérite.

▪ Argile d'El Gassi:

L'épaisseur moyenne est d'environ 50 mètres. Cette formation est constituée d'argile limoneuse, douce de couleur noire et verte, rarement de rouge. Cette argile peut être carbonatée ou glauconieuse contenant une faune (Graptolites) indiquant un milieu de dépôt marin. Ceci se rencontre principalement sur les zones périphériques du terrain.

▪ Grès d'El Atchane:

L'épaisseur moyenne varie de 12 à 25 mètres. Cette formation est constituée de grès fin à très fin, allant du grès beige à gris foncé. Ce grès peut être de l'argile avec plusieurs lames d'argile limoneuse.

▪ Quartzite de Hamra: 3324 m

L'épaisseur moyenne varie de 12 à 25 mètres. C'est un grès quartzite fin, gris clair limoneux à beige, avec de rares argiles limoneuses intercalées, micacées et molles de glauconite, d'anhydrite et de plusieurs tigillites.

3.6.1.2. Mésozoïque:**A. Trias: 2779 m**

De manière incohérente, il recouvre le cambrien au centre et l'ordovicien sur les flancs de la structure. Il s'agit d'un résultat très diversifié résultant de la transgression à caractère marin de lagon accompagnée de lave éruptive. Il est divisé en quatre (4) unités:

▪ Trias éruptif:

L'épaisseur varie entre 0 et 92 mètres. Localement, on trouve de la lave éruptive entremêlée de grès de Trias, ce qui indique la présence de plusieurs déversements volcaniques intercalés dans le faciès clastique. Ces écoulements se sont souvent produits dans les vallées hercyniennes.

▪ Grès de Shaly triasique:

Son épaisseur moyenne est de 35 mètres. Il s'agit du premier dépôt du relief paléozoïque et il est divisé en plusieurs unités qui diffèrent selon les réponses de la lithologie et de l'exploitation forestière. Situé, localement sur la lave éruptive remplissant les vallées d'érosion hercyniennes profondes:

Grès supérieur: grès fin avec ciment argileux.

Grès inférieur: composé de grès avec un ciment argileux fin à moyennement abondant.

▪ ShalyTrias:

L'épaisseur moyenne est de 113 mètres. Il est constitué d'argiles dolomitiques ou limoneuses intercalées avec un banc de sel brun-rouge.

▪ SalifereTrias:

L'épaisseur moyenne est de 340 mètres. Joue le rôle de cap rock, il est constitué de banc de sel massif présent en haut, d'intercalations de bancs d'anhydrite et d'argile légèrement limoneux et dolomitique, il est constitué de trois (3) unités:

o SalifereTrias «3» ou «ST3» (3024m): l'épaisseur est de 202 mètres.

À la base des salifereTrias, il est constitué d'un banc de sel massif situé au sommet des intercalations de bancs d'anhydrite et d'argile légèrement limoneux et dolomitique.

o SalifereTrias «2» ou «ST2» (2825m): l'épaisseur est de 189 mètres

Il est constitué d'un banc de sel massif avec des intercalations d'anhydrite et d'argile gypsifère.

o SalifereTrias «1» ou «ST1» (2779m): l'épaisseur est de 46 mètres

Se compose de sels avec une prédominance d'anhydrite et d'argile dolomitique.

B. Jurassique: (1953m)

L'épaisseur moyenne est de 844 mètres. C'est un groupe de grès argileux avec une intercalation de calcaire au sommet (Malm) et d'alternance de faciès lagon et marin à la base (Dogger et Lias).

▪ Lias: (2519m)

L'épaisseur moyenne est de 300 mètres. La transition de Trias à Lias est caractérisée par une zone de marnes dolomitiques appelée "Horizon B" qui est un point de repère sismique. Le Lias est divisé en cinq (5) niveaux distincts intercalés entre eux sur toute l'épaisseur:

Lias Dolomitiques «DL3»: (2749m)

D'une épaisseur de 31 m, il est constitué de marnes grises à longerons de dolomie gris.

SalifereLias «SL2»: (2704m)

Épaisseur de 58 m, il est constitué de sels translucides et de laminae d'argile rouge brun.

Lias Dolomitiques «DL2»: (2645m)

D'une épaisseur de 55 m, il consiste en une intercalation de bancs massifs en dolomite à grain fin, grisâtre avec des lamelles de dolomie légèrement grises.

Salifere Lias «SL1»: (22574m)

D'une épaisseur moyenne de 90 m, il est constitué d'argiles brunes avec des lisses de sel et d'anhydrite blanches.

Lias Dolomitiques «DL1»: (2519m)

D'une épaisseur de 66 m, il est constitué de bancs de dolomie et d'anhydrite avec des lames d'argile et de calcaire.

2) Dogger: (2176m)

L'épaisseur moyenne est de 320 mètres. Le Dogger est divisé en deux (2) formations, le lagon Dogger à la base et le Dogger argileux au sommet.

o Dogger Lagooner: (2281m)

Il est représenté par une série de lagons à la base essentiellement composée d'anhydrite et de dolomite d'environ 210 m d'épaisseur.

o Argiles Dogger: (2176m)

D'une épaisseur de 107 m, il est constitué d'argile molle, de limon avec de fines lames de grès et de ciment de carbonate argileux.

3) Malm: (1953m)

L'épaisseur moyenne est de 226 mètres. Elle se caractérise par des dépôts d'argile et des marnes avec des bancs de calcaire et de dolomite intercalés accompagnés de traces d'anhydrite.

3.6.2. Litho-stratigraphique cambrienne (caractérisation du réservoir):

Cambrian est le principal réservoir de Hassi Messaoud situé à l'ouest des groupes sédimentaires distincts de la lithozone R2). (Figure 3.2). Cette division est basée sur des critères de pétrographie, pétrophysiques et d'exploitation filaire.

L'épaisseur moyenne de Lithozone R2 est de 100 mètres. La lithozone R2 est constituée de grès micacé moyen à grossier mal triés, avec une abondance de ciment argileux et de siltites intercalées. Les stratifications sont souvent obliques.

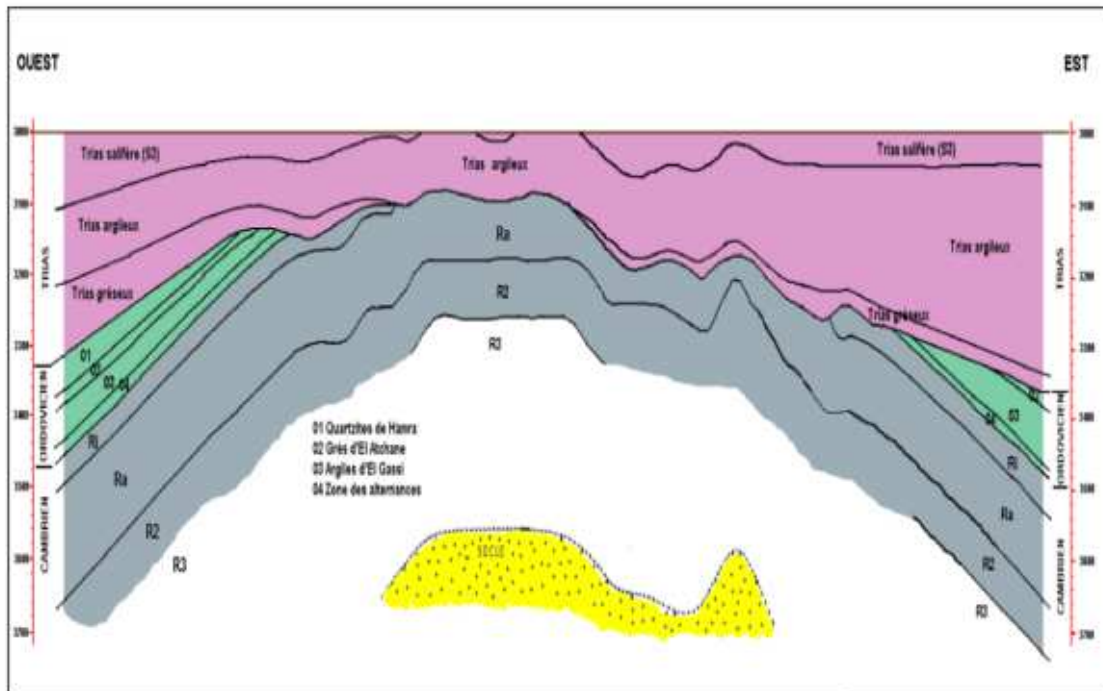


Figure 3.3: Structure du champ de Hassi Messaoud présentée comme un vaste dôme anticlinal plat avec une direction générale nord-est - sud-ouest

3.7. Application de la théorie E_s dans le cas de terrain:

Comme il est décrit dans le chapitre précédent, il existe plusieurs méthodes d'optimisation des paramètres de forage. Pour le travail actuel, on a choisi la méthode d'optimisation de ROP par la théorie Energie Spécifique mécanique (E_s). Cette méthode prend les paramètres hydrauliques comme paramètres optimaux et tente d'utiliser les paramètres mécaniques mesurés à la surface de la cabine de la diagraphie de la boue. Pour vérifier le nouveau modèle d'énergie mécanique spécifique, les données de forage d'une section de 80 m d'un puits vertical ont été utilisées pour calculer les profils de CCS et de E_s avec la profondeur. Les données de forage, y compris le WOB, le régime de la surface, le ROP, et le débit de la boue, ont été enregistrées pour chaque pas de 1 m compris entre 2402 m et 2480 m. Pour plus de détails, voir le tableau A à l'annexe. On a appliqué la théorie E_s dans la section de 12.1/4 "de 2400 à 2481 m qui a été forée par un outil PDC, les paramètres de forage ont été enregistrés dans le tableau 3.3. Tous les paramètres de ce tableau sont enregistrés comme paramètres initiaux.

Tableau 3.3: les données de forage ont été sauvegardées au cours du processus [61]

Profondeur (m)	WOBmin (ton)	WOBmax (ton)	RPMmin (rpm)	RPMmax (rpm)	Rotary Torque (ft.lb)	ROP (m/h)
2402- 2406	2.14	16.55	60.52	80.59	7485.76	6.62
2411	13.4	17.69	79.23	84.28	8806.78	11.54
2416	15.01	18.69	79.45	83.27	8195.03	10.86
2421	13.63	18.99	76.2	83.27	11853.54	6.6
2426	12.98	18.76	45.79	129.81	10845.53	7.34
2431	12.4	17.56	113.69	124.19	10069.42	6.32
2436	14.7	18.21	123.25	123.29	8909.27	6.79
2441	15.1	17.42	116.63	123.31	9187.24	5.84
2446	13.5	17.78	123.25	123.3	8661.6	7.16
2451	12.58	17.74	123.26	124.24	8254.05	7.39
2456	14.25	17.69	123.24	123.29	8886.79	5.87
2461	11.6	18.16	123.26	123.3	8522.15	5.2
2466	12.98	18.65	117.83	129.89	9122.32	6.43
2471	4.77	17.69	123.29	129.89	8677.11	12.98
2476	13.76	17.78	129.61	129.88	8430.38	5.38
2481	13.76	20.43	124.17	129.9	8229.23	5.93

3.7.1. L'analyse des données:

Dans cette section (2402-2481 m), comme le montre la figure (3.4), les données collectées montrent qu'il existe une relation indirecte entre RPM, WOB et ROP. Le ROP est très sensible aux changements de WOB et de RPM. Le WOB appliquée est très bas et inférieure à 20 tonnes, le régime appliqué est variable entre 50 à 100 tr / min, puis devient stable après 2430 m à 128 tr / min. De fortes vibrations ont été observées aux 30 premiers mètres dans cette section. Quel résultat de faible ROP.

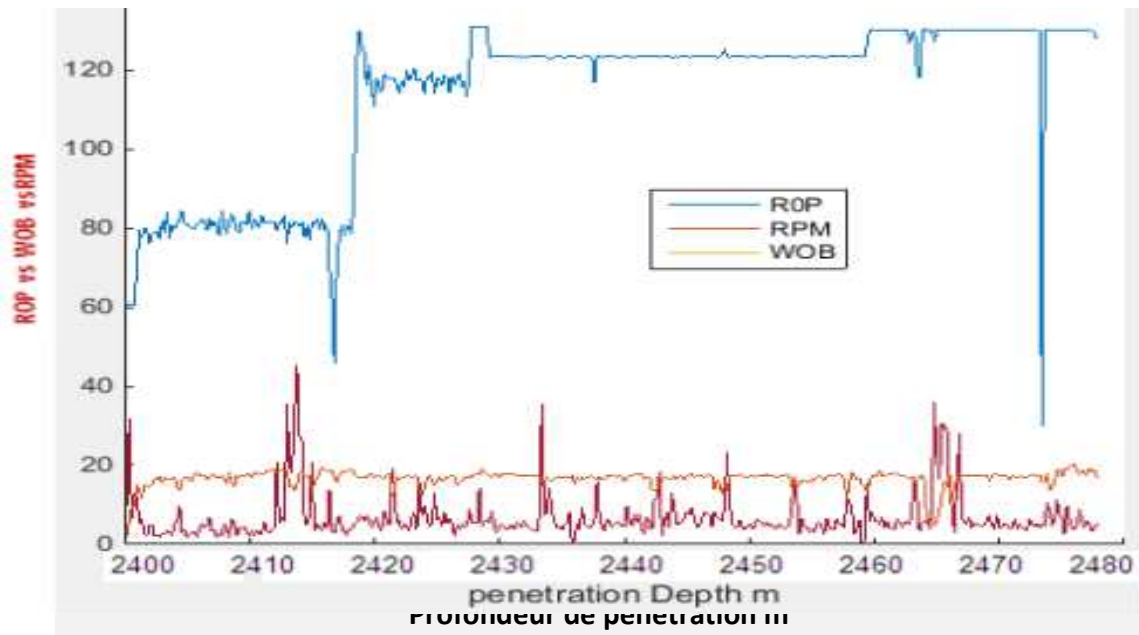


Figure 3.4: *corrélation entre ROP, RPM, WOB*

3.7.2. Résultat et discussion:

Dans la section méthodologie, plusieurs variables sont nécessaires pour le modèle. Certaines des variables sont des paramètres capturés lors du forage du puits. Certaines des variables doivent être calculées à l'aide d'une formule mathématique, tandis que d'autres doivent être obtenues à l'aide de mesures sur le terrain dans des conditions spéciales.

Tableau 3.4: *Variables nécessaires pour le modèle*

Variables mesurés pendant le forage	Variables à calculer
Profondeur	$\alpha = \frac{CCS}{EFF_m}$
Taux de pénétration (ROP)	frottement de glissement (μ)
Poids sur l'outil (WOB) et le couple de rotation	ROP_{opt}
Vitesse de rotation (RPM)	Section (surface)

Les paramètres initiaux qui ont été mesurés lors de l'opération de forage de 12.1 / 4 "sont passés de 2402 m de profondeur à 2481 m.

Tableau 3.5: *paramètres initiaux du premier compteur*

Profondeur	WOB	RPM	Couple rotatif	ROP
(m)	(ton)	(rpm)	(ft.lb)	(m/h)
2402	2.14	60.52	2254.75	9.76

Après avoir utilisé la théorie MSE pour l'optimisation, le tableau (3.6) donne le résultat final de ROP optimal, avec le WOB et la vitesse de rotation optimale, de chaque plage égale à cinq mètres. Les valeurs optimales de ROP qui présentent une erreur supérieure sur 5% ne sont pas acceptables. Les valeurs qui ont une erreur inférieure de 5% sont toutes acceptables.

Tableau 3.6: *Résultat d'optimisation des paramètres*

Profondeur	RPMop	WOBop	ROP	ROPop	Error (%)
(m)	(tr/min)	(ton)	(m/h)	(m/h)	
2406	61.56	2.2	6.62	10.21	4.46
2411	86.66	14.1	11.54	12.01	3.72
2416	88.65	16.1	10.86	11.3	3.93
2421	81.44	17.23	6.6	6.79	2.89
2426	121.65	18.11	7.34	7.94	2.79
2431	122.02	17.01	6.32	6.65	4.99
2436	123.02	18.13	6.79	7.02	3.31
2441	121.44	16.67	5.84	5.93	1.6
2446	122.42	17.79	7.16	7.39	3.05
2451	121.86	16.98	7.39	5.53	1.93
2456	123.01	17.99	5.87	5.97	1.82
2461	123.29	17.18	5.2	5.42	4.17
2466	123.29	15.12	6.43	6.71	4.18
2471	126.29	7.011	12.98	13.49	3.76
2476	128.29	17.012	5.38	5.59	3..59
2481	128.29	18.51	5.93	6.14	3.35

3.7.2.1. La POR modélisée:

La figure (3.5) présente le tracé des valeurs ROP modélisées, obtenues à l'aide du modèle optimisé E_s , en comparaison, des ensembles de données d'origine sont représentés de manière égale sur la même figure. Ils montrent tous des tendances similaires, même s'il existe de légers écarts en certains points de données le long de la profondeur.

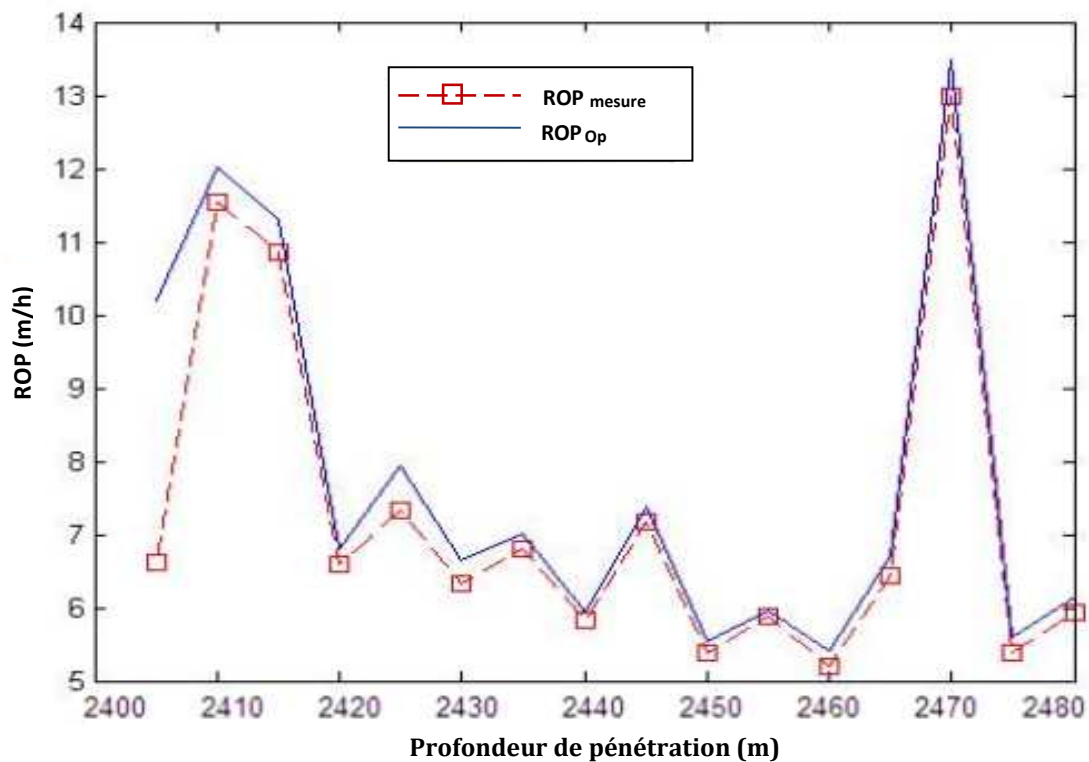
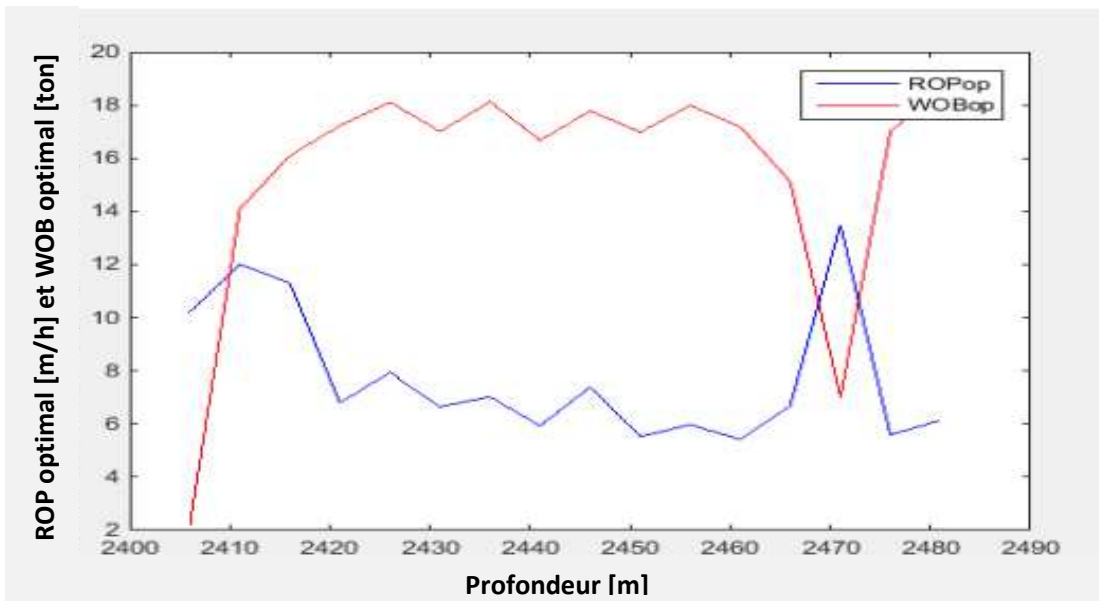
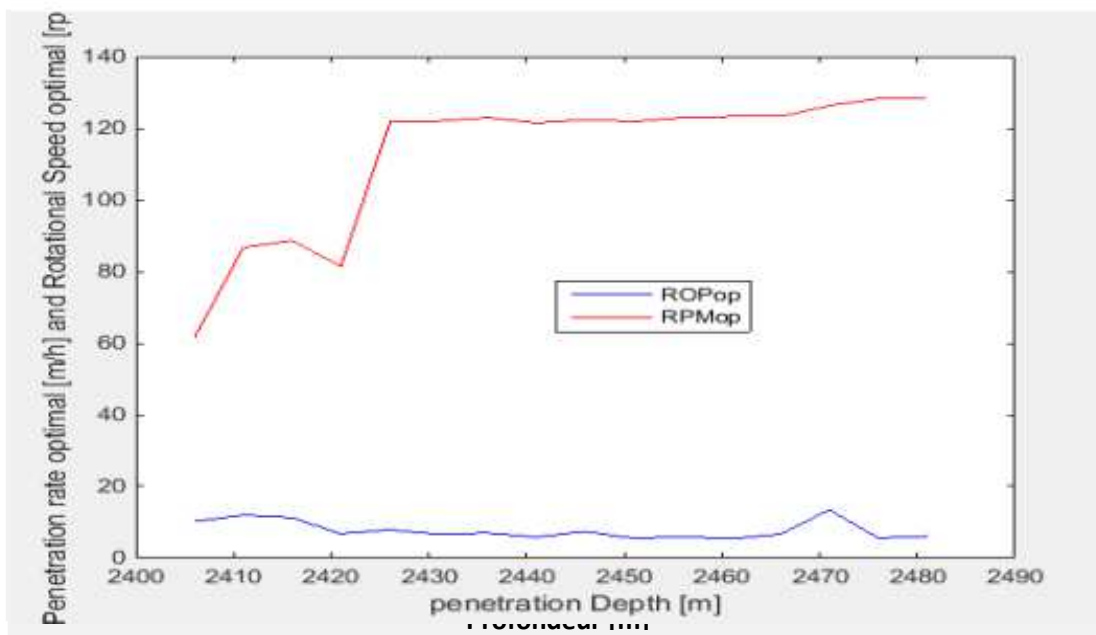


Figure 3.5: ROP_{op} vs ROP_{mesure}

3.7.2.2. Effet de WOB et RPM sur la ROP optimale

Le poids optimal sur l'outil et la vitesse de rotation optimale ont été utilisés pour calculer le taux de pénétration optimal. Les figures (3.6) et (3.7) comparent le ROP optimisé avec le WOB optimal et le régime optimal à chaque profondeur de données. Nous constatons une nette amélioration de la vitesse de pénétration lorsque le poids sur l'outil (WOB_{op}) est optimal et que la vitesse de rotation optimale (RPM_{op}) est utilisée.

Figure 3.6: *ROPop* vs *WOBop*Figure 3.7: *ROPop* vs *RPMop*

3.7.2.3. Analyse des valeurs optimales WOB et RPM:

Cette section du trou montre que le nombre de tours par minute est supérieur à la valeur optimale et que WOB est inférieur à la valeur optimale. Le WOB maximum est indiqué par le fabricant sur la fiche technique des bits. Lorsque le WOB appliqué est inférieur au seuil (maximum),

l'optimisation des résultats WOB aboutit à un WOB optimal plus proche de la valeur de seuil que la valeur minimale (Figure 3.8).

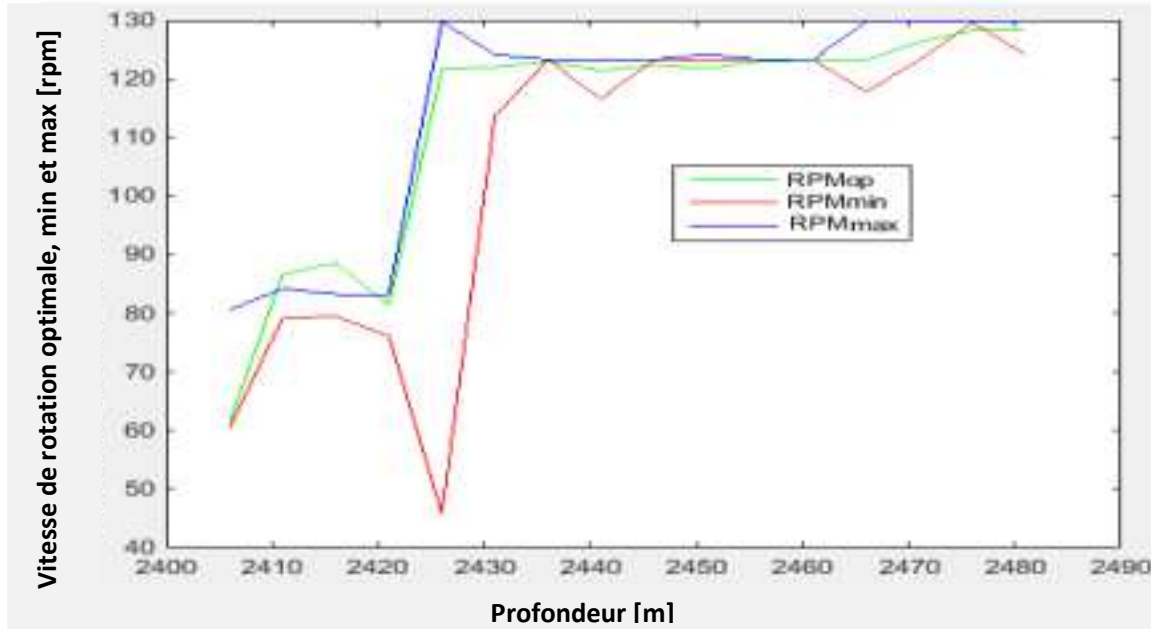


Figure 3.8: Comparaison du régime optimal

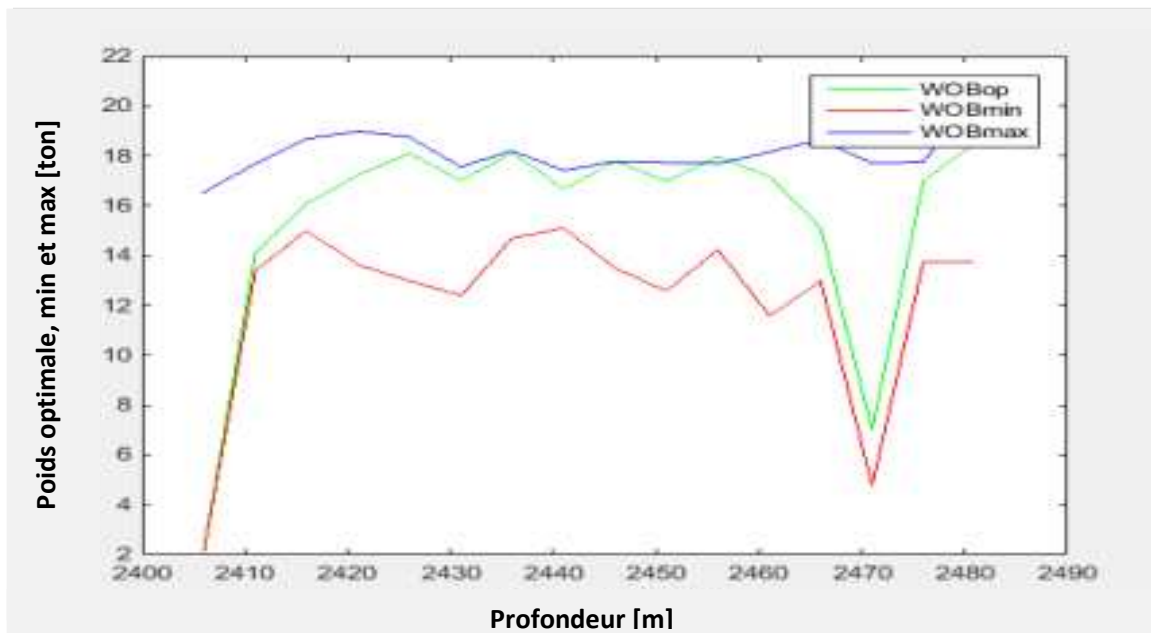


Figure 3.9: Comparaison de WOB optimale

3.8. Résolution de problèmes:

L'effet du couple de rotation est très sensible sur le taux de pénétration, la figure 3.10 montre que le couple de rotation est très élevé et peut atteindre 18 000 ft. lb dans la première section de 30 m sur laquelle les vibrations tourbillonnantes ou collantes sont déclenchées et la raison en est que le WOB et la vitesse de rotation ne sont pas contrôlables.

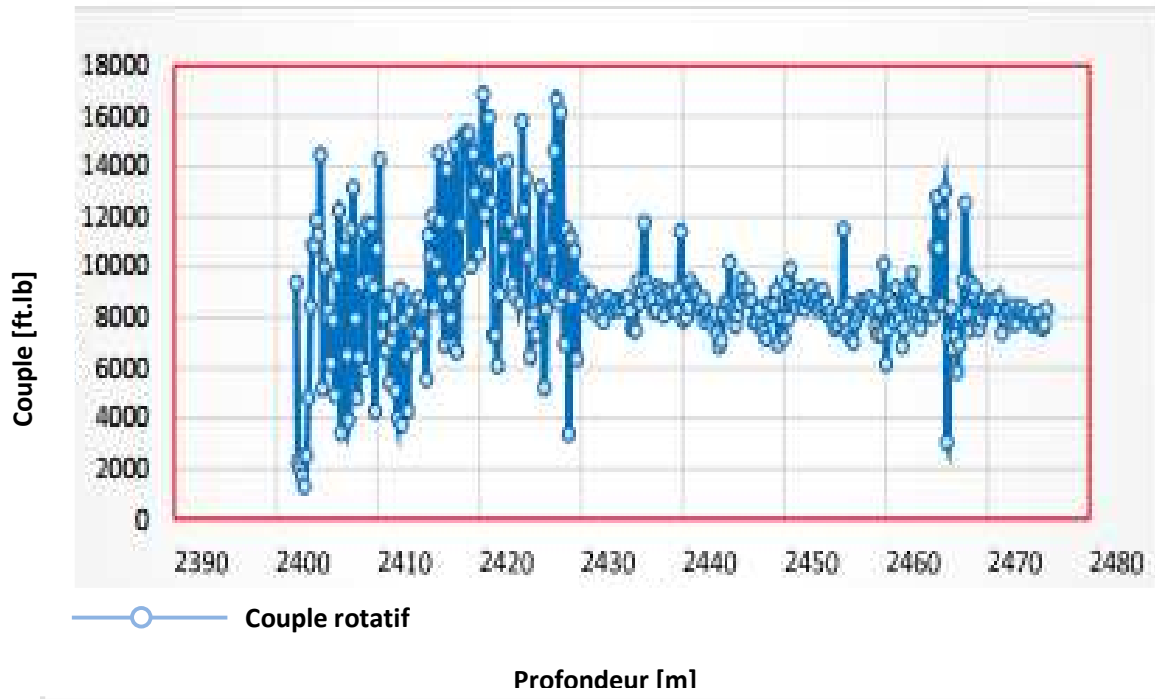


Figure 3.10: *Effet du couple de rotation*

En ce qui concerne les vibrations, il a été indiqué que les vibrations latérales, ou tourbillons, pourraient être atténuées en augmentant les configurations de boîtiers coudés, par rapport aux modèles plus droits, en utilisant des stabilisateurs proches du trépan et même en augmentant la longueur jauge du foret.

Pour les vibrations de torsion ou le glissement de bâton, l'efficacité est améliorée par une diminution du couple (obtenue en réduisant le WOB) ou une augmentation de la vitesse de rotation.

Pour les vibrations axiales ou le rebond des trépan, une réduction de WOB était utile, car elle est plus fréquente lorsqu'on rencontre des limons (petite couche de formation de géologie différente dans un type de formation) ou le forage de formations dures.

3.9. Conclusion :

L'analyse des résultats de ROP modélisés dans la section 12,1 / 4 " montre que ses valeurs sont beaucoup plus élevées que les valeurs précédentes, la valeur d'optimisation est d'environ 15 m/ h, c'est une valeur acceptable par rapport à la résistance à la compression de la formation, dans cette section. De plus, la valeur optimisée du ROP peut être atteinte au maximum en considérant les autres effets, tels que des facteurs hydrauliques (pression et débit), de type et d'usure de l'outil, et de type de BHA, la partie de modélisation pouvant être plus efficace. La méthode d'énergie spécifique E_s peut-être appliquée dans des puits verticaux afin d'optimiser le taux de pénétration à l'aide du programme développé par MATLAB. Selon l'interprétation du puits OMM-302, plusieurs jours ont été gagnés, ce qui correspond à une amélioration de 5% à 30% du temps et du coût total du forage.

La gestion du taux de pénétration est essentielle pour assurer une opération de forage régulière et économique. Cette thèse démontre également que les variations de la ROP sont dues des effets combinés de plusieurs facteurs, mécaniques ou hydrauliques. Par conséquent, ces facteurs doivent être bien gérés afin d'atténuer les énormes variations.

Des WOB, RPM, type et couple de l'outil adéquats sont nécessaires pour éviter plusieurs problèmes liés à l'outil afin d'accroître l'efficacité du forage. Ces problèmes peuvent être atténués dans une certaine mesure en se concentrant sur la conception du système de levage, des systèmes de couple rotatif et de transmission de puissance.

Au cours de ce travail, on affirme que l'optimisation par l'énergie spécifique mécanique est une méthode fiable et efficace dans le domaine de la prévision et de l'analyse de la performance du taux de pénétration, nous espérons qu'ils contribueront à améliorer le domaine d'optimisation.

Pour obtenir une modélisation plus précise, il faut utiliser des bonnes données, d'où la nécessité d'utiliser des systèmes appropriés d'acquisition et de surveillance des données sur les plates-formes. Un bon modèle conduit à une détermination améliorée pour meilleurs paramètres à utiliser, et par conséquent conduit à une amélioration des performances de forage.

Chapitre 4

Etude expérimentale du comportement dynamique des outils PDC

Chapitre 4.

4.1 Introduction :

Les tests ont été faits sur une plate-forme de forage réalisée spécialement pour ce type d'expériences, utilisant des outils manuels spécifiquement conçus pour ces expériences, dont le but principal est de savoir l'impact de l'angle de coupe des outils sur le taux de pénétration. Sachant que ce facteur est un facteur standard dans les outils. En outre, étudier l'effet des autres facteurs mécaniques sur le taux de pénétration (vitesse de rotation et poids sur les outils). La variation de la nature des roches à chaque fois est également prise en considération pour connaître l'étendue de son impact sur le taux de pénétration.

4.2. Présentation des essais sur le banc de forage

4.2.1. Plate-forme de forage expérimentale:

Les figures au dessous (4.1, 4.2) montrent l'appareil qu'on a expérimenté. Cet appareil est un dispositif qui simule la plate-forme de forage réelle. Les facteurs fondamentaux tels que la vitesse de trépan (RPM) et le poids sur l'outil (WOB) sont fournis sur la plate-forme de forage au cours d'essais. La roche est fixée sur la base de l'appareil pendant le forage. Les valeurs 80 kgf, 120 kgf et 160 kgf, sont les valeurs des forces exercées dans cette expérience, et les valeurs 118 tr / min, 135 tr / min et 152 tr / min sont les vitesses d'entraînement de l'outil. Cet appareil est divisé en plusieurs sections:

1- Stabilisateur de roche : est la partie réservée pour attacher la roche pour prouver n'importe quel type de roche sous toutes les formes, mais avec les dimensions de la reliure, de sorte que la roche bien fixée pour des obtenir des meilleurs résultats.

2 - Boîte à outils (la partie qui englobe l'outil de forage) : Elle est similaire à la table rotative de l'installation de forage ; c'est une partie importante de cette machine. L'outil de forage est mis sur une distance de l'axe et avec un angle déterminé. Cette partie est conçue pour avoir trois types d'angles différents, avec trois dimensions de l'axe. Les angles de coupe utilisés sont de 3°, 8° et 45°

3- Axe: C'est la partie qui relie la partie tournante de l'outil de forage et le changeur de vitesse (réducteur).

4- Réducteur : C'est le joint qui relie le changement de vitesse mécanique et l'essieu. C'est un réducteur de vitesse avec un taux constant de 15 cycles, il reçoit 15 cycles et fourni un cycle.

5- Variateurs de vitesse: Est la partie la plus importante de cette expérience, elle permet de donner le facteur de vitesse requis (trois vitesses qu'on estime par le changeur de vitesse).

6- Moteur électrique: C'est une source de mouvement rotatif de 1,5 KW de puissance et une vitesse de 1490tr / min.

7- Vérin hydraulique: C'est la source de la force exercée sur l'outil de forage contre la roche. Au cours de cette expérience, les forces de compression choisies sont 80 kgf, 120 kgf et 160 kgf.

8- Outil de forage (Bit) : L'outil utilisé conçu spécialement pour les expériences uniquement (on ne peut pas l'utiliser dans les conditions réelles de forage). Il est constitué d'un coupeur en diamant artificiel.

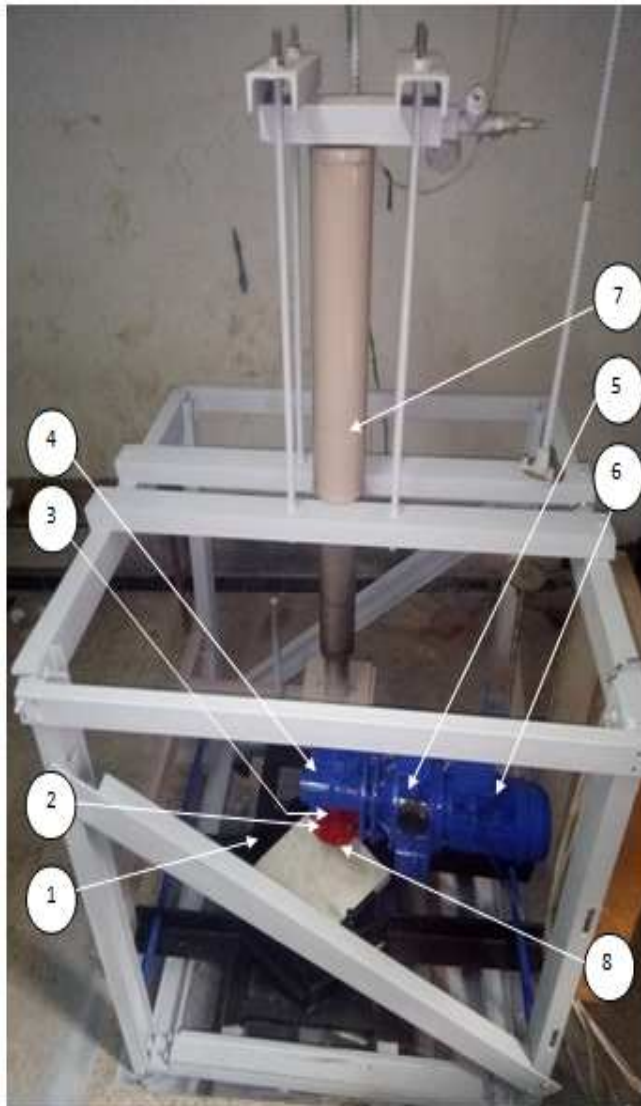


Figure 4.1- Plate-forme de forage

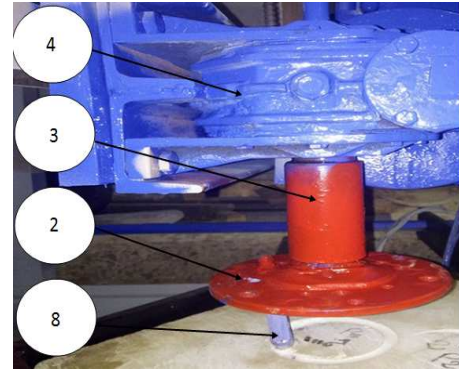


Figure 4.2- Essais de forage

Tableau 4.1- Propriétés de la foreuse

Propriétés de forage	
Puissance maximale du moteur	1.5 kw
Poids maximum de bit	250 kgf
Vitesse de rotation maximale	220 rpm
Diameter de bit	13 mm

4.2.2. Roches utilisées:

Les roches utilisées dans ces expériences sont des roches calcaires qui peuvent varier considérablement par la taille de leurs cristaux et par leur porosité. Celle-ci peut être importante ou négligeable, visible ou non. Il est donc impossible de prédire le comportement mécanique d'une roche. Les roches calcaires sont souvent utilisés comme roches

dimensionnelles pour la construction, la décoration ou comme granulats. Il est par ailleurs nécessaire de spécifier leurs caractéristiques afin de connaître les limites d'utilisation. Concernant l'étude actuelle la roche A est la roche la plus rigide par rapport aux autres roches (roches B et C), elle est extraite d'une mine de calcaire de l'unité ENOF El Ghedir W à Skikda. La roche B est une roche tirée d'une carrière de Hadjar Soud communément appelée Djebel Safia. La roche C est un marbre extrait aussi de la carrière Felfla de la wilaya de Skikda. Les caractéristiques des roches utilisées sont indiquées dans le tableau suivant:

Tableau 4.2-Résistance à la compression des roches

Roche	Résistance à la compression
Roche(A)	1550kg/cm ²
Roche (B)	750kg/cm ²
Roche(C)	640 kg/cm ²

Les blocs ont une taille d'environ 30 cm x 30 cm x 4 cm.



Figure 4.3 : La roche A est extraite d'une mine de calcaire de l'unité ENOF El Ghedir . Skikda



Figure 4.4 : La roche B est extraite d'une carrière de Hadjar Soud . Skikda



Figure 4.5 : La roche C est extraite d'une la carrière de Felfla . Skikda

4.3. Résultats expérimentaux

Le sondage approfondi de la littérature et les résultats de recherches antérieures pendant les chapitres précédents affirment que le développement du taux de pénétration dépend de la variation des paramètres de forage tels que la vitesse de rotation de l'outil, le poids sur l'outil, l'angle de coupe, les caractéristiques de la roche forée...etc.

Pour mieux comprendre les relations entre les différents paramètres et la vitesse d'approfondissement d'un forage, on va étudier dans ce chapitre l'effet de la variation de ces paramètres sur le taux de pénétration.

4.3.1. Effet de la vitesse de rotation de l'outil sur le taux de pénétration:

La vitesse de rotation a trois niveaux (118, 135, 152 tr / min), avec une augmentation de 17 tr / min. L'effet de la vitesse de rotation sur le taux de pénétration se manifeste sous neuf formes différentes; cela est dû au chevauchement d'autres paramètres, de trois niveaux du poids de compression et de trois niveaux pour la qualité de la roche et de trois autres niveaux pour l'angle de coupe. On peut voir l'effet de la vitesse de rotation sur la pénétration en présence de toutes les variables, on constate que le taux de pénétration augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation (Figure 4.6).

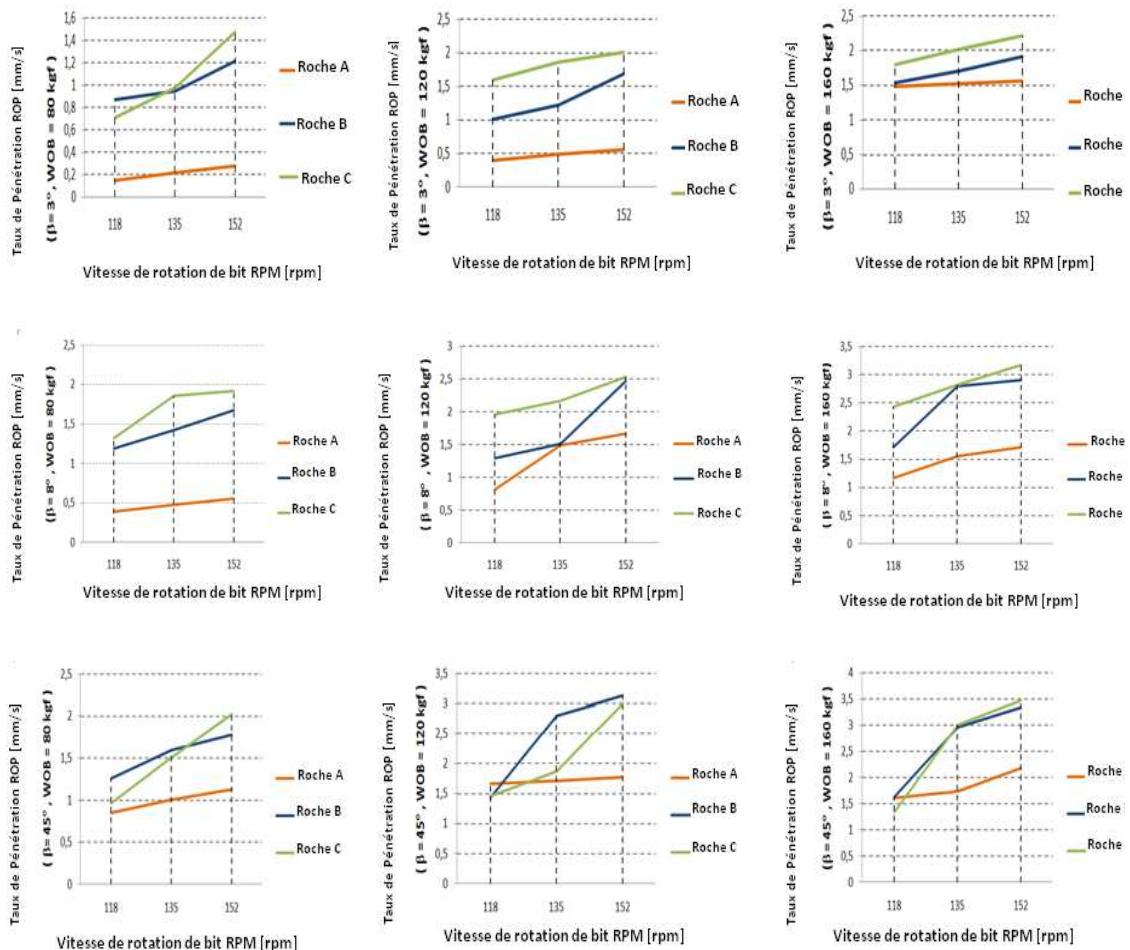


Figure 4.6: Effet du paramètre de vitesse de l'outil de pénétration sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.

4.3.2. Effet du paramètre WOB sur le taux de pénétration:

Comme le montre la figure 9, l'effet du poids sur l'outil sur le taux de pénétration est un peu plus élevé que l'effet de la vitesse de rotation. Le taux de pénétration (Pr) augmente avec l'augmentation du poids sur l'outil (WOB). La différence entre les niveaux est claire, sauf dans quelques cas, où elle est plus basse. Par exemple, dans la roche A et au troisième niveau de l'angle de coupe (45°) avec le deuxième niveau de vitesse de rotation (135 tr / min), on observe que le PR entre les deuxième et troisième niveaux du poids sur l'outil (120 et 160 kgf) est de 0,3 mm. Cette différence est basse, possible en raison de l'introduction d'influences extérieures non prises en compte ou imputables à la présence de vibrations. Ces derniers s'augmentent lorsque l'angle de coupe et le WOB augmentent.

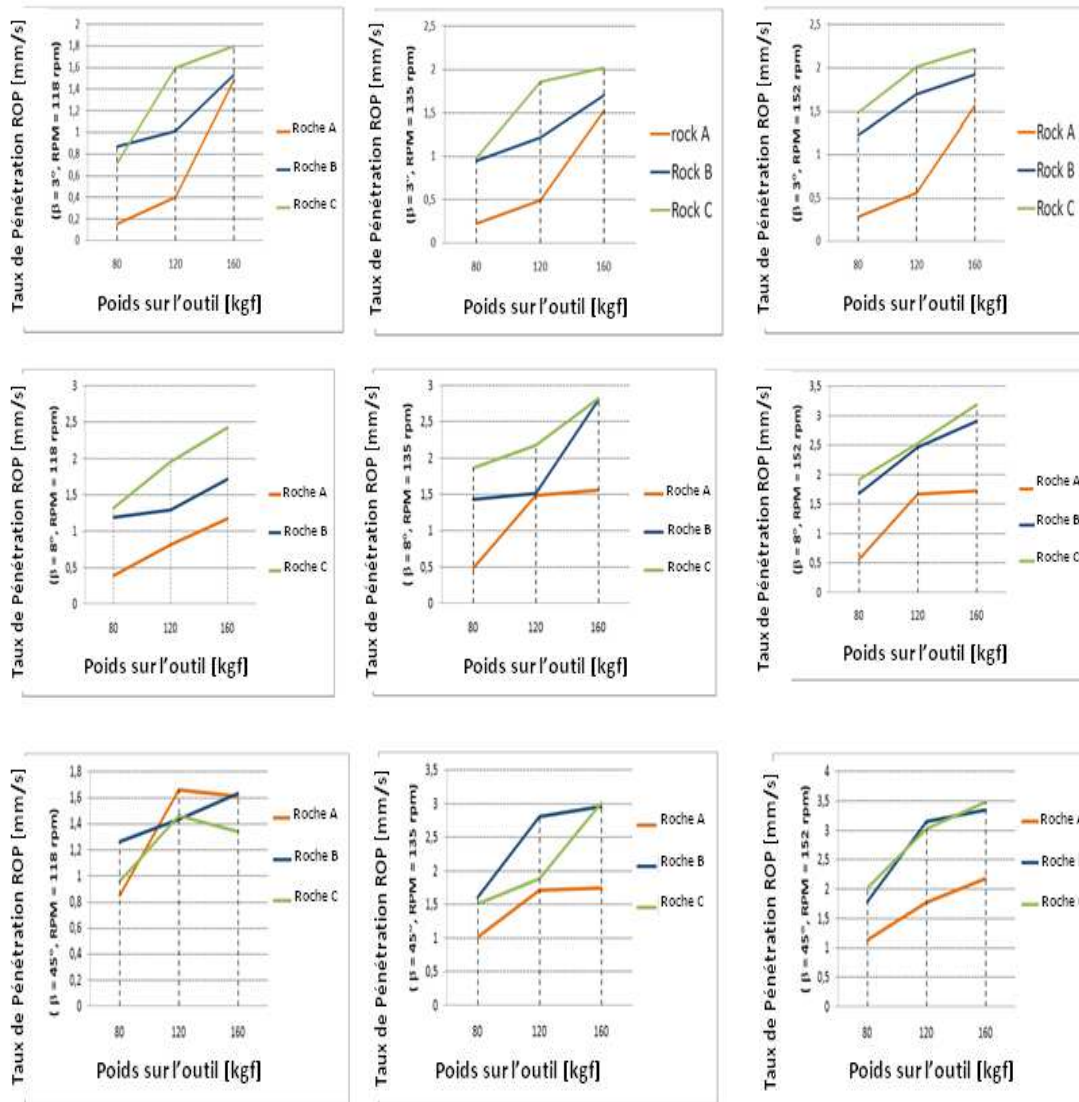


Figure 4.7: Effet du poids sur le bit sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.

4.3.3. Effet de la nature de la roche sur le taux de pénétration:

Trois types de roches calcaires ont été utilisés, chaque type ayant ses propres caractéristiques. La caractéristique principale de la roche A est le coefficient de résistance à la pression Cs. On peut voir clairement que la pénétration diminue lorsque la résistance à la pression de la roche est élevée. Cela signifie que la pénétration et la résistance à la pression des roches sont liées inversement. . Cela signifie que la pénétration et la résistance à la pression des roches sont liées inversement.

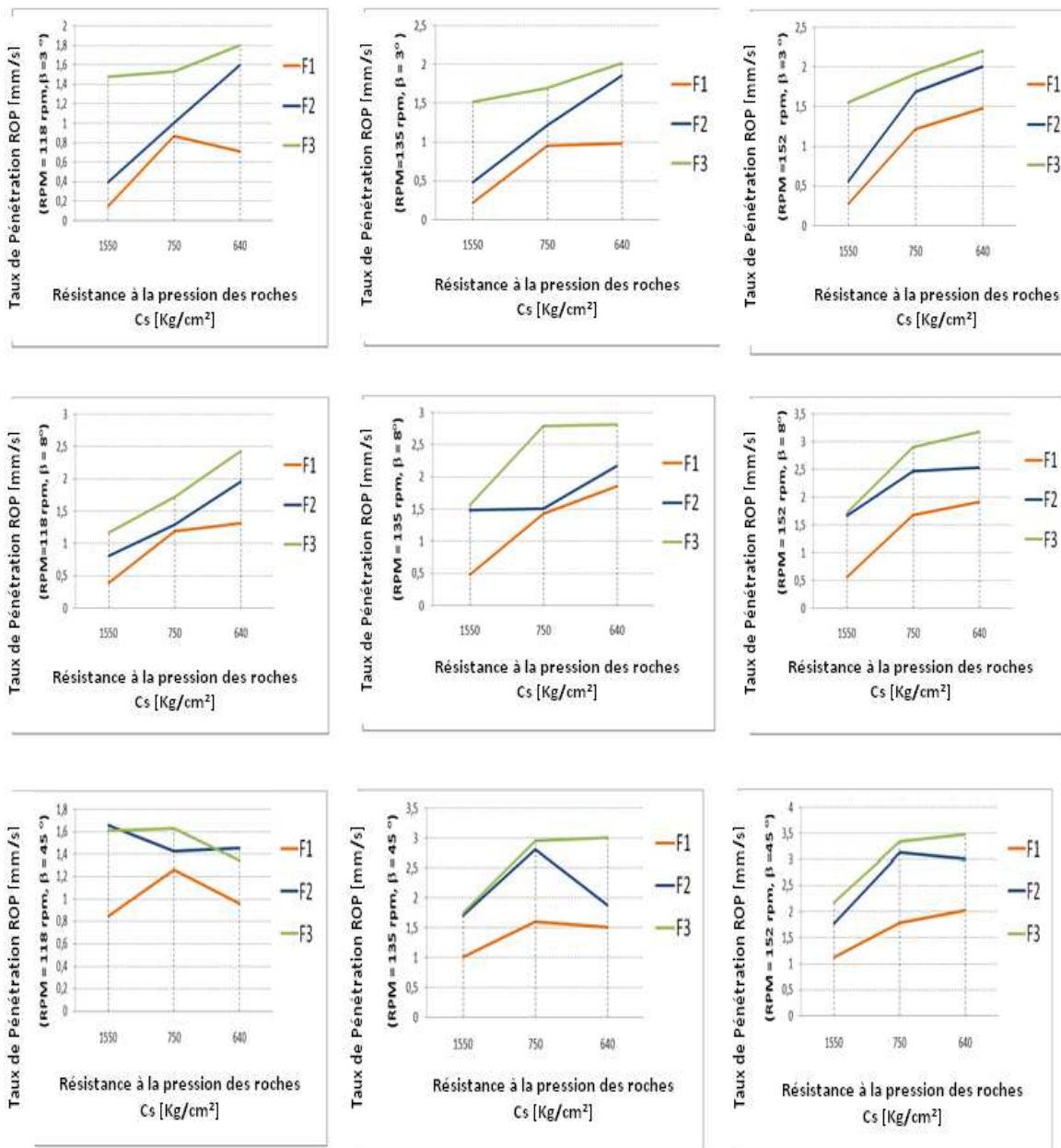


Figure 4.8 : Effet de la nature de la roche sur le taux de pénétration des autres paramètres.

4.3.4 Impact de l'angle de coupe sur le taux de pénétration:

L'effet de l'angle de coupe sur le taux de pénétration peut être clairement observée, à chaque augmentation de l'angle de coupe, le taux de pénétration augmente également, mais l'augmentation de l'angle de coupe s'accompagne d'une augmentation du frottement et de la surface de contact entre l'outil et la surface forée. Cette augmentation du frottement crée une force de réaction plus forte, alors produit des vibrations plus élevées de l'outil, cela se traduit clairement dans les figures suivantes.

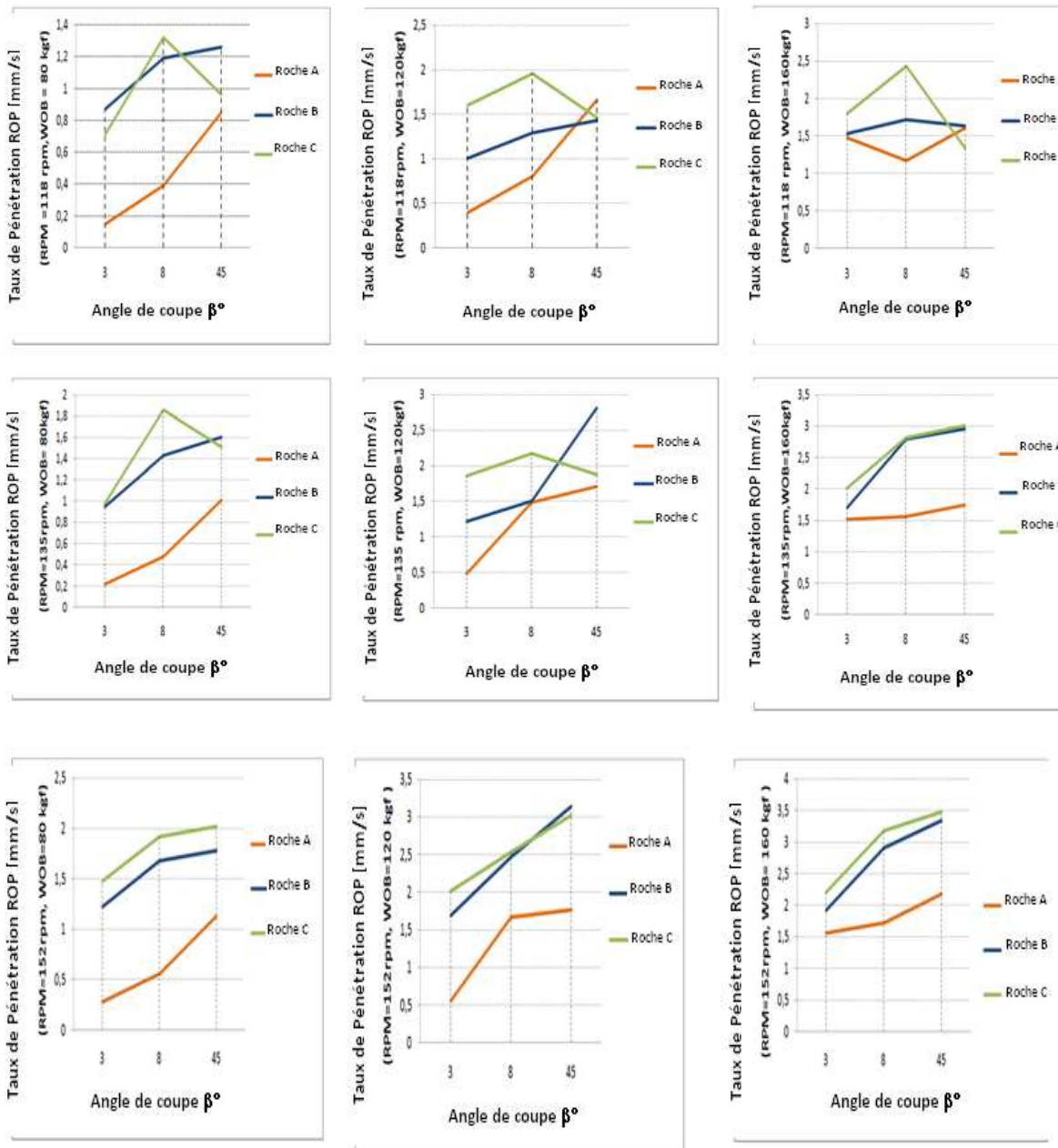


Figure 4.9: Impact de l'angle de coupe sur le taux de pénétration en fonction des autres paramètres.

4.4. Conclusion

Le but de concevoir cet appareil et de faire toutes ces expériences était de connaître la réponse mécanique de l'outil de forage de type PDC pour ces expériences. Nous avons modifié les facteurs principaux connus concernant la vitesse de rotation, le poids de la compression et la nature des roches. Ces paramètres sont appelés 'les paramètres mécaniques', en l'absence d'autres facteurs tels que l'écoulement de la boue pour le refroidissement et le paramètre du couple. Ici le flux de la boue n'est pas important car on n'a pas foré que des petits millimètres, alors on peut négliger le rôle de ce facteur. Outre que la présence des trois facteurs mécaniques permet de s'affranchir du facteur de couple car il est essentiellement lié avec eux. En plus de varier les paramètres mécaniques, on a également varié les paramètres géométriques pour déterminer leur effet sur le taux de pénétration. Le paramètre géométrique le plus important est l'angle de coupe. Il suffit d'entrer les quatre paramètres (RPM, WOB, β , Cs) pouvant être produits en laboratoire et dans les conditions d'un forage nominales. Le changement physique de ce phénomène n'est pas encore achevé, mais le fait que ces tests ont été effectués dans des conditions de forage nominales. C'est-à-dire l'opération a été réalisée en l'absence de débris qui a un effet relatif sur les opérations de forage pétrolier et également le facteur de débit de la boue qui a en outre le rôle de simplification du problème des débris au cours du processus de forage, de plus, l'absence d'effet des vibrations et grâce à l'absence de gros débris qui est la source de grandes vibrations. L'observation que nous avons tirée de ces expériences est que tous les paramètres ont un effet sur le taux de pénétration, mais avec des degrés différents. Chaque paramètre affectant les autres paramètres, ce qui est appelé l'interaction des paramètres. C'est ce qu'on verra au chapitre suivant. On conclure que le poids de la compression (WOB) et la nature de la roche (Cs) ont un impact significatif sur le taux de pénétration. La vitesse de l'outil (RPM) et l'angle de coupe (β) ont également un effet un peu plus moins aux deux paramètres précédents.

Chapitre 5

Optimisation par la méthode de Taguchi pour des roches homogènes

Chapitre 5.

5.1 Introduction

Comme tout nouveau procédé, le forage pétrolier fit l'objet de développements successifs au fur et à mesure de l'évolution de la technologie, à savoir la dégradation de l'outil de forage, l'estimation de la vitesse de pénétration ainsi que l'optimisation des paramètres géométriques et la procédure de forage. La recherche actuelle s'oriente de plus en plus vers la configuration expérimentale qui estime les conditions de fonctionnement réelles des outils de forage. Dans ce contexte des modèles mathématiques avec et sans interactions ont été mis au point. Ces modèles caractérisent la vitesse de pénétration pour les outils de forage de type PDC (diamant polycristallin compact) qui sont les plus utilisés dans le domaine du forage pétrolier. L'étude expérimentale vise à analyser l'influence de quatre paramètres de fonctionnement telles que le poids sur le bit (WOB), la vitesse de rotation du bit (RPM), l'angle de coupe (β) et la nature de la formation sur le taux de pénétration. Les résultats obtenus sont présentés sous les catégories suivantes : une analyse statistique (une matrice orthogonale de Taguchi L27, rapport : signal / bruit (S / N), une analyse ANOVA, une analyse de régression et les valeurs optimales obtenues par la méthode TAGUCHI), et une appréciation de la bonne corrélation entre les données prédites et expérimentales.

5.2. La Méthode de Taguchi et les techniques de conception :

Taguchi a développé des techniques de conception non traditionnelles pour les matrices afin d'étudier des paramètres entiers. Divise les facteurs d'optimisation d'un système (produit ou processus) en deux catégories (Figure 5.1) : facteurs contrôlables et facteurs non contrôlables (appelés communément facteurs de « bruit »).[55]

Le principe de base est d'utiliser les données issues d'expériences appliquées puis converties sous forme de matrices orthogonales en rapport signal / bruit [S / N] en (dB) pour représenter et évaluer une réponse ou une caractéristique de qualité, et le Rapport S / N] est requis. [62, 63]

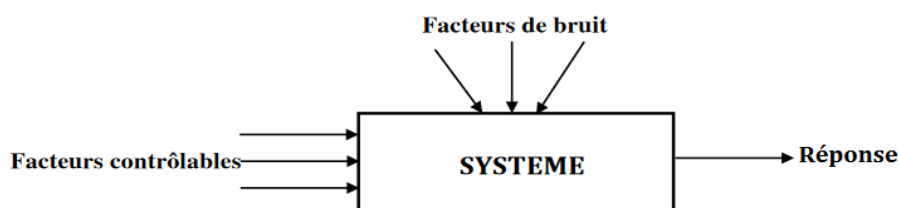


Figure 5.1: Description du système étudié dans la méthode de Taguchi. [55]

En général, il existe trois catégories de techniques d'analyse pour le rapport signal-bruit, à savoir:

Le Nominal est le meilleur :

Il est utilisé lorsque la valeur nominale ou la valeur cible et la variation autour de cette valeur est minimale.

$$S/N \text{ ratio}(\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (\text{Eq 5.1})$$

où μ signifie et σ : variance.

Le Plus petit, est le mieux :

Il est utilisé lorsque la valeur la plus petite est souhaitée

$$S/N \text{ ratio}(\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (\text{Eq 5.2})$$

Le plus supérieur est le meilleur :

Il est utilisé là où la plus grande valeur est désirée

$$S/N \text{ ratio}(\eta) = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (\text{Eq 5.3})$$

Où y_i est la valeur de réponse observée et n = nombre de répliques.

Le rapport [S / N] pour chaque niveau des paramètres de processus est calculé sur la base de l'analyse [S/N]. Indépendamment de la catégorie de la caractéristique de qualité, le maximum des résultats entre les rapports [S / N] correspond à une caractéristique de meilleure qualité. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres de processus est le niveau avec le rapport [S / N] le plus élevé. [63, 64, 65]

5.3. Conception de l'expérience et ses étapes:

En utilisant la méthode de Taguchi, pour chacun des quatre facteurs examinés et évalués avec des codes comme indiqué dans le tableau 5.1, la conception de l'expérience de Taguchi est basée sur trois niveaux différents pour chaque paramètre :

Tableau 5.1-Facteurs et niveaux sélectionnés

Facteurs	Unit	Code	niveau		
			1	2	3
Angle de coupe	Degree	β	3	8	45
Poids sur l'outil	kgf	WOB	80	120	160
Vitesse de rotation	Rpm	RPM	118	135	152
Résistance à la compression	kg/cm ²	Cs	640	750	1550

Selon cette méthode, la table orthogonale L27 (la matrice orthogonale L27 Taguchi), ou la matrice d'expérience est constituée de quatre colonnes en fonction des quatre facteurs variables, 27 chiffres pour chacune des quatre colonnes représentant un ensemble de valeurs sélectionnées par le modèle de Taguchi pour cette expérience. Les 27 chiffres de la cinquième colonne représentent les valeurs expérimentales du taux de pénétration (ROP), la sixième et dernière colonne représente le rapport de signal - bruit pour chaque taux de pénétration calculé à partir de l'équation (Eq 5.3) :

Tableau 5.2- le tableau orthogonal L27 Taguchi

Tests	β	WOB	RPM	Cs	ROP	(S/N)	Tests	β	WOB	RPM	Cs	ROP	(S/N)
1	3	80	118	640	0.71	-2.9748	15	8	120	152	640	2.53	8.0624
2	3	80	135	750	0.95	-0.4455	16	8	160	118	1550	1.17	1.3637
3	3	80	152	1550	0.28	-11.0568	17	8	160	135	640	2.82	9.0050
4	3	120	118	750	1.01	0.0864	18	8	160	152	750	2.91	9.2779
5	3	120	135	1550	0.49	-6.1961	19	45	80	118	640	0.96	-0.3546
6	3	120	152	640	2.01	6.0639	20	45	80	135	750	1.60	4.0824
7	3	160	118	1550	1.48	3.4052	21	45	80	152	1550	1.13	1.0616
8	3	160	135	640	2.02	6.1070	22	45	120	118	750	1.43	3.1067
9	3	160	152	750	1.92	5.6660	23	45	120	135	1550	1.71	4.6599
10	8	80	118	640	1.32	2.4115	24	45	120	152	640	3.02	9.6001
11	8	80	135	750	1.43	3.1067	25	45	160	118	1550	1.61	4.1365
12	8	80	152	1550	0.80	-1.9382	26	45	160	135	640	3.01	9.5713
13	8	120	118	750	1.29	2.2118	27	45	160	152	750	3.34	10.4749
14	8	120	135	1550	1.49	3.4637							

Ce tableau orthogonal **L27** donne les résultats du taux de pénétration correspondant au rapport signal – bruit (traduction du taux de pénétration par méthode de Taguchi).

Sachant que le taux de pénétration est déterminé par l'équation suivante [64]:

$$ROP = L/t_d \quad (\text{Eq 5.4})$$

Où, L : est la profondeur de l'anneau gravé

t_d : est le temps de pénétration (le temps identifié pendant les essais est 8 secondes).

5.4. Interprétation des résultats obtenus:

5.4.1. Analyse du rapport S / N

Selon l'équation (Eq 5.3), 'le plus supérieur est le meilleur', la valeur maximale du rapport signal-bruit S / N correspond au meilleur rapport du taux de pénétration. Le niveau optimal de chacun des quatre facteurs correspond au rapport signal - bruit S / n le plus élevé, comme illustré dans le tableau suivant:

Tableau 5.3- *Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit*

niveau	β	WOB	RPM	Cs
1	0.07282	-0.67865	1.48805	5.27688
2	4.10717	3.45100	3.70606	4.17415
3	5.14877	6.55640	4.13465	-0.12227
Delta	5.07596	7.23505	2.64659	5.39915
Rang	3	1	4	2

Le tableau 5.3 montre les facteurs idéaux correspondant au meilleur rapport signal - bruit avec le meilleur taux de pénétration, ainsi que le rapport S / N moyen correspondant à chacun des quatre facteurs de contrôle pour trois niveaux. Ce tableau montre également l'ordre de propagation de chaque facteur (l'ordre de l'influence de chacun des quatre facteurs de contrôle).

La figure 5.2 est une traduction graphique du tableau 5.3. Elle montre le moyen du rapport signal - bruit en fonction des niveaux de facteurs influençant le taux de pénétration.

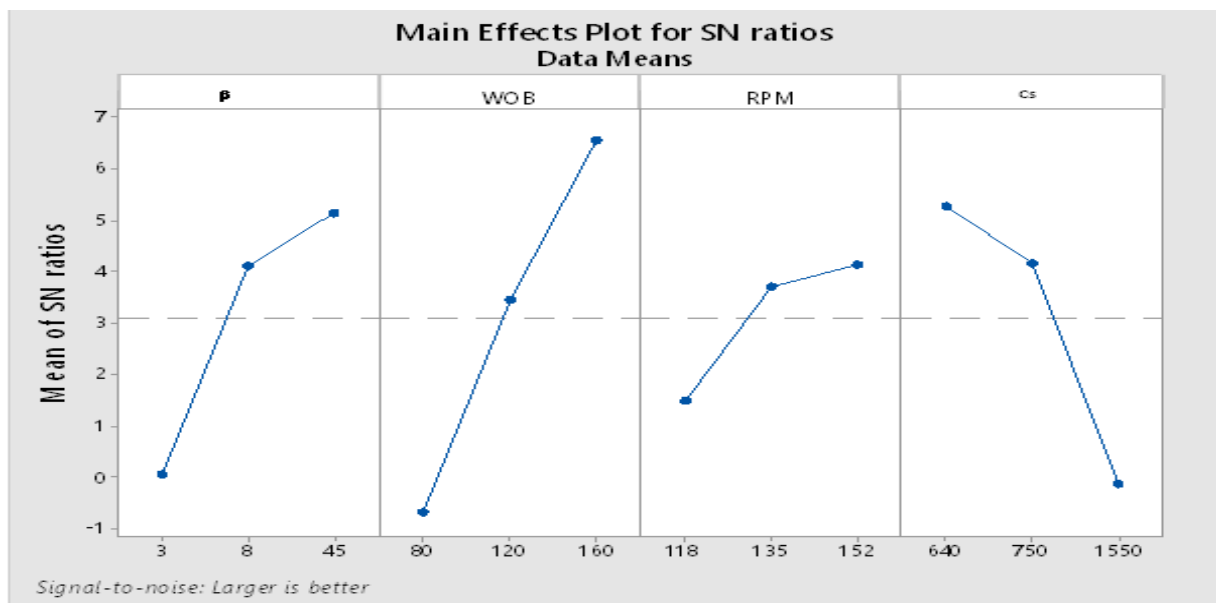


Figure 5.2: *effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration (ROP).*

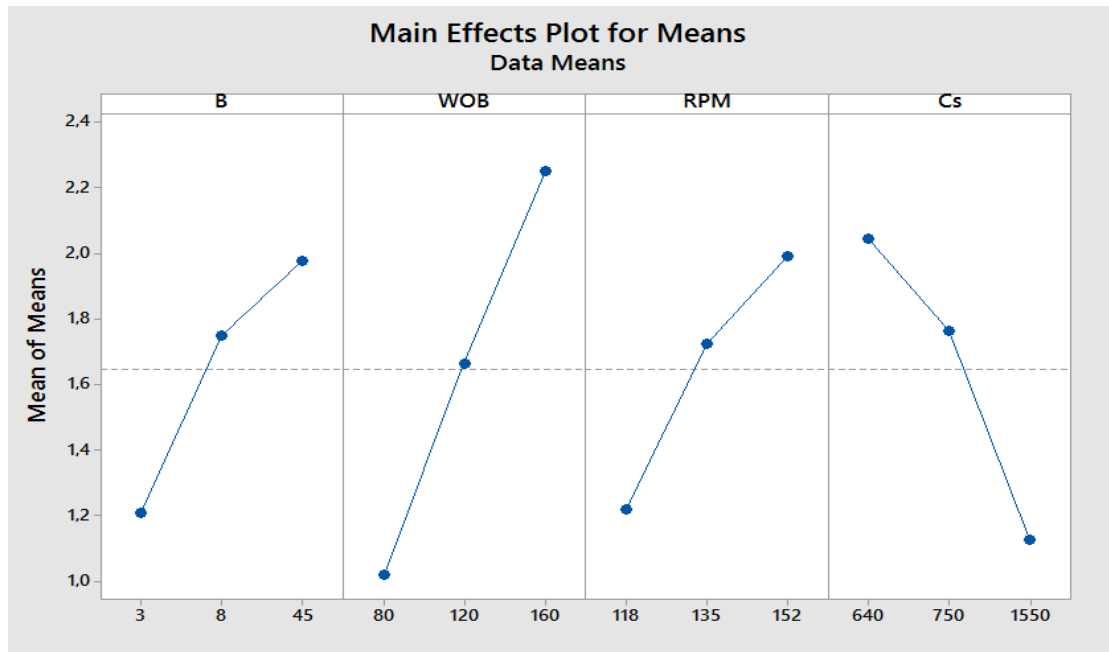


Figure 5.3: Principaux effets sur le taux de pénétration (ROP).

Selon les deux formes, on divise les facteurs en deux sections. La première section comprend le facteur d'angle de coupe (β), le WOB et le facteur RPM de sorte que le taux de pénétration augmente avec l'augmentation de ces paramètres. La deuxième section comprend le facteur Cs, qui est inversement proportionnel au taux de pénétration. Cette relation est logique, du moment que plus la valeur moyenne de ce facteur est élevée, plus le taux de pénétration est faible. La figure 5.2 représente l'effet du facteur WOB et la qualité de la roche (Cs) qui ont un impact significatif sur le taux de pénétration par rapport au facteur de rotation (RPM) et l'angle de coupe (β). L'identification de cette différence a donné des niveaux optimaux pour chaque facteur avec d'autres facteurs optimaux de la même ligne. Le troisième niveau de l'angle de coupe (β_3), le troisième niveau du facteur de poids sur bit (WOB₃), avec le troisième niveau du facteur de vitesse (RPM₃), on peut les rassembler comme suit : (β_3 , WOB₃, RPM₃).

Dans ces conditions expérimentales, les résultats obtenus (voir Tableau 5.4) montrent que les principaux effets de WOB et de Cs sur le taux de pénétration sont supérieurs à ceux de RPM et de β

Tableau 5.4 - les paramètres optimaux de l'outil.

Facteur (niveau)	β_3	WOB ₃	RPM ₃	Cs ₁
Valeur	45	160	152	640
S / N	5,14877	6,55640	4,13465	5.27688
rang	3	1	4	2

Les trois facteurs précédents sont liés à la pénétration de l'outil, le facteur (Cs) est ajouté aux autres facteurs, la qualité des roches de cette expérience étant déterminée préalablement. La formule des transactions homologues sont β_3 , WOB_3 , RPM_3 et Cs_1 .

La figure 5.4 montre que le taux de pénétration change en fonction de tous les autres facteurs de sorte que si un seul des facteurs de contrôle change, le résultat final est clairement affecté:

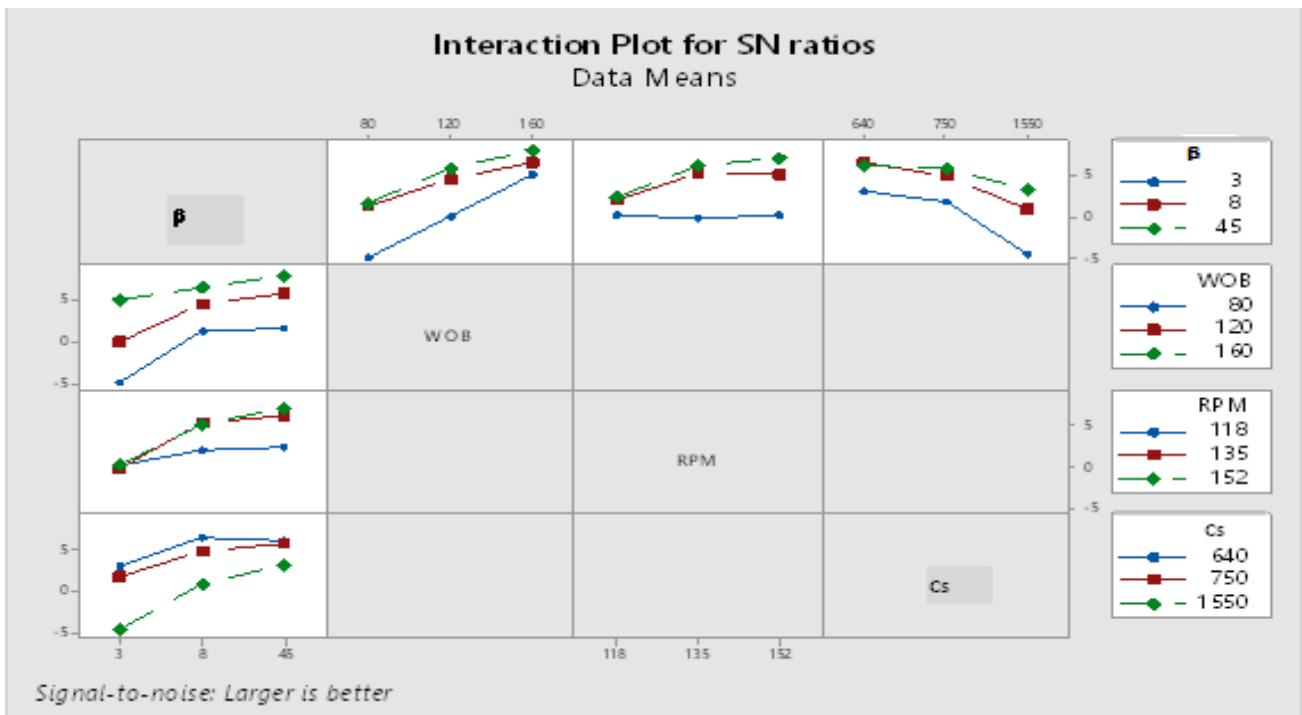


Figure 5.4: diagramme d'interaction pour ROP avec tous les facteurs

5.4.2. Analyses Statistiques (ANOVA-PARETO):

Pour l'analyse statistique des résultats obtenus lors de cette expérience, nous avons utilisé la méthode ANOVA (une méthode statistique très simple). rapide est également facile à utiliser sans besoin d'être testée par Fisher [64]. L'analyse ANOVA-Pareto permet de déterminer le pourcentage des paramètres et aussi de confirmer l'information de la prévalence et de l'effet des paramètres les plus importants de cette expérience. Nous avons utilisé la méthode ANOVA-Pareto avec le rapport signal / bruit (S / N) pour simplifier les résultats obtenus et les résumer dans le tableau 5.6. La somme des carrés des différences (SC) pour chaque facteur (SC_{β_3} , SC_{WOB_3} , SC_{RPM_3} et SC_{Cs_1}) est obtenue par l'équation suivante [66] :

$$SCA = (A_1 - A_3)^2 + (A_1 - A_2)^2 + (A_2 - A_3)^2 \tag{Eq 5.5}$$

Le rapport de contribution pour chacun des facteurs est calculé par la relation suivante:

$$C\% = SCA/SCT \quad (\text{Eq 5.6})$$

Où SCT est l'ensemble des sommes SC_i :

$$SCT = SCA + SCB + SCC + SCD \quad (\text{Eq 5.7})$$

Le tableau 5.5 montre l'analyse statistique initiale de la méthode ANOVA-Pareto:

Tableau 5.5 - Analyse de la variance (ANOVA-Pareto) du forage.

niveau	β	WOB	RPM	Cs
1	0,07282	-0,67865	1,48805	5,27688
2	4,10717	3,45100	3,70606	4,17415
3	5,14877	6,55640	4,13465	-0,12227
Somme des carrés de différences (SC)	43,126	79,0434	12,1075	48,826
Rapport de contribution (%)	23,552	43,168	6,612	26,665
Rang	3	1	4	2
Taux de contribution cumulé	93,385	43,168	100	69,833

5.4.3. Développement du modèle mathématique :

Le modèle mathématique du taux de pénétration à développer est:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_{iu} + \sum_i^n b_{ii} x_{iu}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_{iu} x_{ju} + \varepsilon \quad (\text{Eq 5.8}).$$

Après le traitement, les résultats obtenus statistiquement en utilisant la méthode ANOVA montrent les plus importants paramètres dans le modèle mathématique (Eq 5.8), où Y représente la réponse, x_{iu} et x_{ju} sont les paramètres d'entrée (facteurs), b_0 est la constante de l'équation de régression, b_i sont les coefficients linéaires, b_{ii} sont les coefficients quadratiques, b_{ij} sont les coefficients d'interaction et ε est l'erreur de montage [67,68].

Dans le tableau 5.6, les résultats de l'analyse présentent la moyenne du taux de pénétration. Au cours de l'étude, la variance est analysée pour le niveau de signification $\alpha = 5\%$, et le niveau de confiance est 95%.

Tableau 5.6 - Résultats d'ANOVA pour le taux de pénétration (ROP)

Source	ddl	AdjSS	AdjMS	F-Value	P-Value	Pc%
Regression	12	17.1073	1.42561	30.81	0.000	/
β	1	0.1410	0.14096	3.05	0.103	4.34
WOB	1	0.0168	0.01682	0.36	0.556	0.52
RPM	1	0.1522	0.15219	3.29	0.091	4.68
Cs	1	0.3058	0.30582	6.61	0.022	9.41
β*β	1	1.0250	1.02497	22.15	0.000	31.55
WOB*WOB	1	0.0046	0.00463	0.10	0.756	0.14
RPM*RPM	1	0.1147	0.11475	2.48	0.138	3.53
Cs*Cs	1	0.1444	0.14437	3.12	0.099	4.44
β*WOB	1	0.0780	0.07796	1.69	0.215	2.40
β*RPM	1	0.3933	0.39329	8.50	0.011	12.11
β*Cs	1	0.0019	0.00193	0.04	0.841	0.06
WOB*Cs	1	0.2233	0.22326	4.83	0.045	6.87
Error	14	0.6477	0.04627			
Total	26	17.7551				

Ce tableau représente la valeur du degré de liberté ddl, le total des degrés de liberté, et la quantité d'information des données dans les modèles attendus ainsi que dans Adj SS (Sommes ajustées des carrés), et Seq SS (Séquences séquentielles des carrés),

La somme des carrés (SS) est utilisée pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne:

$$SS_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Eq 5.9})$$

Où: $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ est la moyenne de la réponse.

\bar{y}_i est la moyenne de la réponse observée pendant l'expérience, où le facteur f prend le i^{th} niveau, N est le nombre total de tests, et N_{nf} est le niveau de chaque facteur f .

Les moyennes des carrés sont calculées par la relation suivante:

$$M_{Si} = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{Eq 5.10})$$

ddl : les degrés de liberté.

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, utilisez le rapport F. Les valeurs calculées F doivent être supérieures à celles obtenues à partir du tableau.

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_e} \quad (\text{Eq 5.11})$$

Où MS_e est le carré moyen d'erreur.

Le programme **Minitab** utilise la valeur F pour calculer la valeur P. La relation entre eux est une relation inverse de sorte que autant F augmente, P diminue. L'observation importante ici est que le pourcentage du rapport du coefficient de l'angle de coupe (4.34%), du poids sur le bit WOB (0.52%), de la vitesse de rotation RPM (4.68%) et de résistance à la compression (9.41%). cette dernière a des valeurs plus importantes par rapport aux autres coefficients qui ont des valeurs très faibles au niveau du modèle attendu. Le modèle attendu final pour le taux de pénétration est:

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & -8.41 + 0.0612 \beta + 0.0084 \text{ WOB} + 0.1506 \text{ RPM} - 0.00641 \text{ Cs} - 0.002441 \beta * \beta \\ & - 0.000017 \text{ WOB} * \text{WOB} - 0.000481 \text{ RPM} * \text{RPM} + 0.000002 \text{ Cs} * \text{Cs} + 0.000088 \beta * \text{WOB} \\ & + 0.000464 \beta * \text{RPM} + 0.000001 \beta * \text{Cs} + 0.000010 \text{ WOB} * \text{Cs} \end{aligned}$$

A partir du modèle et du tableau 5.7, on note qu'il y a six interactions entre les différents facteurs, cependant, le rapport de toutes les réactions est faible. L'interaction la plus importante est entre et RPM Avec une valeur de 12,11%, puis entre WOB et Cs avec 6.87%, suivie du β et WOB, qui est de 2.40%, β et Cs (0,06%), après WOB et RPM avec 0%, et 0,00% pour RPM et Cs. Tous ces pourcentage d'interactions sont inférieurs à 10, sauf l'interaction ($\beta * \text{RPM}$).

Pour connaître l'adéquation de ce modèle obtenu avec le modèle expérimental, il faut connaître le coefficient de détermination R-sq. Ce dernier distingue la relation entre les valeurs expérimentales et les valeurs attendues. C'est une mesure directe de la bonne adéquation où la valeur R-sq s'approche de 1 ($\text{R-sq} \approx 1$), le tableau 5.7 montre la valeur de R-sq avec d'autres valeurs:

Tableau 5.7 - Résumé du modèle

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,338997	96,35%	96,59%	4,70027	94,83%

D'après l'équation de la régression et le tableau 5.7 on peut conclure que le coefficient de sélection R-square est très élevé $\text{R-sq} = 96,35\%$. Cette valeur met en évidence un accord qualitatif entre l'expérimentation et la prédiction. Cette convergence qualitative est illustrée par la figure 5.5:

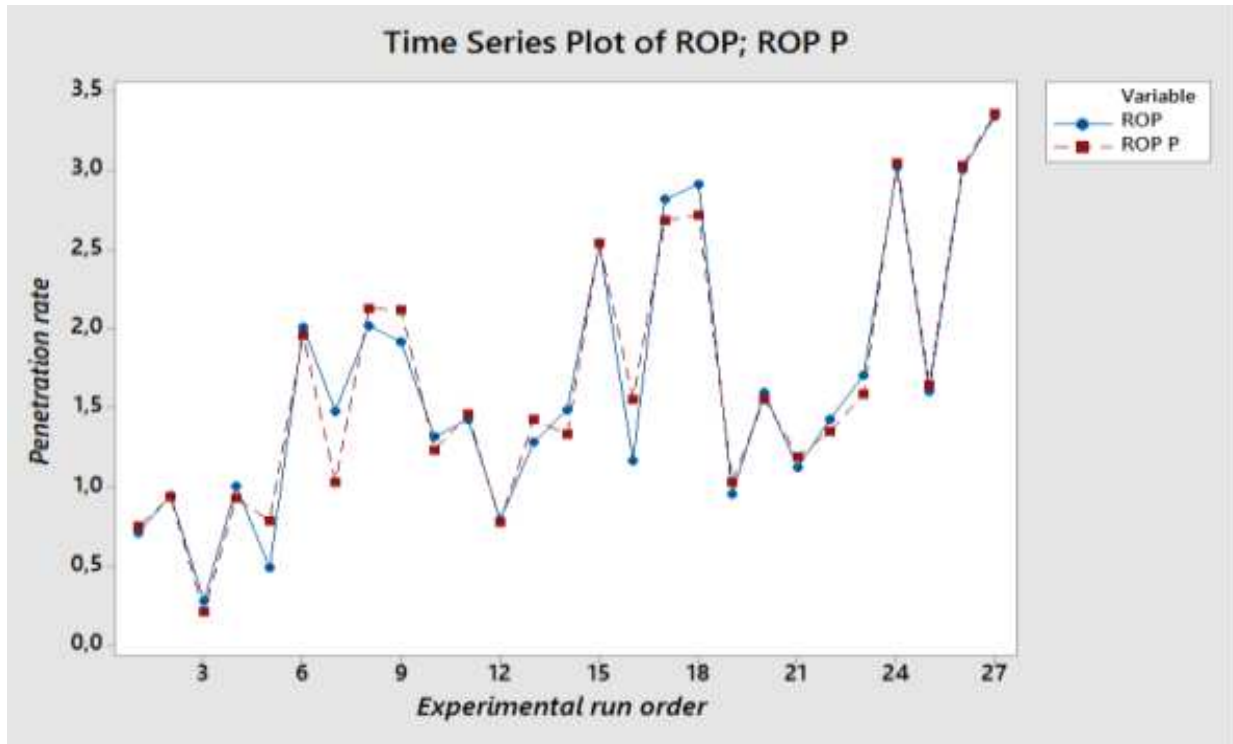


Figure 5.5: Valeurs expérimentales et valeurs prédites du taux de pénétration.

Les figure montre une grande convergence entre les deux courbes en termes de changement de valeurs, sauf dans les intervalles de l'index (8, 10) et (17, 19) où il y a une différence significative dans le taux de pénétration des deux modèles. Ainsi le taux de pénétration du modèle développé sur le premier intervalle est supérieur à 2, alors que pour les modèles expérimentaux il est inférieur à 2. Dans la seconde partie, le taux de pénétration du modèle développé dans les intervalles de l'index (8, 10) était supérieur à 2,7 et les modèles expérimentaux inférieurs à 2,7. Cela prouve que le modèle développé est plus cohérent et plus approprié pour prédire le taux de pénétration. À la fin de cette étude, le résidu du modèle de pénétration doit être défini comme la probabilité normale du taux de pénétration, comme il est indiqué sur la figure 5.6.

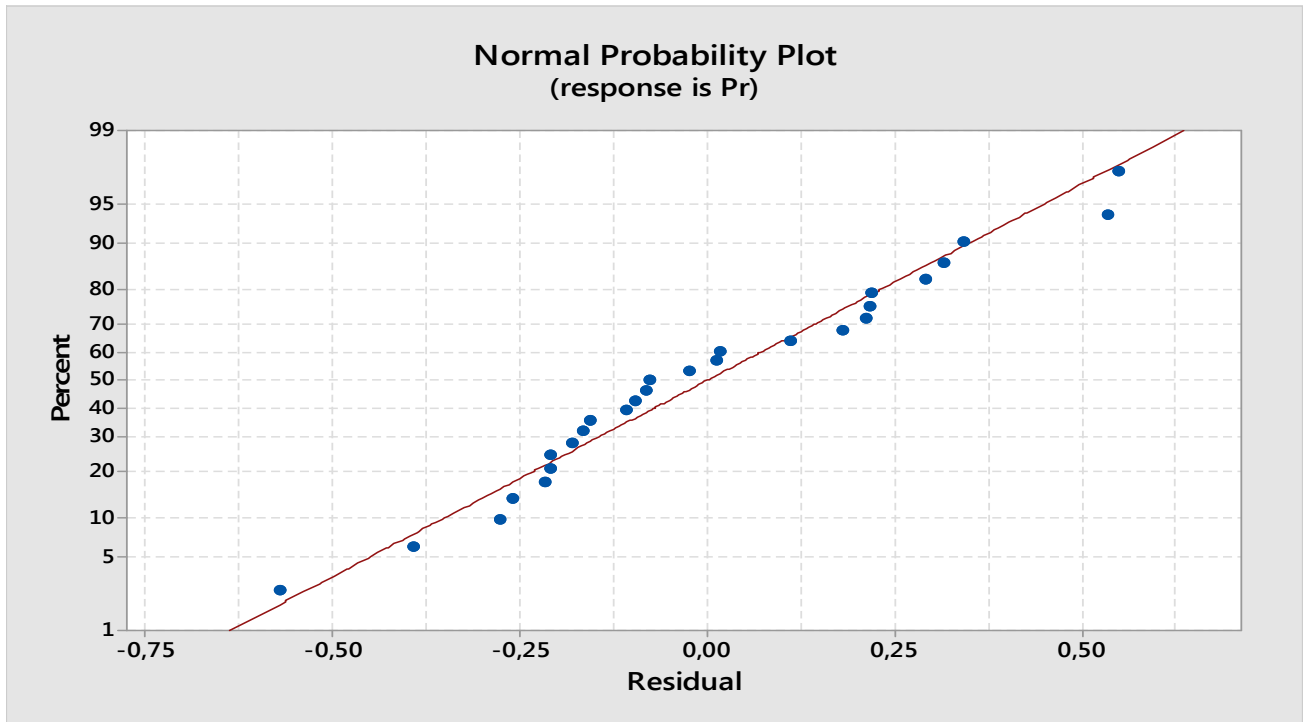


Figure 5.6: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (ROP).

Cette figure montre que les résultats sont distribués autour de la droite et à proximité de la ligne, les erreurs ont une distribution normale et raisonnable. On conclut donc que le modèle est adapté et utile.

Le modèle mathématique suivant concerne une machine de forage, sans tenir compte le facteur de qualité de la roche (résistance à la compression des roches C_s) pour la possibilité de contrôler les autres facteurs:

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & -0,0317 \beta - 0,0119 \text{ WOB} - 0,00298 \text{ RPM} + 0,000059 \beta * \text{WOB} \\ & + 0,000286 \beta * \text{RPM} + 0,000198 \text{ WOB} * \text{RPM} \end{aligned}$$

En supprimant le facteur de résistance à la pression de la roche dans les modèles, le coefficient de sélection (R-square) a changé et a diminué à 94,46%, (inférieur au premier facteur limitant), cette valeur sera toujours inacceptable, par ce qu'elle est inférieure à 95%.

Optimisation en utilisant la méthode de régression linéaire multiple

Pour assurer que la méthode de Taguchi est plus efficace que les méthodes conventionnelles, on a appliqué la méthode de régression linéaire multiple qui est l'une des méthodes classiques. Le résultat est présenté sur le tableau suivant et à l'annexe :

Tableau 5.8 - Statistiques de la régression

Coefficient de détermination multiple	0,923843491
Erreur-type	0,343865032
Observations	27

La première observation qu'on peut tirer de ce tableau est que R^2 est inférieur à 95%, ce qui indique que le modèle mathématique proposé par cette méthode sera rejeté et il est très faible, aussi

$R^2_{\text{(régression linéaire multiple)}} < R^2_{\text{(Taguchi)}}$ c'est-à-dire que la méthode de Taguchi est plus appropriée.

5.4.4. Validation de l'expérience

Une expérience de confirmation a été réalisée avec un résultat de niveau optimal de 3,48 mm / s. Le tableau 9 montre la différence d'erreur entre les réponses prédites et expérimentales. On peut observer que pour une analyse statistique fiable, les valeurs d'erreur doivent être inférieures à 20% (Cetin et al., 2011), de sorte que les pourcentages d'erreur se situent dans des limites acceptables. On peut donc déduire que le modèle empirique proposé peut prédire avec succès la ROP pendant le processus de forage. Tableau 9 Différence d'erreur entre les réponses prévues et expérimentales

Tableau 5.9 - différence d'erreur entre les réponses prédites et expérimentales

Penetration rate	Taguchi	Experimental	Error %
Initial A ₁ B ₁ C ₁ D ₁	0.877778	0.71	19.11
Optimal A ₃ B ₃ C ₃ D ₁	3.52222	3.48	1.20

5.5. Conclusion:

En ce chapitre, l'étude a montré que la méthode de Taguchi est très efficace et très utile dans ce type d'expériences. Avec le programme Minitab la méthode de Taguchi donne un modèle mathématique acceptable avec une très faible erreur de moins de 5%.

L'avantage de cette méthode est également qu'elle est facile à utiliser et ne nécessite pas un très grand nombre d'expériences, ainsi qu'elle donne le degré d'impact de chaque paramètre sur le taux de pénétration en comparant avec l'effet des autres paramètres.

Chapitre 6

Optimisation par la méthode de Taguchi pour chaque roche utilisée

Chapitre 6

6.1. Introduction

En dernier chapitre on a analysé et optimisé les résultats obtenues de la méthode de Taguchi pour chaque roche, on a étudié aussi l'impact des autres paramètres sur le taux de pénétration.

6.2. Analyse et Optimisation pour Chaque Roche

6.2.1. Application de la méthode de Taguchi :

Comme dans le chapitre précédent en utilisant la méthode de Taguchi, chaque facteur des trois examinés est évalué avec des codes comme indiqué dans le tableau 6.1.

La conception de l'expérience de Taguchi est basée sur trois niveaux différents pour chaque paramètre :

Tableau 6.1 - Facteurs et niveaux sélectionnés

Facteurs	Unit	Code	niveau		
			1	2	3
Angle de coupe	Degree	β	3	8	45
Poids sur l'outil	kgf	WOB	80	120	160
Vitesse de rotation	Rpm	RPM	118	135	152

Selon cette méthode, la table orthogonale L27 (la matrice orthogonale L27 de Taguchi), la matrice d'expérience est constituée de quatre colonnes en fonction des quatre facteurs variables, 27 chiffres pour chacune des quatre colonnes représentant un ensemble de valeurs sélectionnées par le modèle de Taguchi pour cette expérience.

Les 27 chiffres de la cinquième colonne représentent les valeurs expérimentales du taux de pénétration (ROP), la sixième et la dernière colonne représente le rapport de signal - bruit pour chaque taux de pénétration. ce dernier est calculé à partir de l'équation (Eq 5.3) :

Tableau 6.2 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche A (Cs=1550 kg/cm²)

Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)	Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)
1	3	80	118	0,15	-16,4782	15	8	120	152	1,67	4,4543
2	3	80	135	0,22	-13,1515	16	8	160	118	1,17	1,3637
3	3	80	152	0,28	-11,0568	17	8	160	135	1,56	3,8625
4	3	120	118	0,40	-7,9588	18	8	160	152	1,72	4,7106
5	3	120	135	0,49	-6,1961	19	45	80	118	0,85	-1,4116
6	3	120	152	0,56	-5,0362	20	45	80	135	1,01	0,0864
7	3	160	118	1,48	3,4052	21	45	80	152	1,13	1,0616
8	3	160	135	1,52	3,6369	22	45	120	118	1,66	4,4022
9	3	160	152	1,56	3,8625	23	45	120	135	1,71	4,6599
10	8	80	118	0,39	-8,1787	24	45	120	152	1,77	4,9595
11	8	80	135	0,48	-6,3752	25	45	160	118	1,61	4,1365
12	8	80	152	0,56	-5,0362	26	45	160	135	1,74	4,8110
13	8	120	118	0,81	-1,8303	27	45	160	152	2,18	6,7691
14	8	120	135	1,49	3,4637						

Tableau 6.3 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche B (Cs=750 kg/cm²)

Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)	Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)
1	3	80	118	0,87	-1,2096	15	8	120	152	2,47	7,8539
2	3	80	135	0,95	-0,4455	16	8	160	118	1,72	4,7106
3	3	80	152	1,22	1,7272	17	8	160	135	2,80	8,9432
4	3	120	118	1,01	0,0864	18	8	160	152	2,91	9,2779
5	3	120	135	1,22	1,7272	19	45	80	118	1,26	2,0074
6	3	120	152	1,69	4,5577	20	45	80	135	1,60	4,0824
7	3	160	118	1,53	3,6938	21	45	80	152	1,78	5,0084
8	3	160	135	1,70	4,6090	22	45	120	118	1,43	3,1067
9	3	160	152	1,92	5,6660	23	45	120	135	2,81	8,9741
10	8	80	118	1,19	1,5109	24	45	120	152	3,14	9,9386
11	8	80	135	1,43	3,1067	25	45	160	118	1,63	4,2438
12	8	80	152	1,68	4,5062	26	45	160	135	2,96	9,4258
13	8	120	118	1,29	2,2118	27	45	160	152	3,34	10,4749
14	8	120	135	1,51	3,5795						

Tableau 6.4 - le tableau orthogonal L27 Taguchi pour la roche C (Cs= 640 kg/cm²)

Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)	Tests	β	WOB	RPM	ROP	(S/N)
1	3	80	118	0,71	-2,9748	15	8	120	152	2,53	8,0624
2	3	80	135	0,98	-0,1755	16	8	160	118	2,43	7,7121
3	3	80	152	1,48	3,4052	17	8	160	135	2,82	9,0050
4	3	120	118	1,60	4,0824	18	8	160	152	3,18	10,0485
5	3	120	135	1,86	5,3903	19	45	80	118	0,96	-0,3546
6	3	120	152	2,01	6,0639	20	45	80	135	1,51	3,5795
7	3	160	118	1,80	5,1055	21	45	80	152	2,02	6,1070
8	3	160	135	2,02	6,1070	22	45	120	118	1,46	3,2871
9	3	160	152	2,21	6,8878	23	45	120	135	1,88	5,4832
10	8	80	118	1,32	2,4115	24	45	120	152	3,02	9,6001
11	8	80	135	1,86	5,3903	25	45	160	118	1,34	2,5421
12	8	80	152	1,92	5,6660	26	45	160	135	3,01	9,5713
13	8	120	118	1,96	5,8451	27	45	160	152	3,48	10,8316
14	8	120	135	2,17	6,7292						

6.2.2. Analyse de Taguchi: POR contre B; WOB; RPM

Selon l'équation (Eq 5.3). 'Le plus supérieur est le meilleur', la valeur maximale du rapport signal-bruit S / N correspond au meilleur rapport du taux de pénétration. Le niveau optimal de chacun des trois facteurs correspond au rapport signal - bruit S / N le plus élevé, est illustré sur les tableaux suivants:

Tableau 6.5- *Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche A)*

Level	β	WOB	RPM
1	-5,4415	-6,7267	-2,5056
2	-0,3962	0,1020	-0,5780
3	3,2750	4,0620	0,5209
Delta	8,7164	10,7887	3,0265
Rank	2	1	3

Tableau 6.6- *Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche B)*

Level	β	WOB	RPM
1	2,268	2,255	2,262
2	5,078	4,671	4,889
3	6,362	6,783	6,557
Delta	4,094	4,528	4,294
Rank	3	1	2

Tableau 6.7- *Tableau des réponses pour les rapports signal / bruit (pour la roche C)*

Level	β	WOB	RPM
1	3,766	2,562	3,073
2	6,763	6,060	5,676
3	5,627	7,535	7,408
Delta	2,998	4,973	4,335
Rank	3	1	2

Les tableaux 5,6 et 7 montre les facteurs idéaux correspondant au meilleur rapport du signal - bruit avec le meilleur taux de pénétration, ainsi que le rapport S / N moyen correspondant à chacun des trois facteurs de contrôle sur trois niveaux. Ces tableaux montrent également l'ordre de propagation de chaque facteur (l'ordre de l'influence de chacun des trois facteurs de contrôle).

6.2.3. Interprétation des résultats obtenus:

Les figures 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 et 6.6 présentent une traduction graphique des tableaux 6.5, 6.6 et 6.7 qui montrent le rapport moyen du rapport signal - bruit en fonction des niveaux de facteurs influençant le taux de pénétration

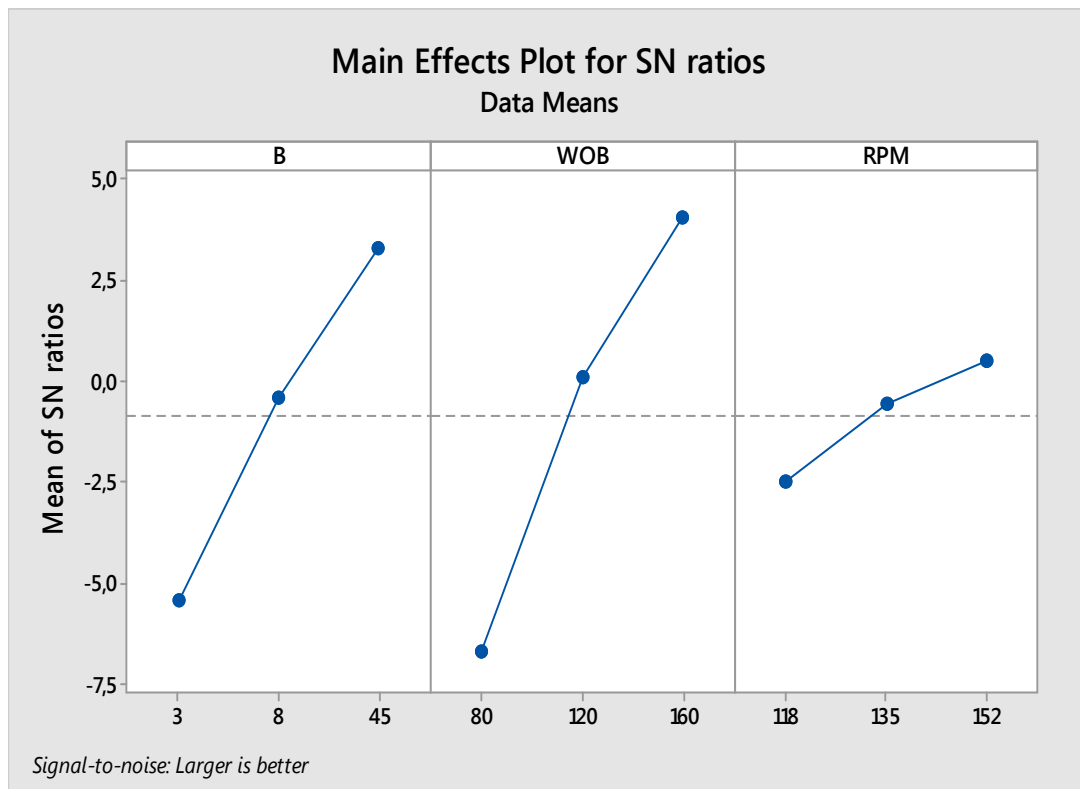


Figure 6.1: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche A).

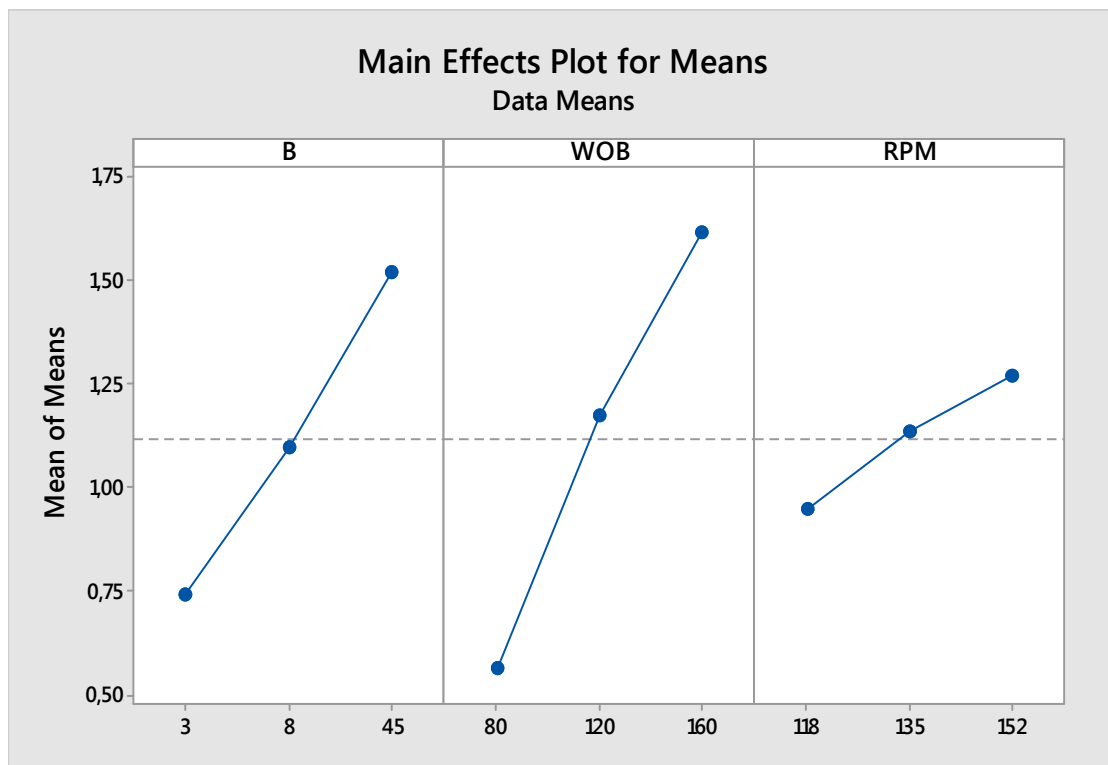


Figure 6.2: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche A).

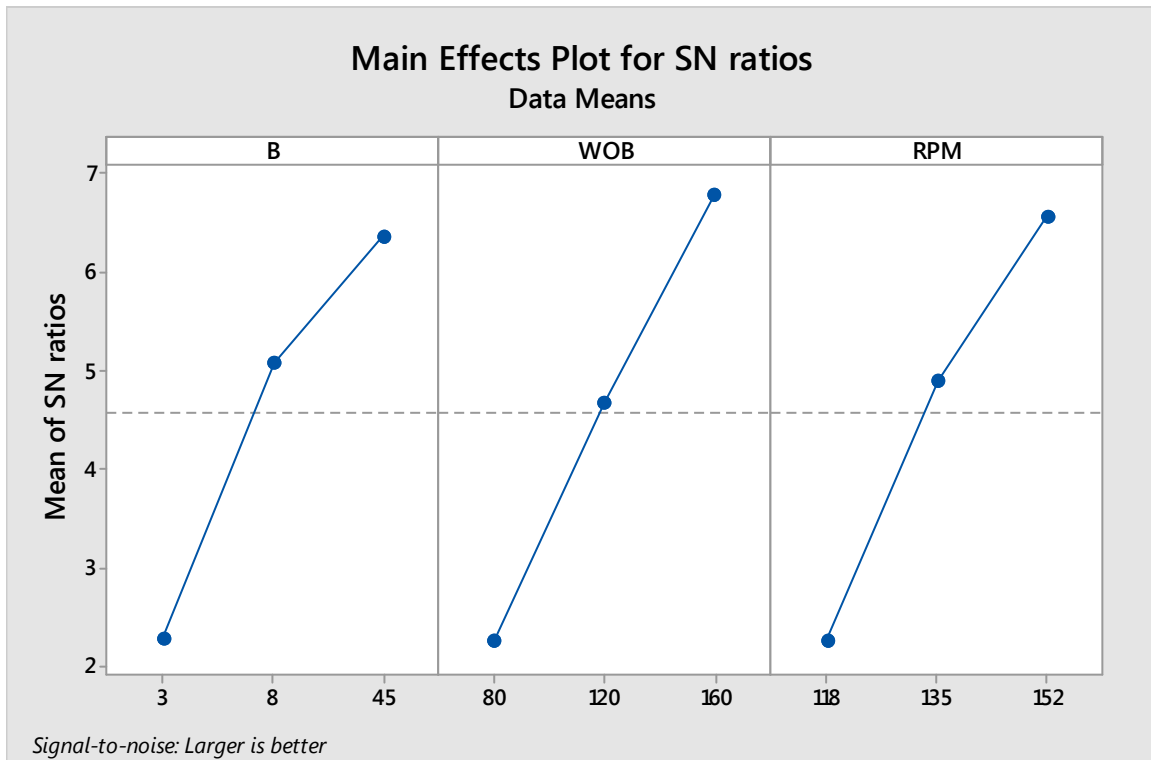


Figure 6.3: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche B).

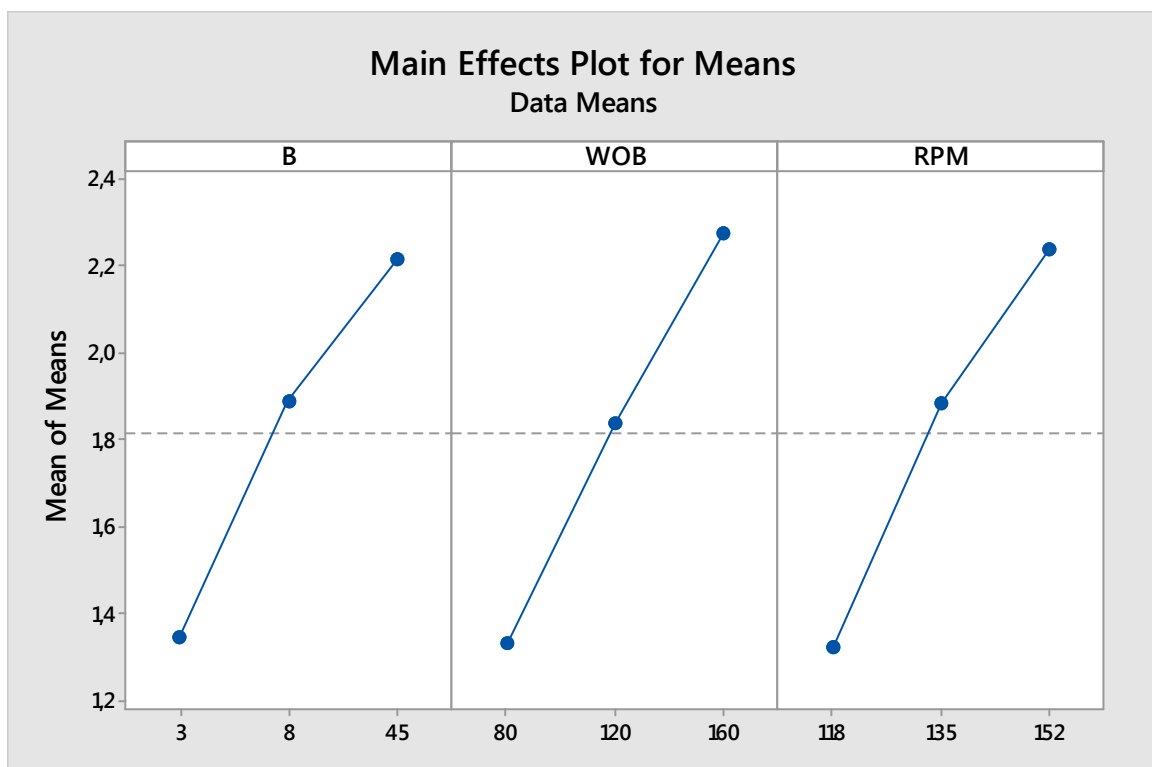


Figure 6.4: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche B).

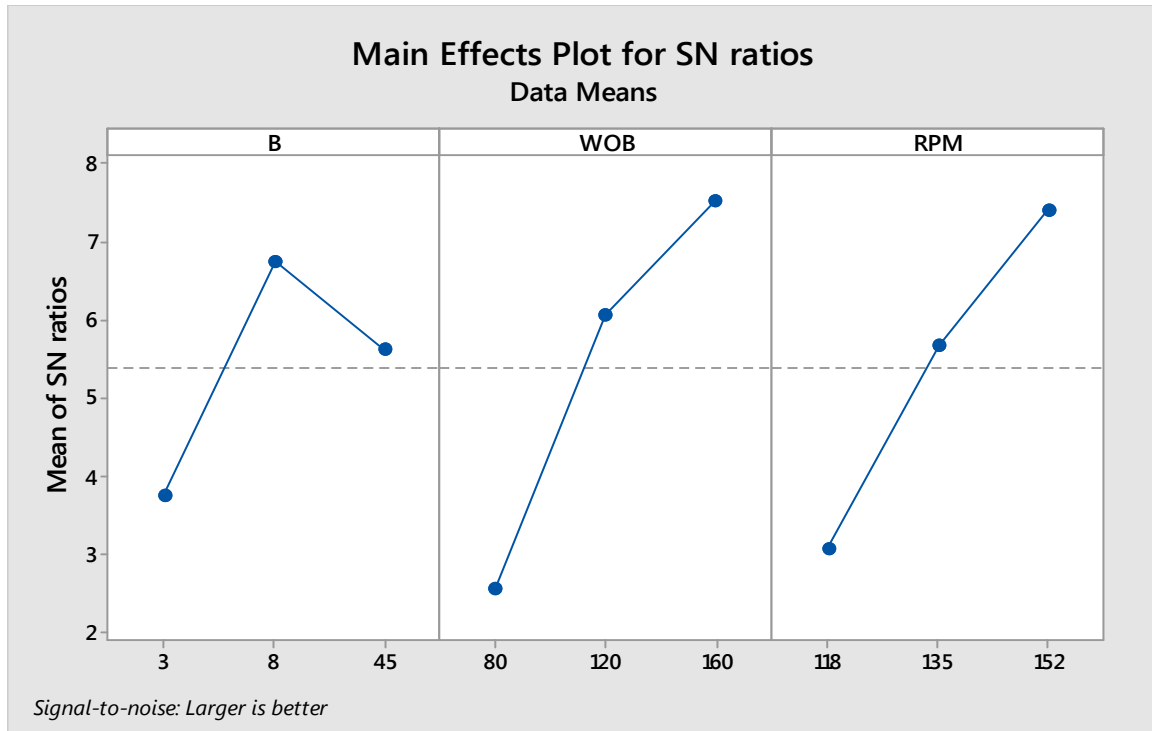


Figure 6.5: effets du facteur du rapport [S/N] sur le taux de pénétration ROP (pour la roche C).



Figure 6.6: Principaux effets sur le taux de pénétration ROP (pour la roche C).

La lecture des courbes et des tableaux est différente du chapitre précédent, en raison de la grande influence du facteur de nature de la roche qui se manifeste par la résistance des roches Cs. Dans le chapitre précédent, ce facteur était considéré comme un facteur variable, par

contre dans ce chapitre est resté constant même s'il joue un rôle important dans le résultat. Pour la première roche A ($C_s = 1550 \text{ kg / cm}^3$), la roche la plus dure parmi les autres. On note que chaque facteur a un degré d'impact. Selon le degré de cet impact les facteurs sont classés comme suit: Le poids de compression(WOB), puis l'angle de coupe (β) et finalement la vitesse de rotation (RPM).

Mais pour les roches B et C, qui sont moins dure que la première, le degré de l'impact de l'angle de coupe a affaibli jusqu'à la troisième place. Tandis que le poids de compression est resté comme le facteur qui a l'effet le plus puissant.

Dans ces conditions expérimentales, les résultats obtenus (voir Tableau 8) montrent que les effets de WOB sur le taux de pénétration sont supérieurs à ceux de RPM et de β dans toutes les roches A, B et C.

Tableau 6.8 - les paramètres optimaux de l'outil

	Roche A			Roche B			Roche C		
Facteur (niveau)	β_3	WOB ₃	RPM ₃	β_3	WOB ₃	RPM ₃	β_2	WOB ₃	RPM ₃
Valeur	45	160	152	45	160	152	8	160	152
S / N	3,2750	4,0620	0,5209	6,362	6,783	6,557	6,763	7,535	7,408
rang	2	1	3	3	1	2	3	1	2

Les trois facteurs précédents sont liés à la pénétration de l'outil, le facteur (C_s est ajouté aux autres facteurs), la qualité des roches de cette expérience étant déterminée au préalable.

- La formule des transactions homologues pour la roche A sont β_3 , WOB₃, RPM₃.
- La formule des transactions homologues pour la roche B sont β_3 , WOB₃, RPM₃.
- La formule des transactions homologues pour la roche C sont β_2 , WOB₃, RPM₃.

6.2.4. Analyse de régression: ROP contre B; WOB; RPM

Les résultats de l'analyse de la moyenne de taux de pénétration sont présentés dans les tableaux 9, 10 et 11.

Dans l'étude, la variance est analysée pour le niveau de signification $\alpha = 5\%$, et le niveau de confiance est 95%.

Analyse de la variance

Tableau 6.9 - Résultats d'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE A)

Source	DF	Adj SS	Contribution	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	42,0667	97,54%	4,67408	79,60	0,000
β	1	0,3440	0,7977%	0,34398	5,86	0,026
WOB	1	0,0310	0,0718%	0,03097	0,53	0,477
RPM	1	0,1329	0,3081%	0,13294	2,26	0,150
$\beta*\beta$	1	0,3415	0,7910%	0,34146	5,81	0,027
WOB*WOB	1	0,0359	0,0832%	0,03587	0,61	0,445
RPM*RPM	1	0,0454	0,1052%	0,04538	0,77	0,391
$\beta*$ WOB	1	0,1095	0,2539%	0,10953	1,87	0,189
$\beta*$ RPM	1	0,0018	0,0041%	0,00184	0,03	0,862
WOB*RPM	1	0,0493	0,1143%	0,04931	0,84	0,372
Error	18	1,0570	2,46%	0,05872		
Total	27	43,1237	100,00%			

Tableau 6.10 - Résultats d'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE B)

Source	DF	Adj SS	Contribution	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	101,239	98,556%	11,2488	137,15	0,000
β	1	0,134	0,1304%	0,1339	1,63	0,218
WOB	1	0,067	0,0652%	0,0671	0,82	0,378
RPM	1	0,008	0,0077%	0,0082	0,10	0,755
$\beta*\beta$	1	0,963	0,9374%	0,9633	11,75	0,003
WOB*WOB	1	0,004	0,0038%	0,0038	0,05	0,831
RPM*RPM	1	0,030	0,0292%	0,0302	0,37	0,552
$\beta*$ WOB	1	0,067	0,0652%	0,0675	0,82	0,376
$\beta*$ RPM	1	0,433	0,4215%	0,4332	5,28	0,034
WOB*RPM	1	0,401	0,3903%	0,4008	4,89	0,040
Error	18	1,476	1,4440%	0,0820		
Total	27	102,715	100,00%			

Tableau 6.11 - Résultats d'ANOVA pour le taux de pénétration (ROCHE C)

Source	DF	Adj SS	Contribution	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	117,964	99,32%	13,1071	295,27	0,000
β	1	0,098	0,0825%	0,0976	2,20	0,155
WOB	1	0,018	0,0151%	0,0182	0,41	0,530
RPM	1	0,043	0,0362%	0,0425	0,96	0,341
$\beta*\beta$	1	0,1571	1,3227%	1,5710	35,39	0,000
WOB*WOB	1	0,060	0,0502%	0,0603	1,36	0,259
RPM*RPM	1	0,013	0,0109%	0,0131	0,30	0,594
$\beta*$ WOB	1	0,010	0,0084%	0,0100	0,23	0,641
$\beta*$ RPM	1	0,1038	0,0873%	1,0384	23,39	0,000
WOB*RPM	1	0,090	0,0757%	0,0898	2,02	0,172
Error	18	0,799	0,68%	0,0444		
Total	27	118,763	100,00%			

Les modèles attendus finals pour le taux de pénétration sont:

- Pour la roche A

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & 0,0943 B + 0,0143 \text{ WOB} - 0,0270 \text{ RPM} - 0,001408 B*B - 0,000048 \text{ WOB*WOB} \\ & + 0,000092 \text{ RPM*RPM} - 0,000104 B*\text{WOB} + 0,000032 B*\text{RPM} + 0,000091 \text{ WOB*RPM} \end{aligned} \quad (\text{Eq 6.1})$$

- Pour la roche B

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & 0,0588 B - 0,0210 \text{ WOB} + 0,0067 \text{ RPM} - 0,002366 B*B - 0,000016 \text{ WOB*WOB} - \\ & 0,000075 \text{ RPM*RPM} + 0,000082 B*\text{WOB} + 0,000486 B*\text{RPM} + 0,000260 \text{ WOB*RPM} \end{aligned} \quad (\text{Eq 6.2})$$

- Pour la roche C

$$\begin{aligned} \text{ROP} = & 0,0502 B + 0,0109 \text{ WOB} - 0,0153 \text{ RPM} - 0,003021 B*B - 0,000062 \text{ WOB*WOB} \\ & + 0,000050 \text{ RPM*RPM} + 0,000031 B*\text{WOB} + 0,000752 B*\text{RPM} + 0,000123 \text{ WOB*RPM} \end{aligned} \quad (\text{Eq 6.3})$$

Tableau 6.12 - Résumé du modèle

	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
Roche A	0,242325	97,55%	96,32%	94,85%
Roche B	0,286384	98,56%	97,84%	96,49%
Roche C	0,210690	99,33%	98,99%	98,06%

À la fin de cette étude, le résidu des modèles de pénétration doit être défini comme la probabilité normale du taux de pénétration. Il est indiqué sur les figures 7,8 et 9.

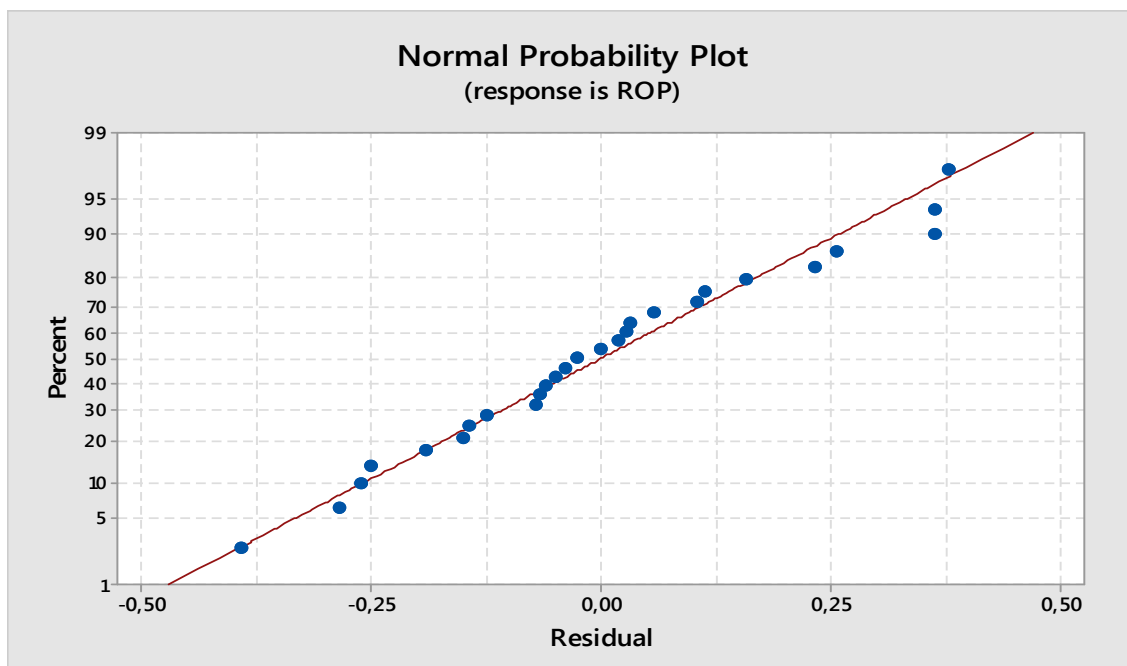


Figure 6.7: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche A)

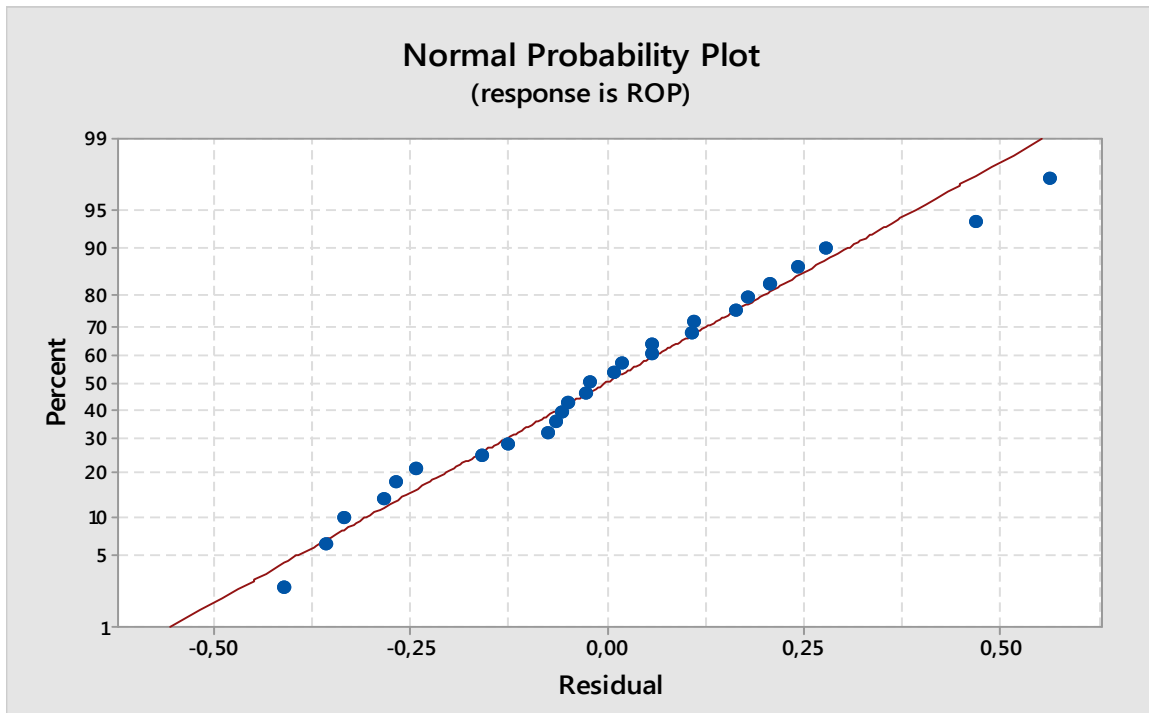


Figure 6.8: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche B)

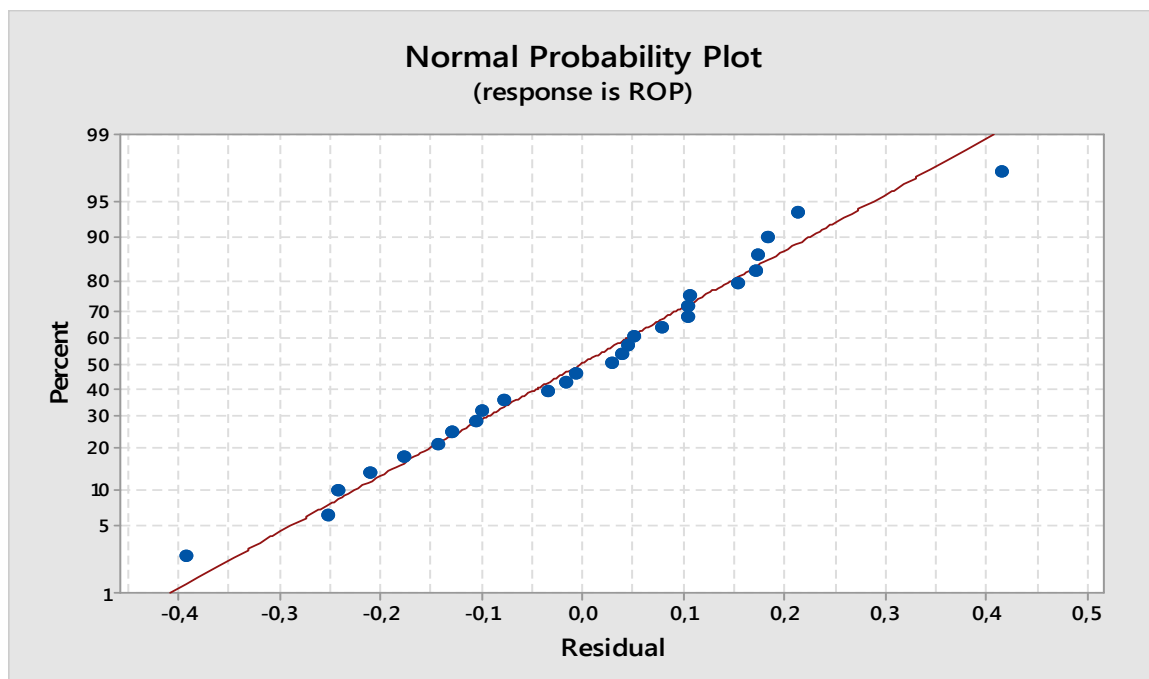


Figure 6.9: diagramme de distribution potentielle normale des résidus pour le taux de pénétration (Roche C)

Ces figures montrent que les résultats sont distribués autour de la droite et à proximité de la ligne. Les erreurs ont une distribution normale et raisonnable. Donc on peut conclure que les modèles sont adaptés et utiles.

6.3. Influence des autres Paramètres Géométrique du Taillant

6.3.1. Influence de la forme et la section de coupe

Les taillants d'outils de forage se distinguent par la forme de leur section de coupe autant dans le domaine pétrolier que dans le domaine minier. Une section étroite à sa base a tendance à concentrer les contraintes au niveau de l'arête de coupe tandis qu'une forme large a tendance à répartir ces contraintes. En outre, le phénomène d'écaillage des bords de saignée qui dépend de la forme du taillant, augmente le rapport entre la surface de la roche abattue et la section de coupe qui encaisse les efforts. L'évolution de l'énergie spécifique avec la forme de la section peut donc s'avérer complexe.

Dans le cadre du pôle fragile, SELAMI (1984) aborde la question de l'influence de la forme de la section sur la ductilité du processus en rapportant les travaux de DAHAN (1979). Ce dernier s'appuie sur les travaux de BOUSSINESQ (1885) portant sur le chargement axisymétrique d'un milieu semi-infini élastique, homogène et isotrope. L'auteur détermine analytiquement la relation entre la force de pénétration et le déplacement imposé. DAHAN (1979) applique ces résultats à des poinçons de profils variés (plat, sphérique ou conique). SELAMI (1984) applique ces résultats à la pénétration (horizontale) de pics miniers avec des profils correspondants. Ils montrent ainsi qu'avant la rupture, le taillant exerce sur la roche une force de pénétration (F) qui est liée à la pénétration du taillant (y) par une loi puissance dont l'exposant dépend de la forme du pic :

$$F(y) = Ay^m \text{ avec } m = 1 \text{ (plat)} ; m = 3/2 \text{ (sphérique)} ; m = 2 \text{ (conique)} \quad (\text{Eq. 6.4})$$

Comme les taillants se déplacent à vitesse constante dans la roche, ces relations fournissent l'évolution de l'effort de coupe au cours du cycle de chargement-rupture d'un copeau. Les auteurs établissent ainsi la relation entre l'effort moyen (au cours du cycle) et le maximum d'effort atteint au moment de la rupture du copeau :

$$F_C^{\text{moy}} = \frac{1}{m+1} F_C^{\text{max}} \quad (\text{Eq. 6.5})$$

Cette démarche analytique conduit à une estimation théorique de la ductilité apparente du processus de coupe inscrite dans les variations temporelles de l'effort de coupe. DELIAC (1986) valide sa démarche en observant un bon accord entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales du rapport $F_C^{\text{moy}}/F_C^{\text{max}}$. L'exposant m , variant de 1 à 2, n'est rien d'autre que le coefficient de ductilité apparente de (SELAMI, 1990). Cette démarche n'est cependant pas applicable au pôle ductile car la coupe ne génère pas de copeaux macroscopiques et l'hypothèse de déformation purement élastique tombe. En effet, dans le pôle ductile, les déformations plastiques peuvent être significatives, même dans des roches au comportement fragile (DETOURNAY & DRESCHER, 1992). On verra que la pression de boue accentue ce phénomène. Dans le cas du pôle ductile, nous n'avons connus que des travaux de CHEATHAM & DANIELS (1979) portant sur l'étude expérimentale d'argilites sous pression de boue. Les

auteurs testent trois types de sections (triangulaire, carré et cylindrique) et montrent que celle-ci n'a pas d'influence sur l'énergie spécifique. Mais les argilites sous pression de boue se déforment de manière plastique lorsqu'elles sont soumises à l'action d'un taillant et l'on ne saurait étendre ce résultat aux grès et aux calcaires qui se déforment de manière plus fragile et sont plus sujets au phénomène d'écaillage des bords de saignée [69].

C'est ce qu'on a constaté en les résultats de nos expériences où la surface de frottement joue un rôle important sur le taux de pénétration.

La surface de frottement S liée à l'angle de coupe, comme est indiqué dans les figures suivantes :

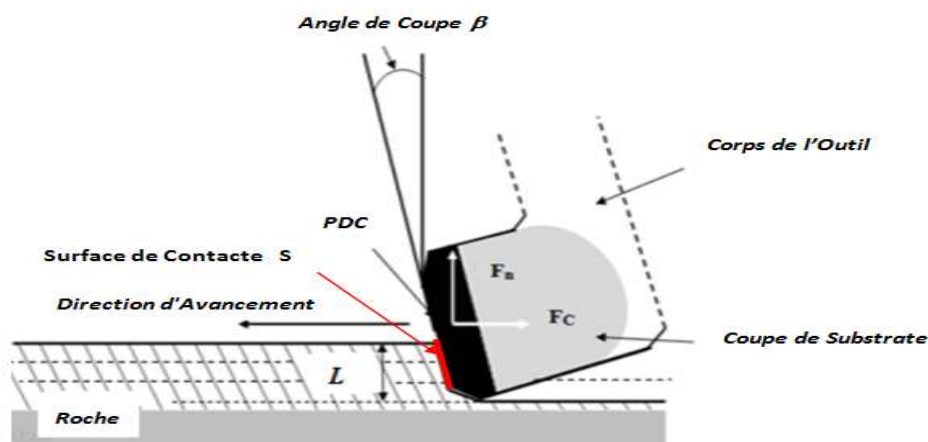


Figure 6.10 : Construction d'un cutter PDC

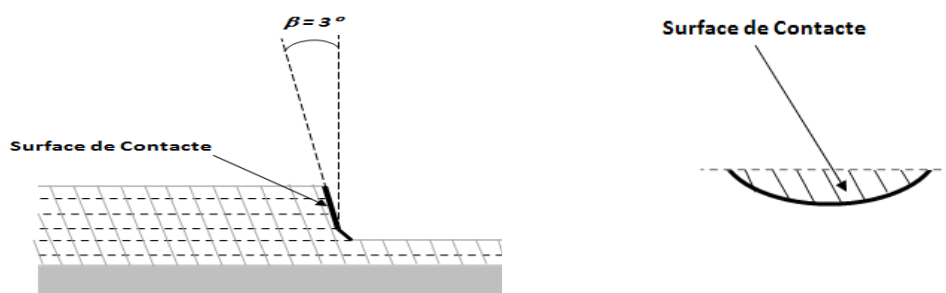


Figure 6.11 : Relation d'angle de coupe $\beta 1$ avec surface de frottement $S 1$

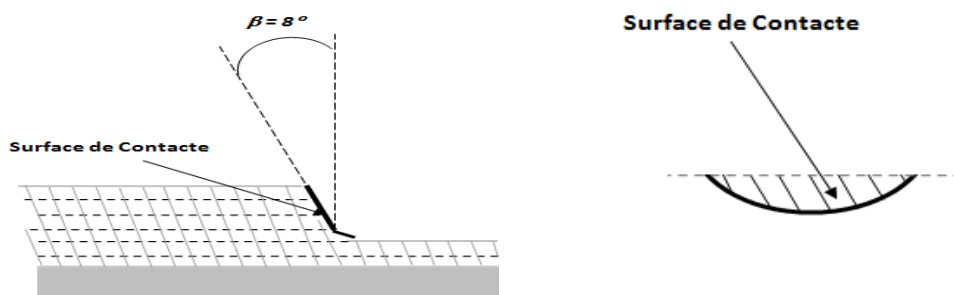


Figure 6.12 : Relation d'angle de coupe $\beta 2$ avec surface de frottement $S 2$



Figure 6.13 : Relation d'angle de coupe β avec surface de frottement S

Pour assurer davantage de cette relation qui lie la surface de frottement S avec le taux de pénétration ROP on revient aux tableaux 6.2, 6.3 et 6.4, où on observe que le taux de pénétration augmente avec l'augmentation de l'angle de coupe, en particulier pour la roche C qui est la plus fragile que les autres, comme dans le tableau suivant:

Tableau 6.13 – la relation Entre angle de coupe β et ROP

β°	WOB [kgf]	RPM [tr/min]	ROP _A [mm/s]	ROP _B [mm/s]	ROP _C [mm/s]
3	80	118	1,56	1,92	2,21
8	120	135	1,72	2,91	3,18
45	160	152	2,18	3,34	3,48

6.3.2. Influence de la largeur du taillant

LEBRUN (1978) rapporte les travaux de Roxborough & Phillips (1974) selon lesquels l'énergie spécifique reste sensiblement constante avec la largeur du pic, avec une légère tendance à la décroissance. RICHARD (1998) a testé l'influence de la largeur de taillants rectangulaires et montré que la transition ductile-fragile se produit à la même profondeur de passe pour toutes les taillants testés (largeurs comprises entre 4.8 et 14.25 mm). Pour des taillants cylindriques, GERBAUD (1999) confirme que les taillants de petit diamètre (8 mm) sont aussi efficaces que les taillants de grand diamètre (19 mm) et valide ce résultat à l'échelle de l'outil de forage [69].

Les expériences pour changer le diamètre du coupeur PDC sont nombreuses et leurs résultats sont claires, bien que on a fait une petite expérience où on a varié le diamètre du coupeur PDC pour trouver lequel des diamètres mieux adaptés à la roche C et les résultats présentés dans le tableau suivant:

Tableau 6.14 – la relation entre diamètre de coupeur et ROP

\varnothing [mm]	β°	WOB [kgf]	RPM [tr/min]	ROP _A [mm/s]	ROP _B [mm/s]	ROP _C [mm/s]
13	3	80	118	0,15	0,87	0,71
08	3	80	118	0,23	0,76	0,65

La relation est un peu proportionnelle entre l'angle de coupe et la surface de frottement avec le taux de pénétration, comme celle qui relie le diamètre du coupeur PDC et la surface de frottement avec le taux de pénétration.

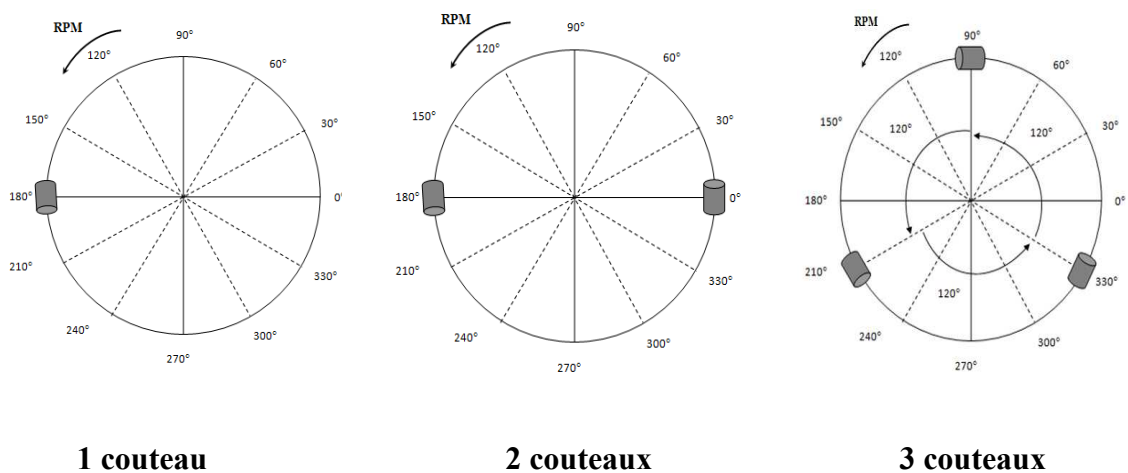
A partir de cette partie de la recherche on a conclu que pour les roches les plus fragiles il est préférable d'assurer une surface de frottement S plus grande. On peut augmenter cette surface soit par l'augmentation l'angle de coupe, soit par agrandir le diamètre de la dent du coupeur PDC, et le contraire pour les roches les plus dures, la surface de frottement S soit plus petite avec un angle de coupe aussi plus petite, et un diamètre réduit.

6.4. Autres impacts sur le taux d'avancement

Ce qui concerne l'outil de forage, il y a d'autres facteurs qui influent le taux d'avancement, tel que la densité des pastilles dans l'outil PDC (Influence de la densité de taillants), cela est montré dans le tableau suivant :

Tableau 6.15 – la relation entre densité de coupeur et ROP

\varnothing [mm]	β°	WOB [kgf]	RPM [tr/min]	Cs kg/cm ²	ROP [mm/s] 1 couteau	ROP [mm/s] 2 couteaux	ROP [mm/s] 3 couteaux
13	3	80	118	640	0,71	1,53	2,18

**Figure 6.14** : distribution des pastilles autour du chemin de forage

Ainsi que la distance entre la dent de pastille et le centre de l'outil a un autre impact sur le taux d'avancement ce qui est dépend à la vitesse de rotation. La vitesse de rotation augmente avec la diminution de cette distance.

6.5. Conclusion:

Il est noté dans ce chapitre que l'angle de coupe est étroitement lié à la résistance de la roche, de sorte que l'impact de l'angle de coupe est plus important pour les roches les plus dures, cela s'explique par le fait que la zone de frottement S est augmentée avec l'augmentation de l'angle de coupe et l'outil PDC se fonctionne mieux.

Par contre pour les roches fragiles, comme dans la roche C, il vaut mieux avoir un angle de coupe plus faible. Ceci a été évident montrant où le deuxième angle de coupe β_2 était mieux que le troisième.

Il devrait noter qu'il est mieux si le diamètre du PDC est plus grand avec l'angle de coupe est plus grand aussi, pour les roches fragiles. Pour que le taux de coupe de la roche soit plus important, ainsi que le taux de pénétration est également significatif.

Conclusion

générale

Conclusion

Nous avons divisé notre travail en trois axes principaux: construire un appareil de test similaire à une machine de forage pétrolier, en étudiant la variation de plusieurs facteurs pour différentes natures de roches, en prenant en compte les variations des différents paramètres tels que la vitesse et le poids sur le trépan et l'angle de coupe. Le deuxième axe est consacré à l'étude de la variation de l'angle de coupe (un paramètre géométrique d'autres paramètres du bit, pour connaître leur impact sur le taux de pénétration. L'objectif du troisième axe est le point focal de cette étude. Celle-ci est basée sur l'application des probabilités sur la plateforme de forage en utilisant la méthode de conception expérimentale de Taguchi qui offre certains avantages dont le plus important est le nombre réduit d'expériences avec des délais courts; ce qui contribue grandement à réduire les coûts. En utilisant le rapport signal-bruit et l'analyse de contraste (ANOVA-Pareto), nous avons obtenu le rapport de la contribution de tous les facteurs au taux de pénétration. Les valeurs optimales pour le fonctionnement d'une foreuse de laboratoire ont été déterminées (le troisième niveau de la vitesse de rotation RPM3, le troisième niveau de poids sur le trépan WOB3, et le troisième niveau de l'angle de coupe B3), avec une valeur optimale des roches (le premier niveau Cs1). Sur la base de l'analyse, des résultats par la méthode de conception Taguchi, un modèle mathématique du taux de pénétration a été développé. Les résultats obtenus montrent que l'effet du paramètre de l'angle de coupe est remarquable, avec une contribution à l'effet de l'interaction entre les facteurs.

Statistiquement, les facteurs restent plus importants pour le développement du taux de pénétration lorsque l'effet d'interaction entre les facteurs est très fort.

L'angle de coupe est étroitement lié à la résistance des roches, de sorte que l'impact de l'angle de coupe est plus important pour les roches les plus dures, Cela s'explique par le fait que la zone de frottement S est augmentée avec l'augmentation de l'angle de coupe et l'outil PDC se fonctionne mieux.

Par contre pour les roches fragiles, comme dans la roche C, il vaut mieux avoir un angle de coupe plus faible. Ceci a été évident montrant où le deuxième angle de coupe β_2 était mieux que le troisième.

Il devrait noter qu'il est mieux si le diamètre du PDC et l'angle de coupe sont suffisamment grands, pour les roches fragiles.. Pour que le taux de coupe de la roche soit plus important, ainsi que le taux de pénétration est également significatif.

Conclusion

générale

Conclusion

Nous avons divisé notre travail en trois axes principaux: construire un appareil de test similaire à une machine de forage pétrolier, en étudiant la variation de plusieurs facteurs pour différentes natures de roches, en prenant en compte les variations des différents paramètres tels que la vitesse et le poids sur le trépan et l'angle de coupe. Le deuxième axe est consacré à l'étude de la variation de l'angle de coupe (un paramètre géométrique d'autres paramètres du bit, pour connaître leur impact sur le taux de pénétration. L'objectif du troisième axe est le point focal de cette étude. Celle-ci est basée sur l'application des probabilités sur la plateforme de forage en utilisant la méthode de conception expérimentale de Taguchi qui offre certains avantages dont le plus important est le nombre réduit d'expériences avec des délais courts; ce qui contribue grandement à réduire les coûts. En utilisant le rapport signal-bruit et l'analyse de contraste (ANOVA-Pareto), nous avons obtenu le rapport de la contribution de tous les facteurs au taux de pénétration. Les valeurs optimales pour le fonctionnement d'une foreuse de laboratoire ont été déterminées (le troisième niveau de la vitesse de rotation RPM3, le troisième niveau de poids sur le trépan WOB3, et le troisième niveau de l'angle de coupe B3), avec une valeur optimale des roches (le première niveau Cs1). Sur la base de l'analyse, des résultats par la méthode de conception Taguchi, un modèle mathématique du taux de pénétration a été développé. Les résultats obtenus montrent que l'effet du paramètre de l'angle de coupe est remarquable, avec une contribution à l'effet de l'interaction entre les facteurs.

Statistiquement, les facteurs restent plus importants pour le développement du taux de pénétration lorsque l'effet d'interaction entre les facteurs est très fort.

L'angle de coupe est étroitement lié à la résistance des roches, de sorte que l'impact de l'angle de coupe est plus important pour les roches les plus dures, Cela s'explique par le fait que la zone de frottement S est augmentée avec l'augmentation de l'angle de coupe et l'outil PDC se fonctionne mieux.

Par contre pour les roches fragiles, comme dans la roche C, il vaut mieux avoir un angle de coupe plus faible. Ceci a été évident montrant où le deuxième angle de coupe β_2 était mieux que le troisième.

Il devrait noter qu'il est mieux si le diamètre du PDC et l'angle de coupe sont suffisamment grands, pour les roches fragiles.. Pour que le taux de coupe de la roche soit plus important, ainsi que le taux de pénétration est également significatif.

Références

Références

- [1] Amadou-Abdoulaye BA. *Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier* Doctorat ParisTech 31 mars. 2010
- [2] SCHLUMBERGER. *introduction to Drilling fluids, OilWell Drilling Vol. 3, CD Training Technomedia International INC, 1997.*
- [3] BAKERHUGHES. *Bit Hydraulics, BASIC DRILLING SERIES, CD Training Technomedia International INC. 1999.*
- [4] J.P.Nguyen. *Le forage, techniques d'exploitation pétrolière. éditions technip, paris et institut français du pétrole. 1993.*
- [5] Mr. HARCHOUCHE Zaoui. *Forage au diamant et carottage. Centre de Développement et d'Application des Techniques Pétroliers et Gazières.*
- [6] CULIOLI jean-christophe. *Introduction à l'optimisation. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 1994.*
- [7] N. NOUI et N. FARES. *Mémoire MASTER spécialisé. Paramètres d'un forage horizontal. IAP, 2006.*
- [8] Schlumberge. *Anadrill Technical Specifications. Version 2.1. July 1999.*
- [9] MAURER (W.C.). *Bit-tooth penetration under simulated borehole conditions. S.P.E. annual fell meeting, Denver. 3 au 6 octobre 1965.*
- [10] A. Choquin. *Cours de forage. Paramètres et Contrôle de Forage. Editions Technip, Paris et Institut Français du Pétrole. Rueil-Malmaison . 1992.*
- [11] F.GRONDIN. *Les Outils de Forage. SONATRACH – Division forage, département de formation. Édition janvier 2004.*
- [12] R. Teale. *The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. Mining Research Establishment, National Coal Board, Worton Hall, Isleworth, Middlesex. 1964.*
- [13] Pessier R.C. and Fear M.J. *Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. SPE 24584, Washington DC. October 1992.*
- [14] Fear M.J. *How To Improve Rate of Penetration in Field Operations. SPE 35107, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans. March 1996.*
- [15] Maidla E.E., and S. Ohara. *Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit, WOB, and Drillstring Rotation. SPE Drilling Engineering, SPE Paper 19130. September 1991, pp 189-195.*
- [16] Galle E.M and Woods A.B. *Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. Drill And Prod. Prac. API 1963, pp 48-73.*
- [17] Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S. *A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. SPE 4238. August 1974.*
- [18] Speer J.W. *A Method for Determining Optimum Drilling Techniques. Drill And Prod. Prac. API 1958, pp 25.*
- [19] Lummus J.L. *Acquisition and Analysis of Data for Optimized Drilling. SPE 3716, Journal of Petroleum Technology. November 1971.*

- [20] Graham J.W. and Muench N.L. *Analytical Determination of Optimum Bit Weight and Rotary Speed Combinations*. SPE 1349-G, Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX. October 1959.
- [21] Bonet, L., Cunha, J.C.S., and Prado, M.G. *Drilling Optimization: A New Approach to Optimize Drilling Parameters and Improve Drilling Efficiency*. Drilling Technology, ASME. 1995.
- [22] Bingham M.G. *A New Approach to Interpreting Rock Drillability*. re-printed from Oil and Gas Journal, April 1965.
- [23] Reed R.L. *A Monte Carlo Approach to Optimal Drilling*. SPE 3513, SPE Annual Fall Meeting, New Orleans. October 1971.
- [24] Young F.S.Jr. *Computerized Drilling Control*. SPE 2241, SPE 43rd Annual Fall Meeting, Houston. October 1968.
- [25] Guo, X.Z. *A Preliminary Investigation on the Objective Function of Penetration Cost Applied to Optimized Drilling*. International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, March 17-20. 1988.
- [26] Wilson D.C., and Bentsen R.G. *Optimization Techniques for Minimizing Drilling Costs*. SPE 3983, 47th SPE Annual Fall Meeting, San Antonio. October 1972.
- [27] Akgun F. *How to Estimate the Maximum Achievable Drilling Rate without Jeopardizing Safety*. SPE 78567, Abu Dhabi Inter. Pet. Exh. And Conf. October 2002.
- [28] R. K. Bratli., G. Hareland., F. Stene., G. W. Dunsaed., and G. Gjelstad. *Drilling Optimization Software Verified in the North Sea*. SPE N°: 39007. Saga Petroleum ASA, New Mexico Institute of Mining and Technology, HACO Inc. Society of petroleum engineers. 1997.
- [29] R. Teale, Bizanti M., and Blick E.F. *Fluid Dynamics of Wellbore Bottom Hole Cleaning*. SPE 12888. December 1983
- [30] Ozbayoglu M.E., and Omurlu C. *Minimization of Drilling Cost by Optimization of the Drilling Parameters*. 15th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey. 11-13 May 2005
- [31] Maurer W.C. *The Perfect-Cleaning' Theory of Rotary Drilling*. Journal of Pet. Tech. November 1962
- [32] Gelfgat Y.A., Gelfgat M. Y., and Lopatin Y.S. *Advanced Drilling Solutions Lessons From the FSU*. PennWell Corporation, Tulsa, OK. 2003, pp 199 – 290
- [33] Al-Betairi E.A., Moussa M., and Al-Otaibi S. *Multiple Regression Approach to Optimize Drilling Operations in the Arabian Gulf Area*. SPE 13694, Middle East Oil Symposium, Bahrain. March 1985
- [34] Reza M.R. and Alcocer C.F. *A Unique Computer Simulation Model Well Drilling: Part I – The Reza Drilling Model*. SPE 15108, SPE 56th California Regional Meeting of SPE, Oakland, CA. April 1986
- [35] Warren T.M. *Penetration-Rate Performance of Roller–Cone Bits*. SPE 13259, SPE Annual Technical Conference, Houston. March 1986
- [36] Stefan Miska. *Developments in Petroleum Engineering*. Gulf Publishing Company, Collected works of Arthur Lubinski. 1988. Vol-2, pp 266-275

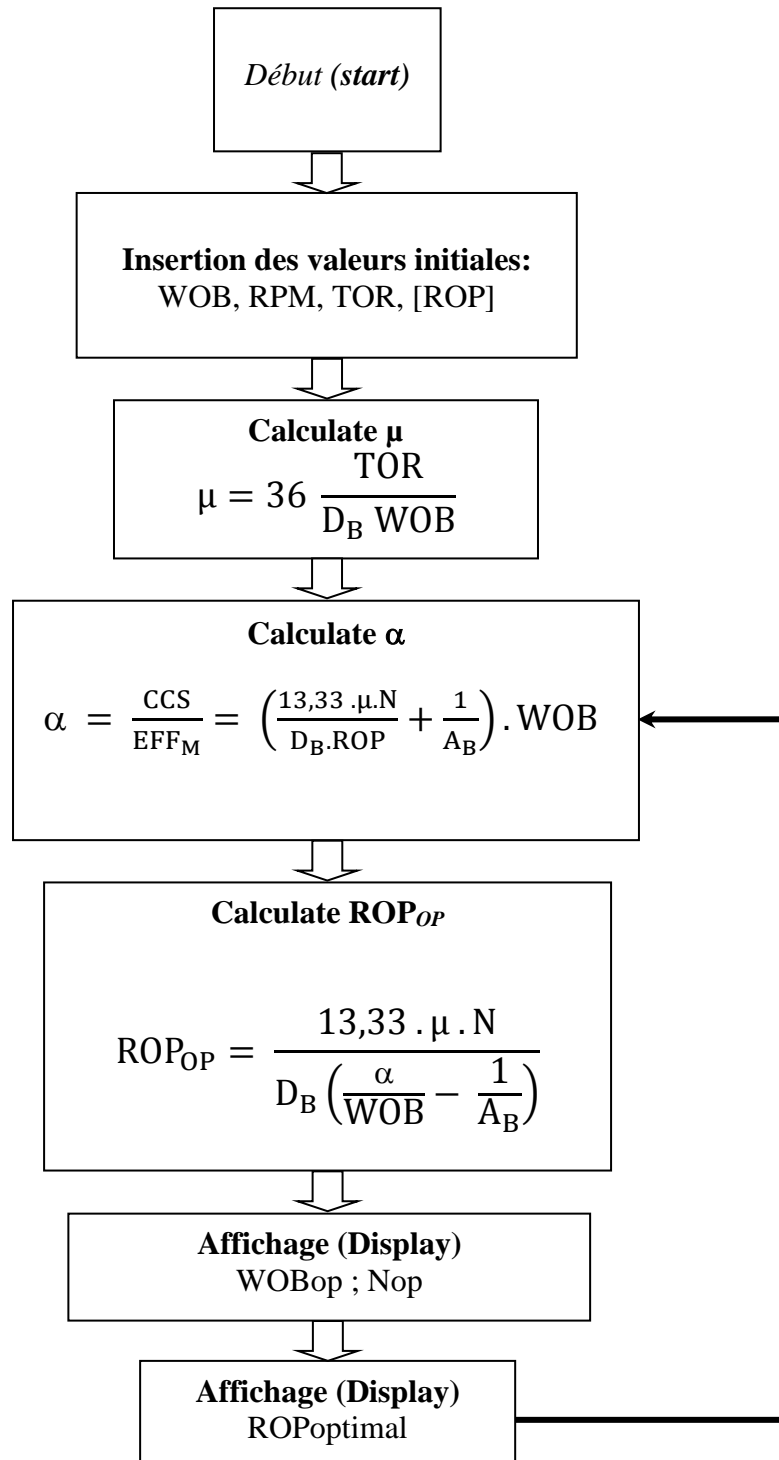
- [37] Maidla E.E., and S. Ohara. *Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit, WOB, and Drillstring Rotation*. SPE Drilling Engineering, SPE Paper 19130. September 1991. pp 189-195
- [38] Wojtanowicz A.K., and Kuru.E. *Minimum-Cost Well Drilling Strategy Using Dynamic Programming*. Journal of Energy Resources Technology. February 1990
- [39] Mitchell B. *Advanced Oilwell Drilling Engineering Handbook & Computer Programs*. The Society of Petroleum Engineers of AIME, Richardson, TX. 1995. pp 522 – 550
- [40] Cooper G.A., Cooper A.G., and Bihn G. *An Interactive Drilling Simulator for Teaching and Research*. SPE 30213, Petroleum Computer Conference, Houston, TX. June 1995
- [41] Serpen U. *Sondaj Optimizasyonu için Bilgisayar Programları Geliştirilmesi*. TPAO Genel Müdürlüğü, Sondaj Grup Başkanlığı. December 1997
- [42] Malguarnera,S.C. *The Use of a Drilling Model in Simulation, Optimization, and Formation Description*. IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, February 10-12. 1986.
- [43] Wardlaw H.W.R. *Drilling Performance Optimization and Identification of Overpressure Formations*. SPE 2388, The Uni. Of Texas Austin, TX. 1969
- [44] David A. Glowka. *Development of a Method for Predicting the Performance and Wear of PDC Drill Bits*. Sandia National Laboratories. 1987.
- [45] Aravind Suresh Kumar. *A Baseline for Mechanical Specific Energy and Estimation of Bit Wear Rate*. Master of Science thesis, The University of Texas at Austin. December 2008.
- [46] Fred E. Dupriest., William L. Koederitz. *Maximizing Drill Rates with Real-Time Surveillance of Mechanical Specific Energy*. ExxonMobil, Varco Company; Society of petroleum engineers. SPE N°: 92194. 2005.
- [47] R. C. Pessier., M. J. Fear. *Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction*. Hughes Tool Co, BP Exploration; Society of petroleum engineers. SPE N°: 24584. 1992.
- [48] Horra Hichem. *Approche adaptative d'optimisation des paramètres mécaniques de forage, mémoire de magister*. 2010.
- [49] Nabil NOUI., Naceredine FARES. *Thèse Spécialisé : Optimisation des paramètres d'un forage horizontal*. IAP. 2006.
- [50] R.V Barragan., Petrobas., and O.L.A Santos., Petrobras., and E.E Maidla *Csiro Petroleum. Optimization Of Multiple Bit Runs. a paper presented at -Society of petroleum engineers/ international association of drilling contractors- drilling conference*. 1997.
- [51] GHALEM Khaled. *MEMOIRE Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage*. 2015.
- [52] Frederic Gillon. *Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur de commutations électroniques, thèse de doctorat*. 1997.
- [53] GOUPY Jacques. *Introduction aux Plans d'expériences*. Dunod, Paris. 2001.
- [54] BOX George.E.P., HUNTER William.G., HUNTER.J. *Stuart Statistics for Experimenters*. deuxième edition, John Wiley and Sons, New-York. 2005.
- [55] Melle AZIRI Sabrina. *Thèse de Doctorat en Chimie : Utilisation des déchets agro-industriels pour l'élimination du chrome hexavalent en solution aqueuse*. 2018.

- [56] Kimouche Karima. *THESE de Magister : Etude de quelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse*. 2008.
- [57] M. PILLET. *Construire facilement des plans de résolution IV à partir des tables de Taguchi Revue de statistique appliquée*. 1998. tome 46, no4, p. 85-100
- [58] J. Goupy. *Modélisation par les plans d'expériences, Techniques de l'ingénieur, mesures et contrôles*. R 275, 1-23.
- [59] Goupy J. *Les plan d'expérience, revue MODULAD*. 34, 74-116. 2006.
- [60] Mme BOUZAOUIT -BOUDJENIBA Nadia. *Thèse doctorat : Optimisation de la synthèse enzymatique d'esters de sucres par la méthodologie des plans d'expériences*. 2016
- [61] Well Programme, OMM-302 Bis, SPEC-232, FICHE PUITES, *Activité Exploration Production , DIVISION FORAGE ; Direction Des Opérations*. SONATRACH . 2018.
- [62] L. Celik. *Monitoring vibration in grinding process and regression modelling of surface roughness*. M. S. Thesis, Selçuk University, Turkey. 2010.
- [63] PR. Periyanan., U. Natarajan., S. H. Yang. *A study on the machining parameters optimization of micro-end milling process*. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011.Vol. 3, No. 6, pp. 237-246.
- [64] F. Derdour., M. Kezzar., O. Bennis., and L. Khochemane. *The optimization of the operational parameters of a rotary percussive drilling machine using the Taguchi method*, *World Journal of Engineering*. 2017. WJE-03-0067
- [65] Shaik Shafee., Dr. B. Balu Naik., Dr. K. Sammaiah., Dr. Mohd. Mohinoddin. *RSW Process Parameters Optimization by Taguchi Method*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, e-ISSN: 2278-1684, p- ISSN: 2320-334X. Sep- Oct. 2014. Volume 11, Issue 5 Ver. II, PP46-54.
- [66] Ahmad Hamdan., Ahmed A. D. Sarhan., Mohd Hamdi. *An optimization method of the machining parameters in high-speed machining of stainless steel using coated carbide tool for best surface finish*. *Int J Adv Manuf Technol* 58:81–91. 2012.
- [67] Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd, New York. 2001.
- [68] Wang, J.P., Chen, Y.Z., Ge, X.W. and Yu, H.Q. *Optimization of Coagulation-Flocculation Process for a Paper Recycling Wastewater Treatment Using Response Surface Methodology*. *Colloids and Surfaces A*, 302, 204-210. 2007.
- [69] Gilles PELFRENE. *Thèse doctorat : Rôle du processus de forabilité des roches dans les vibrations de torsion des systèmes de forage pétrolier*. 2010.

Annexes

Annexes

- L'organigramme modèle Es (MSE) : La programmation est faite sous le matlab.



- **L'organigramme modèle d'Eckel:** *La programmation est faite sous le matlab.*

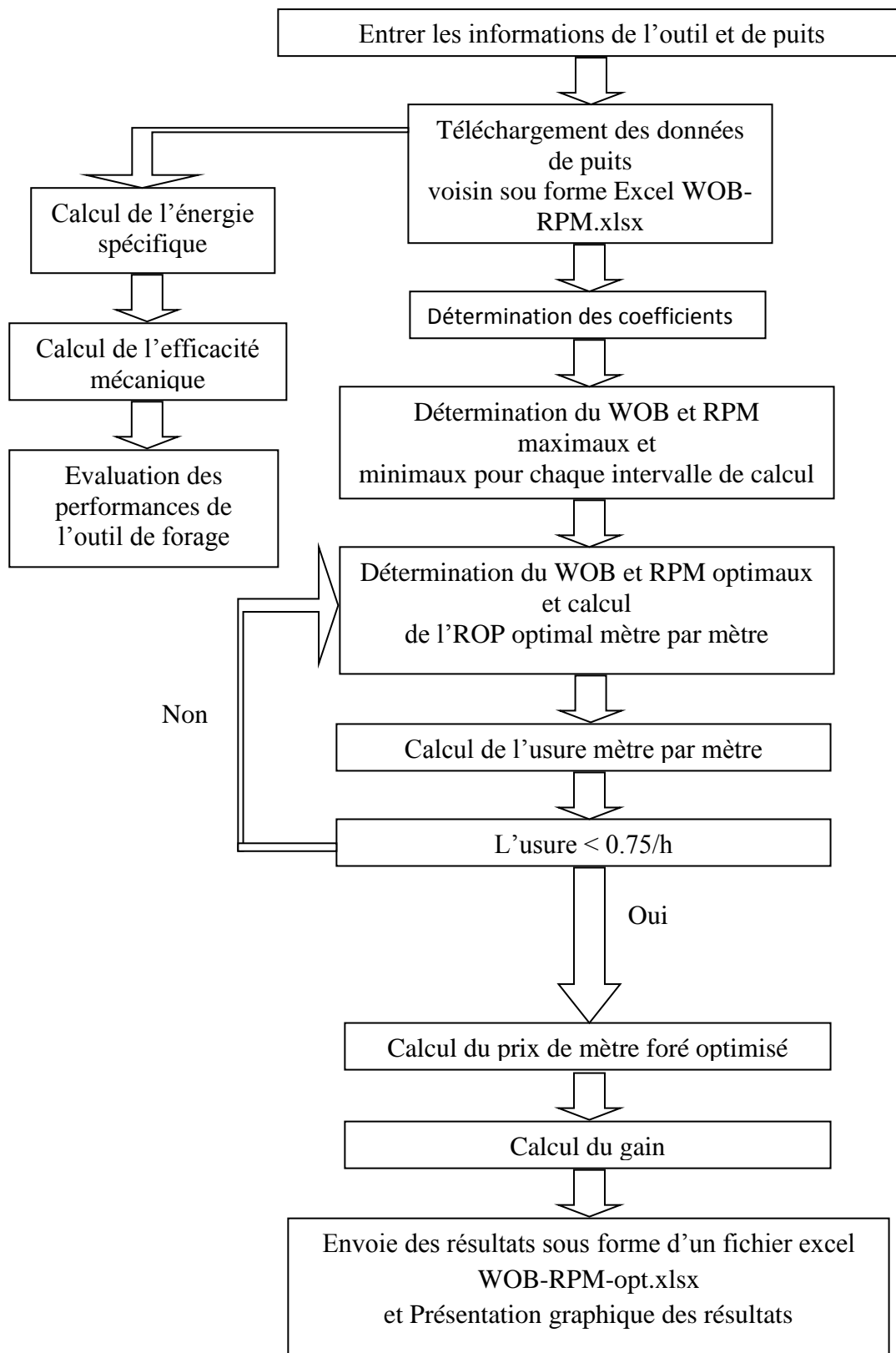


Tableau A: Les paramètres enregistrés pendant le processus

ROP (m/hr)	Drilled Time (hr)	Rotary Torque (ft.lb)	SPP (psi)	Mud Flow In (l/min)	RPM (rpm)	WOB (ton)	Vert Depth (m)
6.82	89.42	9372.63	2619.16	2961.36	168.68	17.28	2402
2.05	2.52	8840.98	2696.7	2398.83	79.37	17.34	2411
2.14	2.79	4001.58	2717.51	2394.48	84.47	17.85	2412
2.72	3.08	4288.77	2734.09	2394.48	83.27	17.67	2413
4.34	3.36	8774.53	3108.33	2586.04	81.42	19.19	2414
35.33	3.56	11245.25	3062.66	2588.22	76.2	18.74	2415
27.33	3.6	14525.32	3079.05	2586.04	80.54	18.03	2416
20.59	3.78	8878.96	3029.14	2581.69	81.47	12.98	2417
5.63	3.97	9417.72	3025.82	2588.22	79.26	18.74	2418
6.11	4.21	15301.42	3023.24	2586.04	73.04	15.55	2419
4.14	4.47	10514.24	3034.3	2592.57	79.78	18.36	2420
6.94	4.74	15909.02	2919.92	2542.5	125.84	17.07	2421
5.34	4.91	14064.87	2925.63	2538.15	110.74	16.98	2422
6.51	5.08	9325.16	2889.53	2535.97	117.79	17.63	2423
5.78	5.2	15776.11	2892.48	2538.15	113.96	16.38	2424
6.8	5.38	7706.49	2890.09	2535.97	118.27	16.67	2425
9.74	5.51	9363.13	2897.82	2540.33	114.14	14.03	2426
6.13	5.71	10678.01	2900.58	2538.15	117.93	16.13	2427
6.49	5.89	8947.78	2903.71	2538.15	114.3	17	2428
5.04	6.1	8824.37	3015.88	2588.22	115.89	15.95	2429
5.53	6.28	9265.82	3047.56	2586.04	130.95	17.54	2430
5.8	6.43	8309.34	3033.93	2586.04	130.97	17.83	2431
4.99	6.63	7851.27	3048.85	2588.22	123.29	17.02	2432
4.92	6.84	8473.1	3047.56	2586.04	123.29	17.76	2433
6.07	7.03	8674.84	3082.37	2588.22	123.28	17.16	2434
3.17	7.26	7511.87	3117.36	2594.75	123.29	17.27	2435
14	7.4	11755.54	3108.52	2590.39	122.71	15.91	2436
3.63	7.61	8240.51	3087.89	2588.22	123.27	17.2	2437
5.13	7.78	8060.13	3069.47	2570.8	123.28	15.1	2438
4.67	7.98	8257.12	3060.08	2579.51	123.27	16.93	2439
4.44	8.12	8805.38	3044.06	2568.62	123.28	17.18	2440
5.23	8.32	9140.03	3078.31	2596.92	123.29	17.38	2441
9.72	8.53	7867.88	3082	2592.57	123.3	16.04	2442
7.57	8.71	8150.32	3084.02	2596.92	123.31	17.67	2443
3.62	8.93	8601.27	3084.02	2590.39	123.29	17.07	2444
5.66	9.05	7682.75	3085.31	2592.57	123.26	16.2	2445
4.91	9.2	8786.39	3086.6	2594.75	123.26	17.47	2446
7.5	9.4	7799.05	3084.21	2592.57	123.28	17.09	2447
6.12	9.59	7162.97	3080.16	2594.75	123.29	17.51	2448
8.24	9.78	9042.72	3082.73	2596.92	123.26	17.2	2449
4.19	10.13	8810.13	3087.52	2572.98	123.27	17.47	2450
5.21	10.37	8354.43	3085.31	2572.98	123.25	16.8	2451
3.84	10.8	8639.24	3065.42	2568.62	123.27	17.54	2453
4.19	11.02	7580.7	3057.13	2564.27	123.27	17.42	2454
2.59	11.22	7886.87	3047.37	2568.62	123.28	14.81	2455
4.1	11.44	7784.81	3044.43	2566.45	123.31	15.79	2456
2.5	11.66	8520.57	3051.98	2566.45	123.28	17	2457
6.49	11.86	7625.79	3058.61	2564.27	123.3	17.29	2458
10.57	12.05	6142.4	3034.11	2564.27	123.29	11.6	2459
-0.01	12.25	9192.25	3053.63	2564.27	123.26	16.78	2460
6.04	12.45	9123.42	3041.29	2564.27	129.89	17.31	2461
4.12	12.64	8162.18	3040.74	2564.27	129.89	17.45	2462

4.18	12.83	8508.7	3038.16	2564.27	129.9	18.05	2463
17.24	13	12766.61	3045.16	2564.27	126.52	16.55	2464
6.41	13.15	3040.35	3004.46	2564.27	127.85	17.42	2465
16.36	13.22	5831.49	3044.24	2564.27	127.18	4.77	2466
9.68	13.27	8185.92	3040.19	2562.09	129.89	15.42	2467
5.29	13.42	8029.27	3040.19	2564.27	129.86	17.69	2468
5.23	13.61	8378.16	3032.64	2562.09	129.87	17.58	2469
7.35	13.8	8352.06	3042.58	2564.27	129.9	17.18	2470
4.27	14	8202.53	3027.85	2562.09	129.9	17.69	2471
6.41	14.21	8233.39	3027.3	2564.27	129.87	16.2	2472
3.6	14.43	8214.4	3023.61	2555.56	129.89	17.04	2473
4.29	14.62	8169.3	3021.59	2562.09	129.9	17.78	2474
4.69	14.81	9301.42	3063.58	2562.09	129.87	17.67	2475
2.41	14.96	8413.77	3047	2562.09	129.92	18.89	2477
3.79	15.15	8356.8	3044.43	2559.92	129.9	20.16	2478
4.68	15.19	7815.66	3026.01	2559.92	129.88	20.43	2479
5.27	15.51	7713.61	3070.76	2577.33	129.89	17.39	2480

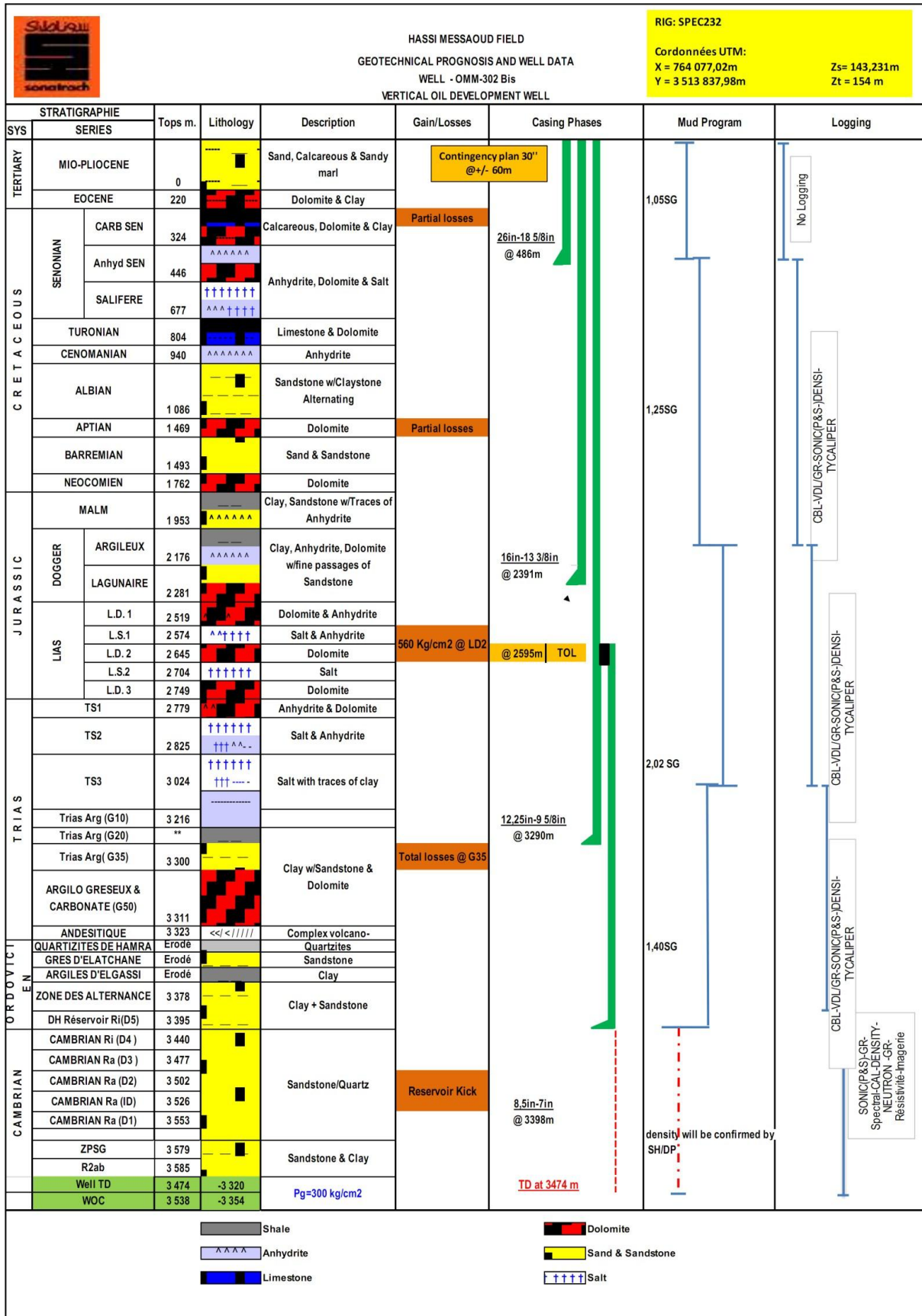
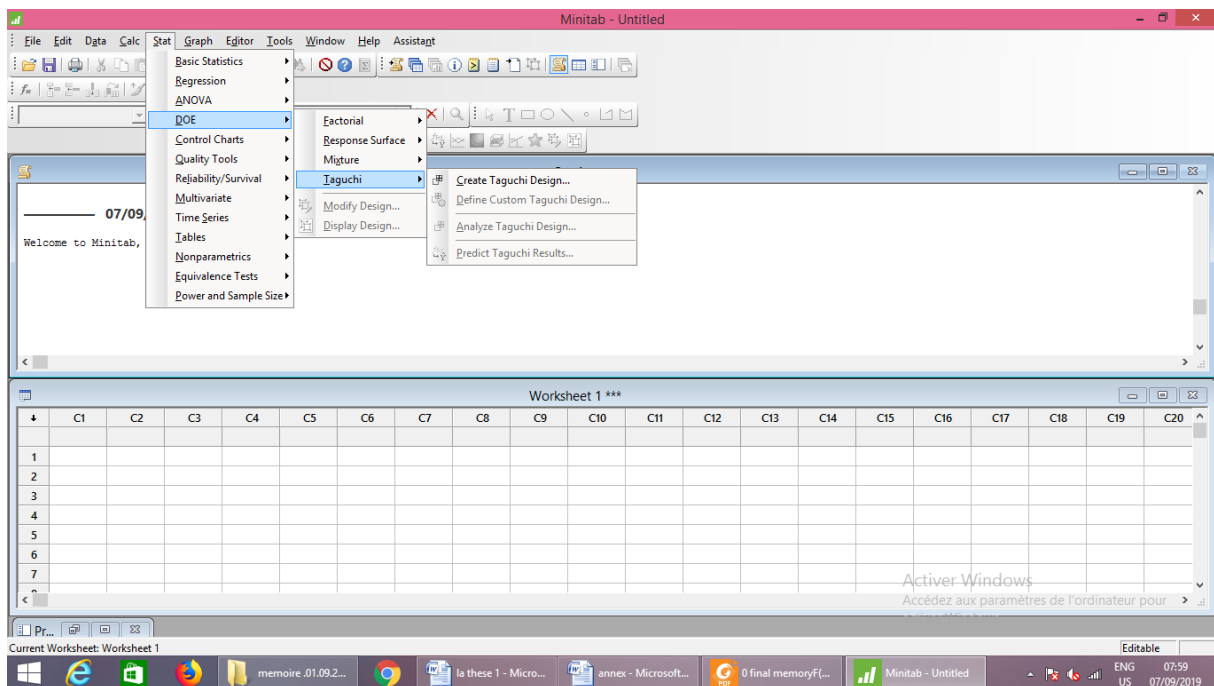
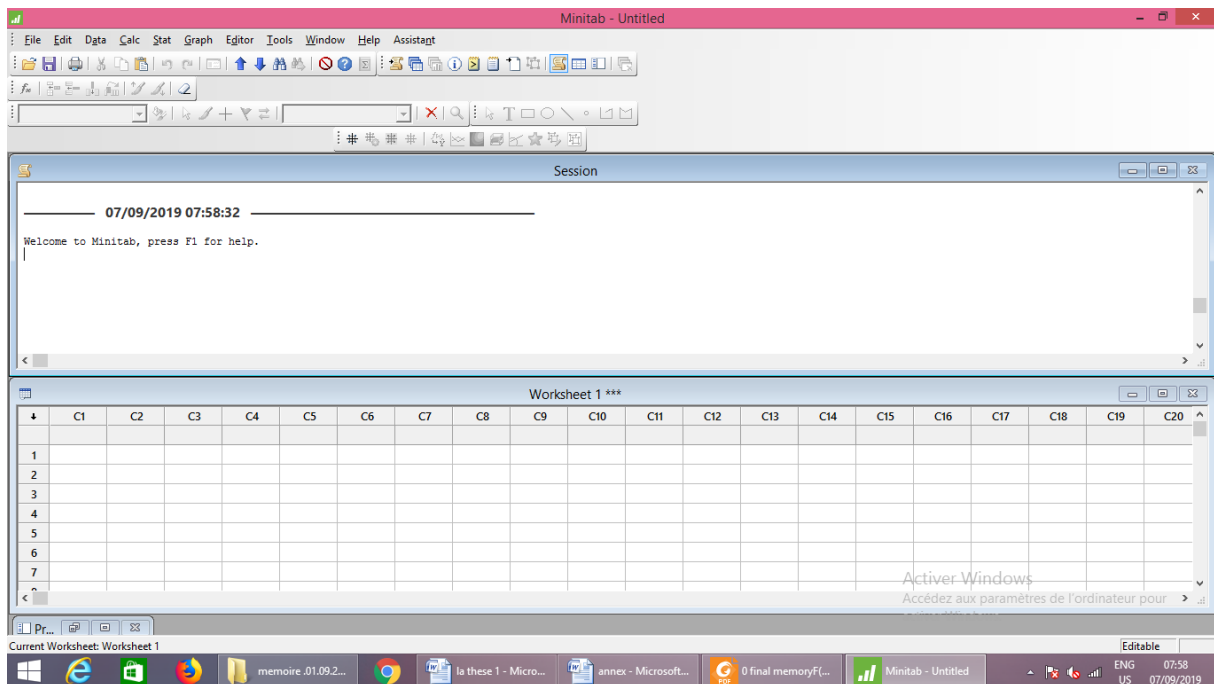


Figure A: Bien schématique et stratigraphie [61]

- Logiciels des plans d'expériences (Minitab) :



Méthode de régression linéaire multiple (multiple linear regression) :

RAPPORT DÉTAILLÉ

<i>Statistiques de la régression</i>	
Coefficient de détermination multiple	0,923843491
Coefficient de détermination R ²	0,853486796
Coefficient de détermination R ²	0,826848032
Erreur-type	0,343865032
Observations	27

ANALYSE DE VARIANCE

	<i>Degré de liberté</i>	<i>Somme des carrés</i>	<i>Moyenne des carrés</i>	<i>F</i>	<i>Valeur critique de F</i>
Régression	4	15,15370232	3,78842558	32,03927877	6,93731E-09
Résidus	22	2,60134953	0,11824316		
Total	26	17,75505185			

	<i>Coefficients</i>	<i>Erreur-type</i>	<i>Statistique t</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Limite inférieure pour seuil de confiance = 95%</i>	<i>Limite supérieure pour seuil de confiance = 95%</i>	<i>Limite inférieure pour seuil de confiance = 95,0%</i>	<i>Limite supérieure pour seuil de confiance = 95,0%</i>
onstante	-2,623342403	0,712518994	-3,681785924	0,001306369	-4,101016349	-1,14566846	-4,10101635	-1,14566846
WOB	0,015416667	0,002026244	7,60849416	1,34393E-07	0,011214494	0,01961884	0,01121449	0,01961884
RPM	0,022745098	0,004767633	4,770731474	9,19208E-05	0,012857632	0,03263256	0,01285763	0,03263256
β	0,013784392	0,003532818	3,901811661	0,000766068	0,006457775	0,02111101	0,00645778	0,02111101
CS	-0,000927172	0,00016318	-5,681893932	1,02869E-05	-0,001265587	-0,00058876	-0,00126559	-0,00058876

ملخص:

اكتسب مجال الحفر اهتمامًا متزايدًا فيما يتعلق بموضوعات مثل تدهور أداة الحفر ، وتقدير سرعة الاختراق ، وكذلك تحسين المعلومات الهندسية وإجراءات الحفر. تستند هذه الدراسة إلى إعداد تجريبي أصلي يقدر ظروف التشغيل الفعلية لأدوات الحفر.

ناقترح نماذج رياضية مع وبدون تفاعلات, تميز هذه النماذج سرعة اختراق أداة الحفر ذات الرأس الثابت المستخدمة على نطاق واسع PDC (الماس المضغوط الكريستالي). ينصب التركيز في هذه الدراسة على بت اختراق الباستيل بهدف دراسة تأثير أربعة متغيرات تشغيل مثل الوزن على بت WOB ، بت سرعة دوران RPM ، وكذلك زاوية القطع و مقاومة الصخور.

أولاً ، تظهر النتائج التحليل الإحصائي (مجموعة متعامدة من تاغوشي L27 ، نسبة الإشارة إلى الضوضاء (S / N) ، ANOVA وتحليلات الانحدار جنبًا إلى جنب مع القيم المثلى التي حصلت عليها طريقة تاغوش. وثانيًا ، الارتباط الجيد بين التنبؤ والبيانات التجريبية.

Résumé:

Comme tout nouveau procédé, le forage pétrolier fit l'objet de développements successifs au fur et à mesure de l'évolution de la technologie, à savoir la dégradation de l'outil de forage, l'estimation de la vitesse de pénétration ainsi que l'optimisation des paramètres géométriques et la procédure de forage. La recherche actuelle s'oriente de plus en plus vers la configuration expérimentale qui estime les conditions de fonctionnement réelles des outils de forage. Dans ce contexte des modèles mathématiques avec et sans interactions ont été mis au point. Ces modèles caractérisent la vitesse de pénétration du type d'outil de forage PDC (diamant polycristallin compact) qui est le plus utilisé dans le domaine du forage pétrolier. L'étude expérimentale vise à analyser l'influence de quatre paramètres de fonctionnement telles que le poids sur le bit (WOB), la vitesse de rotation du bit (RPM), l'angle de coupe (β) et la nature de formation sur le taux de pénétration. Les résultats obtenus sont présentés sous deux catégories : une analyse statistique (une matrice orthogonale de Taguchi L27, rapport : signal / bruit (S / N), une analyse ANOVA, une analyse de régression et les valeurs optimales obtenues par la méthode TAGUCHI), et une appréciation de la bonne corrélation entre les données prédites et expérimentales.

Abstract:

The field of drilling has gained increasing interest regarding topics such as degradation of drilling tool, estimation of penetration velocity as well as optimization of geometrical parameters and drilling procedures. This study based on an original experimental setup that estimates the actual operating conditions of drilling tools proposes mathematical models with and without interactions. These models characterize penetration speed of a widely used oil drilling tool with a compact polycrystalline diamond PDC. The focus in this study is on the pastel penetration bit with the aim of investigating the influence of four operating variables such as weight on the bit WOB, bit rotational speed RPM, as well as cutting angle β and quality. Firstly, the results show statistical analysis (An orthogonal array of Taguchi L27, signal-to-noise (S / N) ratio, ANOVA and regression analyses together with the optimal values obtained by the TAGUCHI method); and secondly, good correlation between predicted and experimental data.