

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquée

Département : Génie Mécanique

Mémoire de Master

Présenté par : **GABOUSSA Boubaker**

LAHLALI Mohammed Amine

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Optimisation des Paramètres Mécanique des Machines de
Forage Pétrolier**

Soutenu publiquement le: / 06/2018

Devant le jury composé de :

T. AMEUR	Président	UKM Ouargla
K. ROUAGDIA	Examineurs	UKM Ouargla
R. KHATTABI	Encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2017/2018

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

*Nous tenons remercier l'encadrement de Mme **KHETTABI .R** qui nous a aidés durant l'élaboration de ce travail,*

Nous remercions également tous les enseignants du département Génie Mécanique

Que toute personne ait participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos grands et sincères remerciements.

Dédicace

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

*Je dédie ce modeste travail à ma très chère Mère et mon très
cher Père*

*à mes frères (Abdelkader, Ibrahim, Toufik,
El hachemi, Yacine, Khaled)*

*à ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse
dans mes études*

*à tous mes enseignants de 1^{er} année primaire jusqu'à
le Master*

à mon binôme M. Amin et toute sa famille

G. Boubaker

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

Mes frères et sœurs ; À mes amis.

À tous mes enseignants durant mon parcours

À mon binôme G.BOUBAKER et toute sa famille.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible je vous dis merci.

L'ATHL'AL Mohammed Amine

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'APPAREIL DE FORAGE	
INTRODUCTION.....	2
1. Classification des appareils de forage	3
2. Répartition des équipements de l'appareil de forage	3
2.1 Les équipements de fond	4
2.1.1 La garniture de forage	4
2.1.1.1 Les tiges de forage (drill-pipes)	4
2.1.1.2 Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly)	7
2.2 Les équipements de surface	9
2.2.1 Les équipements de levage	9
2.2.1.1 Structure de la tour de forage	9
2.2.1.2 Le mouflage du câble de forage	11
2.2.1.3 Le treuil de forage	13
2.2.2 Les équipement de rotation	14
2.2.2.1 La table de rotation.....	14
2.2.2.2 Le top drive	14
2.2.2.3 La tige d'entrainements	15
2.2.3 Les équipements de pompage	17
2.2.3.1 Les pompes de forage.....	17
2.2.3.2 Cycle de la boue de forage	18
2.3 Les systèmes de transmissions de puissance.....	19
CHAPITRE 2 : LES OUTILS DE FORAGE	
INTRODUCTION.....	20

1. Les outils de forage	21
1.1 Les outils à molettes	21
1.1.1 Mode de travail d'un tricône	22
1.1.2 L'hydraulique à l'outil	22
1.1.3 Système de lubrification	23
1.2 Les outils à éléments de coupe fixes	24
1.2.1 Les outils diamants	24
1.2.1.1 Les outils à diamant naturel	24
1.2.1.2 Les outils à diamant synthétique	25
1.2.2 Avantages de diamant synthétique au diamant naturel	27
1.2.3 Mode de destruction de la roche par les différents types de diamants	27
1.2.3.1 Les diamants naturels	27
1.2.3.2 Les PDC	28
1.2.3.3 Les TSP	28
2. Les paramètres de forage.....	29
2.1 Paramètres mécaniques.....	29
2.2 Paramètres hydrauliques.....	29
3. Explication de l'effet de paramètre mécanique sur le ROP	30

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUE

1. Model de ROP	33
1.1 Modèle d'Eckel	34
1.1.1 Calcul des coefficients a , b , c	34
1.2 Modèle de régression	36
2. Critère de Performance du Modèle	36
3. Application des modèles de ROP sur le puits HAZ-106	37
3.1 Le modèle d'Eckel	37
3.1.1 Performance du modèle ROP {Eckel}	38

3.2 Modèle de régression	40
3.2.1 Performance du modèle ROP	42
3.3 Choix du modèle	44
4. Optimisation de ROP	44
CONCLUSION.....	46
ANNEXE	47

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'APPAREIL DE FORAGE

Tableau 1.1 : Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage 6

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUE

Tableau 3.1 : Les paramètres de forage appliqués et la vitesse d'avancement enregistré 37

Tableau 3.2 : La vitesse d'avancement calculé 38

Tableau 3.3 : la vitesse d'avancement en fonction de la profondeur 38

Tableau 3.4 : La vitesse d'avancement calculé 42

Tableau 3.5 : la vitesse d'avancement en fonction de la profondeur 42

Tableau 3.6 : Choix du modèle 44

Tableau 3.7: Optimisation de WOB et RPM..... 45

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'APPAREIL DE FORAGE

Figure 1.1 : Sonde de forage rotary	2
Figure 1.2: Classification des appareils de forage.....	3
Figure I.3 : La garniture de forage	4
Figure 1.4: Tige de forage	5
Figure 1.5: Tools-joints	6
Figure 1.6 : Masses tiges	7
Figure 1.7 : Masse tiges lisses	7
Figure 1.8 : Masse tiges spiralées.....	8
Figure 1.9 : Stabilisateurs.....	8
Figure 1.10 : Le trépan	9
Figure 1.11 : Exemple de derricks	10
Figure 1.12 : Mât de forage	10
Figure 1.13 : mât haubané	11
Figure 1.14 : Substructures.....	11
Figure 1.15 : Moufle fixe	12
Figure 1.16 : Moufle mobile et crochet.....	12
Figure 1.17 : Câble de forage	13
Figure 1.18 : Le treuil de forage.....	13
Figure 1.19 : Table de rotation	14
Figure 1.20 : Le top drive.....	15
Figure 1.21 : Nomenclature de la tige d'entraînement.....	15
Figure 1.22 : La tige d'entraînement.....	16
Figure 1.23 : Vanne supérieure, Figure 1.24 : Vanne inférieure.....	16
Figure 1.25 : Tête d'injection.....	17
Figure 1.26 : Pompe de forage	18

Figure 1.27 : Cycle du fluide sur le site de forage	18
---	----

CHAPITRE 2 : LES OUTILS DE FORAGE

Figure 2.1 : Bras de l'outil	21
Figure 2.2 : Les outils à molettes (tricône).....	22
Figure 2.3 : Travail d'un outil	22
Figure 2.4 : Outil conventionnel	23
Figure 2.5 : Outil à jet	23
Figure 2.6 : Système de lubrification des paliers	24
Figure 2.7 : Outil à diamant naturel	25
Figure 2.8 : Les Outils PDC	25
Figure 2.9 : Les Outils TSP	26
Figure 2.10 : Les Outils imprégnés	27
Figure 2.11 : Mode de destruction de la roche par les outils à diamant naturel.....	27
Figure 2.12 : Mode de destruction de la roche par les outils PDC.....	28
Figure 2.13 : Effet de WOB sur ROP.....	31
Figure 2.14 : Effet de la vitesse de rotation sur ROP.....	32

CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUE

Figure 3.1 : Résumé des modèles d'optimisation de ROP.....	34
Figure 3.2:Les vitesses d'avancement mesurée et calculée en fonction de la profondeur.....	39
Figure 3.3: ROP Calculée versus ROP mesurée	39
Figure 3.4: Le nuage de points quadratique	40
Figure 3.5 : ROP en fonction WOB et RPM.....	41
Figure 3.6 : Les vitesses d'avancement mesurée et calculée en fonction de la profondeur	43
Figure 3.7: ROP Calculée versus ROP mesurée	43

ANNEXE

Figure 1 : Situation géographique de la région de Rhourde Nous	48
Figure 2 : Location du puits HAZ106	48
Figure 3 : Stratigraphie et Top sabots	49

Nomenclature

BHA : Bottom Hole Assembly.

PDC : Polycrystalline diamond compact.

TSP : Thermally Stable Polycrystalline.

RPM, N : Révolution Per Minute (Vitesse de rotation de l'outil de forage) [tr/min].

ROP : Rate Of Pénétration (La vitesse d'avancement de l'outil de forage) [m/h].

WOB, W : Weight On Bit (poids appliqué sur l'outil) [ton].

P_m : prix de mètre foré [kDA].

P_o : prix de l'outil [kDA].

P_h : prix de location de l'appareil [kDA].

T_m : le temps de manœuvre [h].

T_f : le temps de forage [h].

M : le métrage [m].

C_{for} , a, b, c, d, e : les coefficients dépendant de la formation.

D : La profondeur [m].

K, K_1 , K_2 : Constantes qui dépendent du type de formation.

h : Usure fractionnel des dents de l'outil [fraction].

P : Constante qui dépende du type d'usure des dents.

u_s : Coefficient du frottement due au glissement de l'outil.

d_b : Diamètre de l'outil [In].

CCS : Résistance à la Compression Confinée [psi].

EFF_M : L'efficacité mécanique [%].

A_B : Section du trou [In²].

a_j : Coefficient de la fonction x_j

R^2 : Coefficient de détermination.

INTRODUCTION GENERALE

La finalité d'un forage est d'atteindre, l'objectif, qui est le réservoir, avec un prix de revient minimum, sans l'endommager ni compromettre son exploitation (production, injection).

Cependant, plusieurs techniques ainsi que plusieurs équipements ont été développés selon les besoins et les difficultés rencontrées durant le forage.

Toute perte de temps augmente le coût de forage. Celle-ci est générée la plupart du temps par trois causes principales :

- La nature des terrains traversés.
- L'état des équipements utilisés.
- La formation du personnel.

L'objectif de ce travail consiste à l'optimisation du temps de forage et minimiser le prix du mètre foré par une analyse correcte de l'influence des paramètres mécanique principaux éligibles de porter un préjudice considérable sur la vitesse d'avancement.

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, le travail effectué a été présenté en trois chapitres, le premier chapitre Généralités sur l'appareil de forage. Le second chapitre explique les méthodes de travail des différents types d'outils ainsi qu'une investigation est menée sur les effets des différentes variables de forage sur la vitesse d'avancement. Le troisième chapitre présente les modèles de la vitesse d'avancement et les résultats de l'application des modèles proposés et la détermination des paramètres mécanique optimaux.

CHAPITRE 1

Généralité sur les appareils de forage pétrolier

INTRODUCTION

Dans le monde des hydrocarbures et hydraulique restent et peuvent être pour longtemps l'énergie la plus performante, la moins nuisible pour l'environnement. La pratique montre que les fonds engagés dans les travaux de forage comprennent plus de 30% des tous les investissements concentrés dans l'industrie du pétrole et de gaz et l'eau.

Pour récupérer les hydrocarbures le sondage est le seul moyen pour atteindre le réservoir et extraire le pétrole avec un prix de revient le plus minimal possible et dans des meilleures conditions de sécurité. La technologie de forage des puits de pétrole et de gaz demande l'emploi d'un matériel complexe de surface et du fond et des outils modernes, ainsi que d'une grande quantité de matériaux.

La sonde de forage rotary (Figure 1.1) est l'appareillage nécessaire à la réalisation des trois fonctions suivantes :

- * poids sur l'outil.
- * rotation de l'outil.
- * injection d'un fluide.

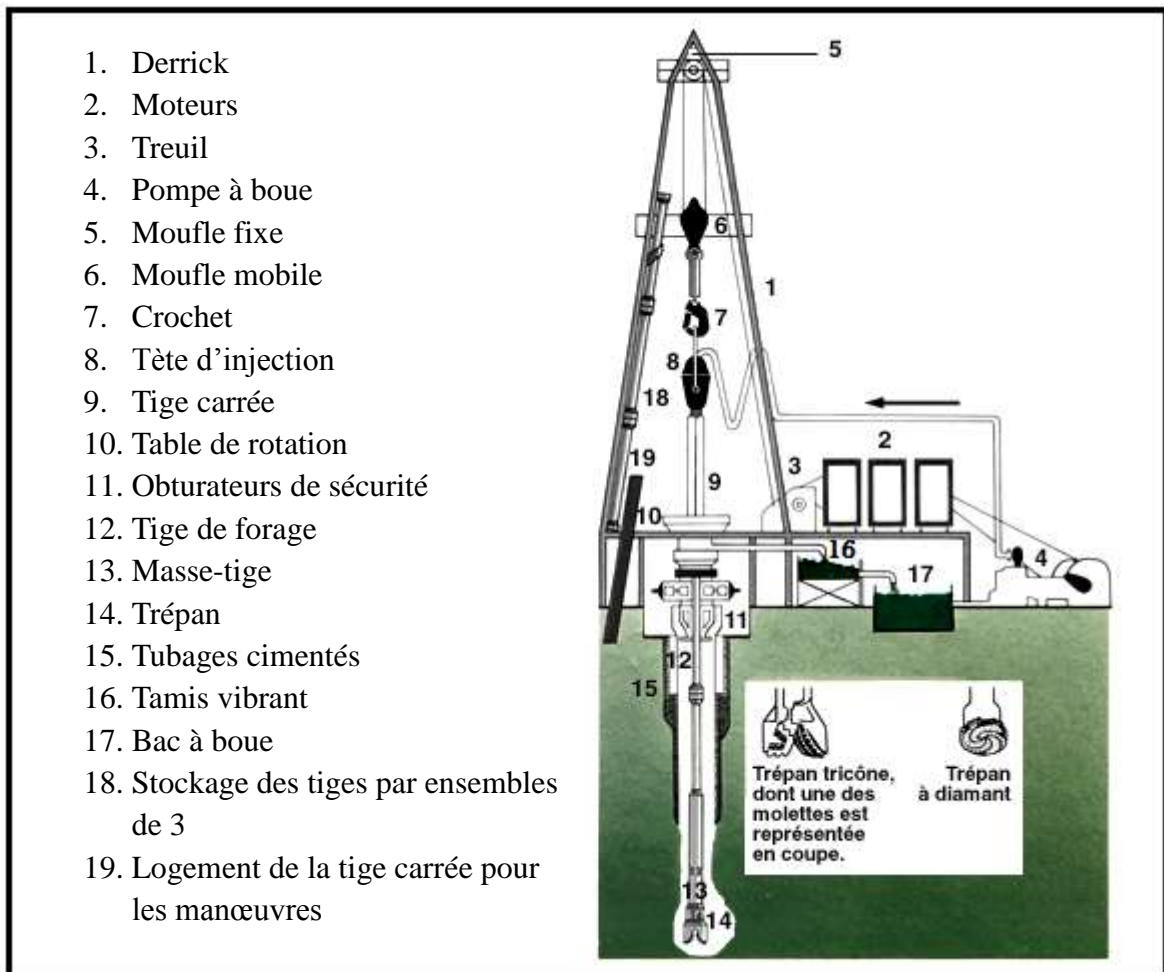


Figure 1.1 : Sonde de forage rotary.

1. Classification des appareils de forage :

La classification des appareils de forage se fait en première approche par la capacité de profondeur de forage maximale (figure 1.2).

Les appareils de forage peuvent être classés comme suit :

- Appareil léger.
- Appareil moyen.
- Appareil lourd.
- Appareil ultra lourd [1].

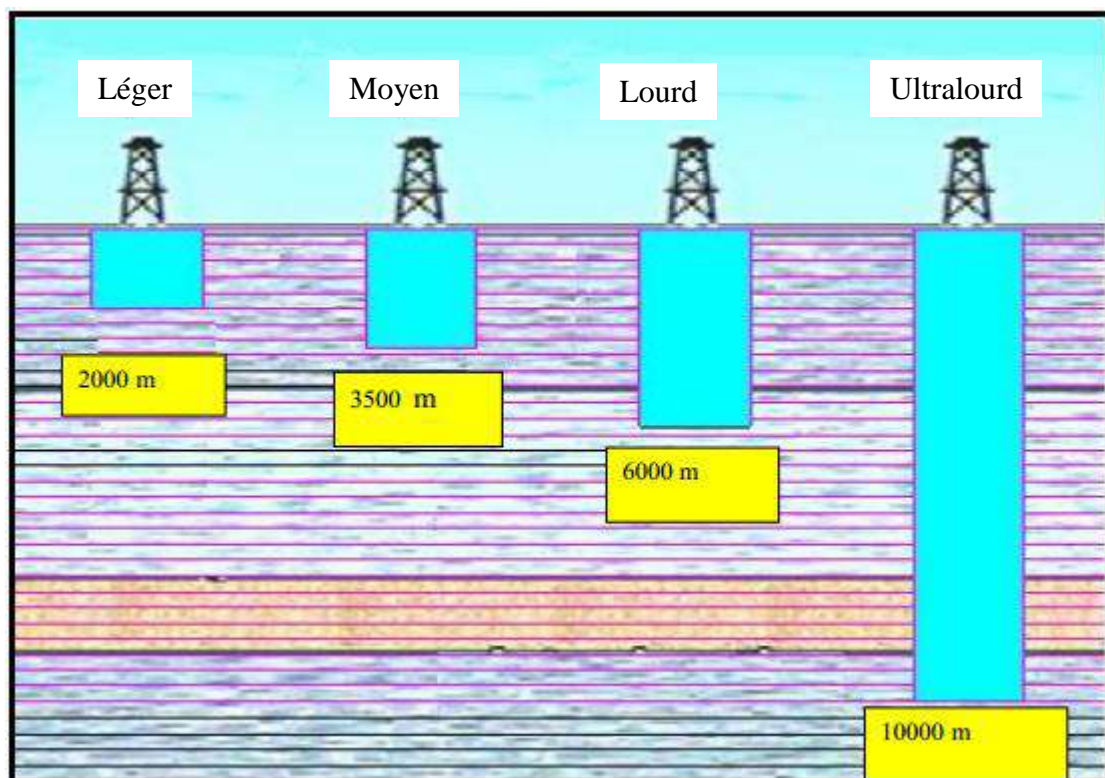


Figure 1.2: Classification des appareils de forage [1]

2. Répartition des équipements de l'appareil de forage :

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

- * Le matériel de fond.
- * Le matériel de surface [2].

2.1 Les équipements de fond :

2.1.1 La garniture de forage :

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

- La partie haute formée de tiges (drill-pipes).
- la partie basse de l'assemblage de fond (Bottom Hole Assembly) [6].

Ses principaux rôles sont :

- Permettre la rotation de l'outil pour détruire la roche.
- Guider et contrôler la trajectoire de l'outil.
- Mettre du poids sur l'outil.
- Permettre la circulation du fluide de forage [3].

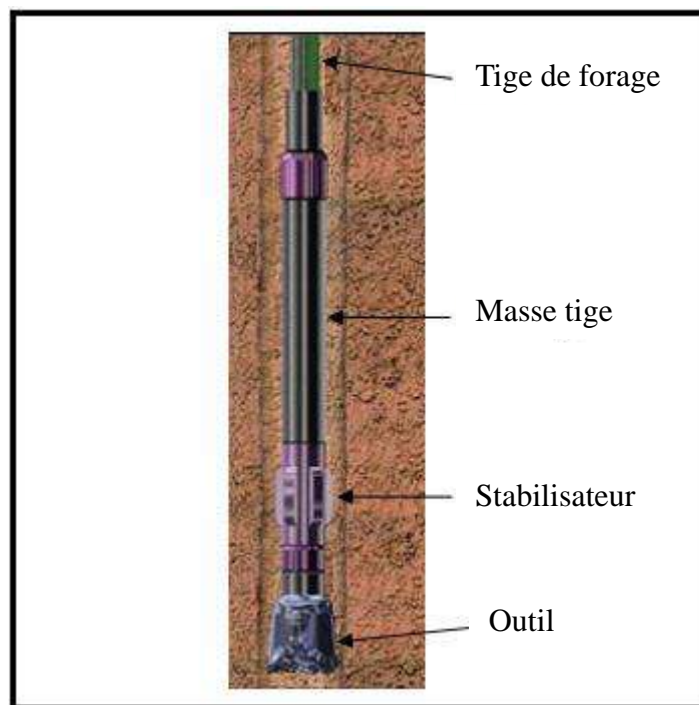


Figure I.3 : La garniture de forage [6]

2.1.1.1 Les tiges de forage (drill-pipes) :

A. Rôles :

Les tiges de forage permettent la transmission de la rotation de la table à l'outil et le passage du fluide de forage jusqu'à ce dernier.

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

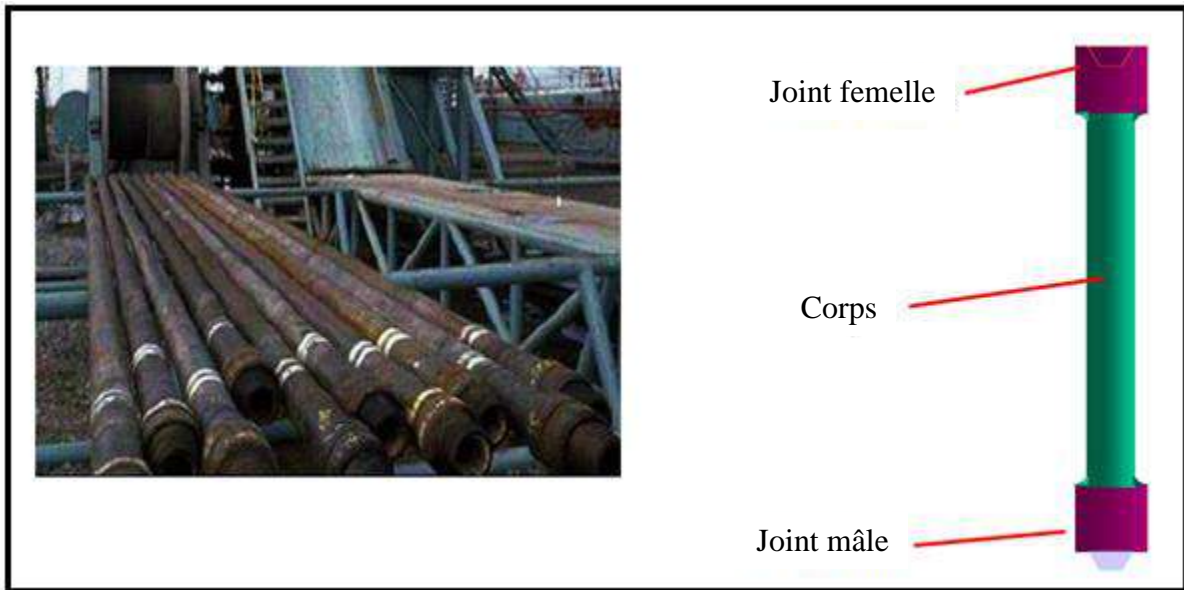


Figure 1.4: Tige de forage [4]

B. Caractéristiques :

a. Le diamètre nominal :

C'est le diamètre extérieur du corps de la tige, exprimé en pouces [4].

b. Le grade :

Détermine la qualité de l'acier et donne la résistance de la tige à la traction et à la torsion.

Lorsqu'une tige subit un effort de traction, elle s'allonge ; si on ne dépasse pas une certaine valeur et si on relâche la force, la tige revient à sa position initiale : on dit que l'acier a travaillé dans le domaine élastique [1].

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

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

Tableau 1.1 : Propriétés des aciers utilisés pour le corps des tiges de forage [5]

c. La gamme :

Il existe 3 gammes de longueur de tige :

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

d. Le poids nominal :

Exprimé en livres par pied, il indique le poids [weight] du corps de la tige sans les tool-joints.



Figure 1.5: Tools-joints [4]

2.1.1.2 Assemblage de fonds (Bottom Hole Assembly):

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

A. Les masses tiges (drill-collars) :

Les masses-tiges sont des tubes de fortes sections qui servent à appliquer du poids sur l'outil (Weight On Bit). Les masses tiges sont sollicitées en compression et en torsion [6].

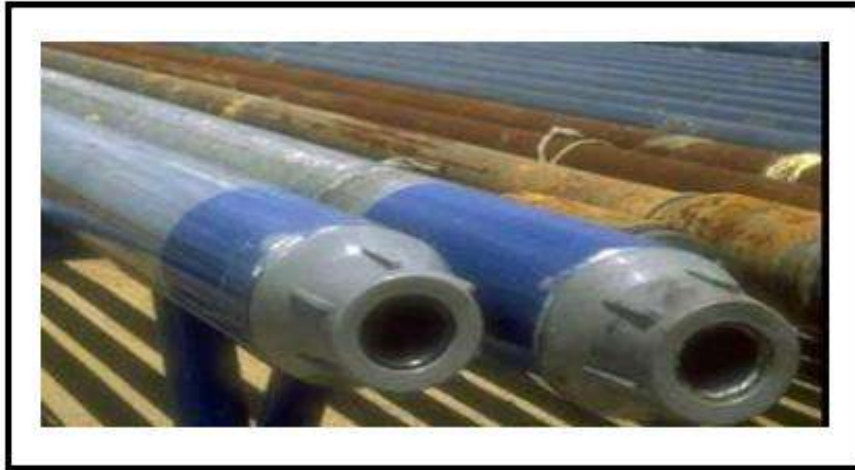


Figure 1.6 : Masses tiges [4]

A.1 Différents types de masse-tiges :

- Masse tiges lisses (slick drill-collars) :

Elles sont lisses sur toute leur longueur



Figure 1.7 : Masse tiges lisses [4]

- **Masse tiges spiralées (spiral drill-collars) :**

Elles réduisent le risque de coincement par pression différentielle en diminuant la surface de contact masse tige/trou [4].



Figure 1.8 : Masse tiges spiralées [4]

B. les stabilisateurs :

Comme leur nom l'indique, ils sont incorporés à la garniture de forage et plus précisément au niveau des masses-tiges afin de garder et contrôler la trajectoire de l'outil, qu'elle soit verticale ou inclinée [5].

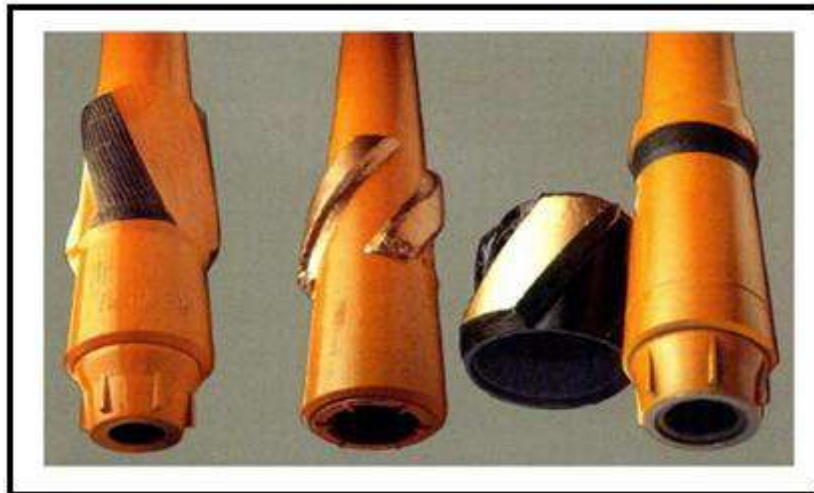


Figure 1.9 : Stabilisateurs [7]

C. Le trépan :

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



Figure 1.10 : Le trépan.

2.2 Les équipements de surface :

2.2.1 Les équipements de levage :

Pour soulever la garniture de forage (masse-tiges - BHA), il faut utiliser une grue de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes ou plus.

2.2.1.1 Structure de la tour de forage :

Il existe trois grandes catégories de structures :

- * Le derrick
- * Le mât
- * Le mât haubané

A. Le derrick

C'est la plus ancienne forme qui dérive de la tour construite en bois. Il est en forme de pyramide très pointue, dont les quatre pieds s'appuient sur le sommet d'un carré, cette surface sera la planche de travail [5].

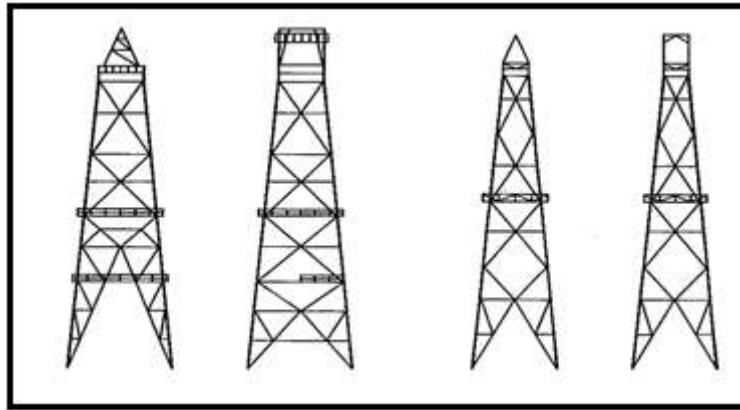


Figure 1.11 : Exemple de derricks [5]

B. Le mât :

Le mât de forage sert aux manœuvres des garnitures de forage ou des tubages. Il a remplacé la tour grâce à la rapidité de son montage et démontage. Il peut être du type qui ne se démonte pas pour le déménagement, ou de celui qui se démonte en un petit nombre d'éléments [4].

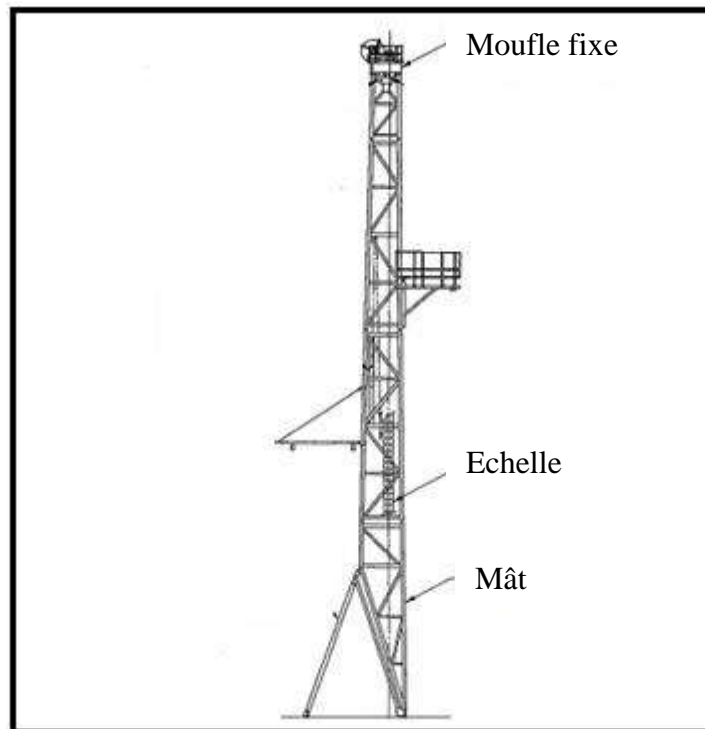


Figure 1.12 : Mât de forage [5]

C. Le mât haubané :

Le mât haubané (figure 1.13) est utilisé pour le forage de faible et moyenne profondeur. Ils ne se démontent pas, se rabattent sur des camions ou des remorques [4].



Figure 1.13 : Mât haubané [4]

D. Substructures :

Ces constructions répondent au besoin de surélévation du planché de forage pour laisser la place aux empilages de tête de puits ainsi que pour l'obturateur. Elles pouvant être indépendantes du mat de levage. La substructure comprend quatre supports métalliques principaux destinés à recevoir les quatre fers d'angle du mat et qui reposent sur le sol par des plaques métalliques. Ces quatre supports sont reliés entre eux par des fers horizontaux et des cornières entrecroisées [8].

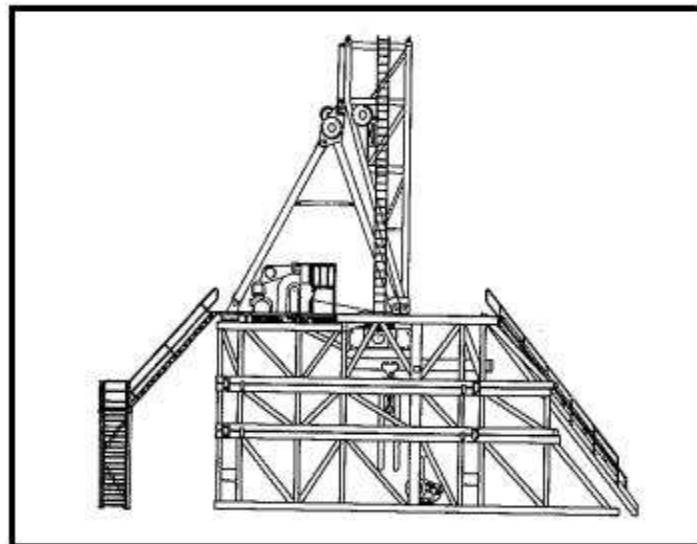


Figure 1.14 : Substructures [5]

2.2.1.2 Le mouflage du câble de forage :

Le système de mouflage comprend essentiellement le moufle fixe, le moufle mobile et le câble de forage.

A. Moufle fixe :

C'est l'ensemble des poulies sur lequel passe le câble. Il est supporté par la plate-forme supérieure de la tour de forage.

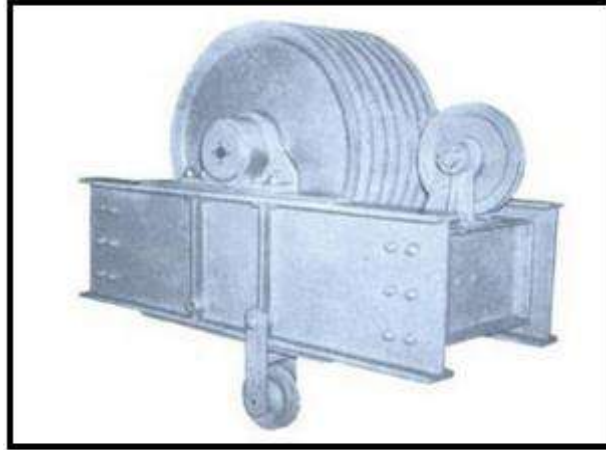


Figure 1.15 : Moufle fixe [5]

B. Moufle mobile et crochet :

Ils sont en général (Figure 1.16), c'est-à-dire que l'ensemble des poulies et du crochet sont assemblés d'une manière compacte. Le crochet comporte un amortisseur pour limiter les chocs à la reprise de la charge et faciliter le vissage des connexions. Aux deux oreilles latérales sont suspendus les bras de l'élévateur [5].



Figure 1.16 : Moufle mobile et crochet [5]

C. Câble de forage :

Les câbles utilisés sur l'installation de sondage sont des câbles en acier mais dont l'âme peut parfois être en chanvre. Autour de l'âme sont enroulés des torons, chacun de ces torons étant composés d'un certain nombre de fils d'acier [8].

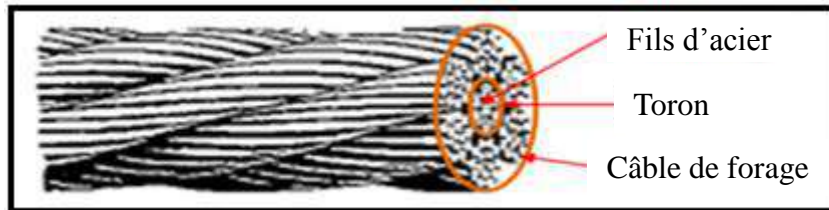


Figure 1.17 : Câble de forage [8]

2.2.1.3 Le treuil de forage :

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

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

- * Les manœuvres de remontée et de descente (levage) du train de sonde à des vitesses rapides et en toute sécurité, ce qui constitue sa principale utilisation.
- * L'entraînement de la table de rotation quand celle-ci n'est pas entraînée par un moteur indépendant.
- * les vissages et dévissages du train de sonde ainsi que les opérations de curage [2].

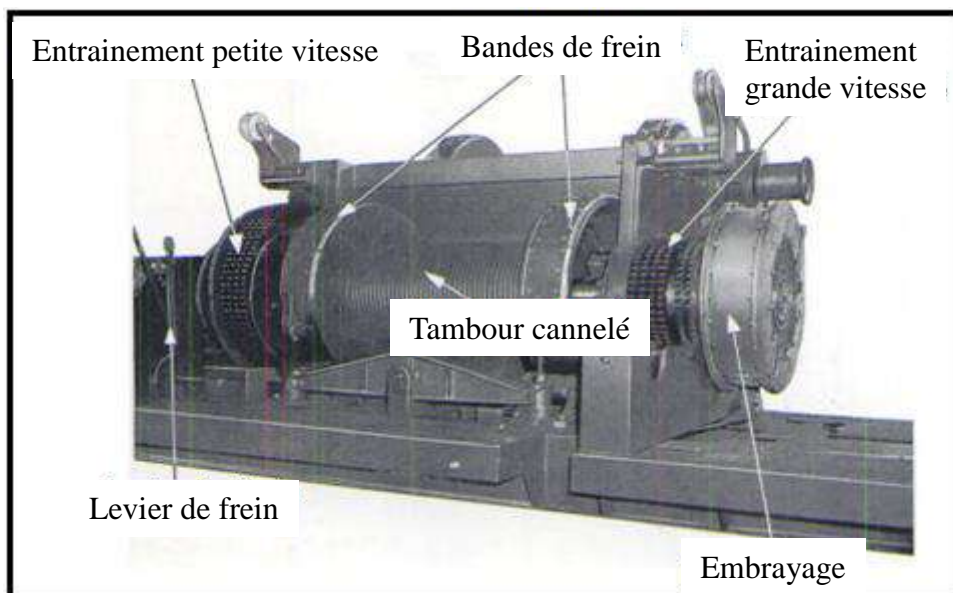


Figure 1.18 : Le treuil de forage [5]

2.2.2 Les équipement de rotation :

2.2.2.1 La table de rotation :

En cours de forage, la table de rotation transmet le mouvement de rotation à la garniture de forage, par l'intermédiaire de fourrures et de la tige d'entraînement, et, en cours de manœuvre, supporte le poids de la garniture de forage, par l'intermédiaire de coins de retenue. La motorisation de la table de rotation se fait par l'intermédiaire d'une roue d'entrée et chaîne soit à partir du treuil, soit, sur les appareils lourds, par moteur électrique indépendant de la transmission du treuil [1].

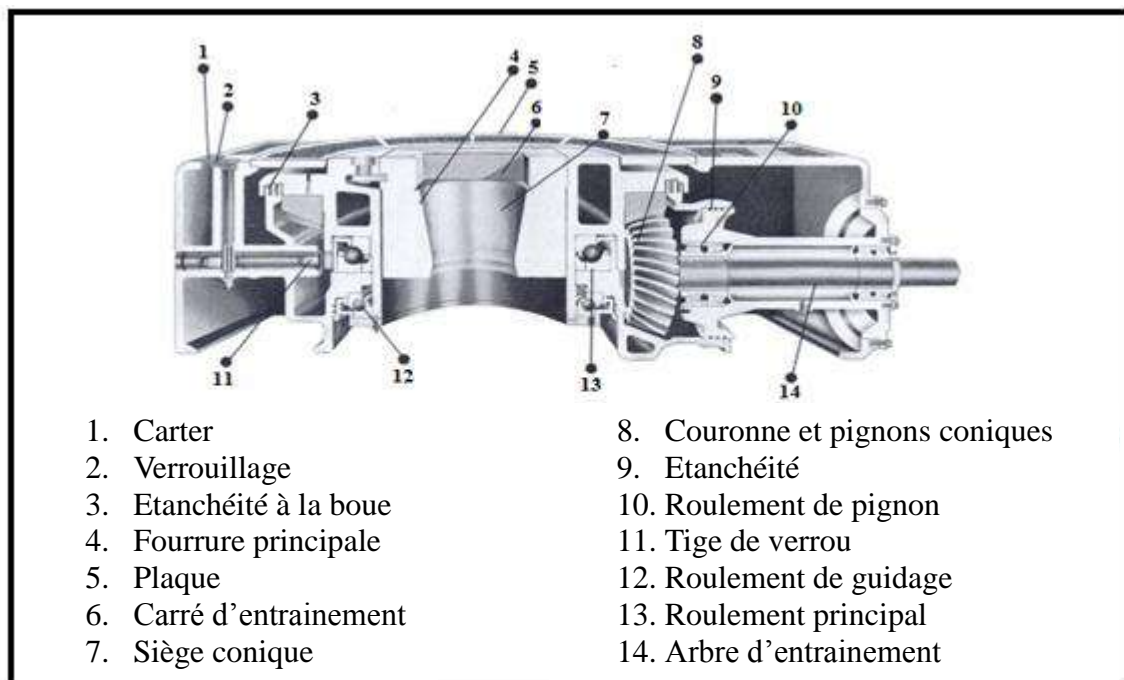


Figure 1.19 : Table de rotation [5]

2.2.2.2 Le top drive :

Le top drive est une tête d'injection motorisée qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage.

Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge. En plus, pendant le forage, au lieu de faire les ajouts simples par simple, on peut les faire longueur par longueur [1].

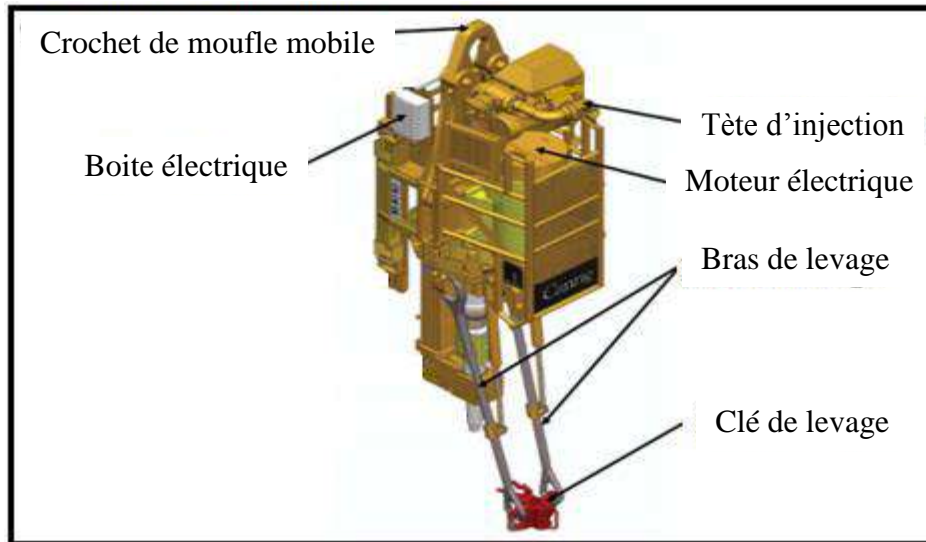


Figure 1.20 : Le top drive [9]

2.2.2.3 La tige d'entraînements :

D'une manière plus générale, nous allons décrire l'ensemble des composants toujours liés à la tige d'entraînement.

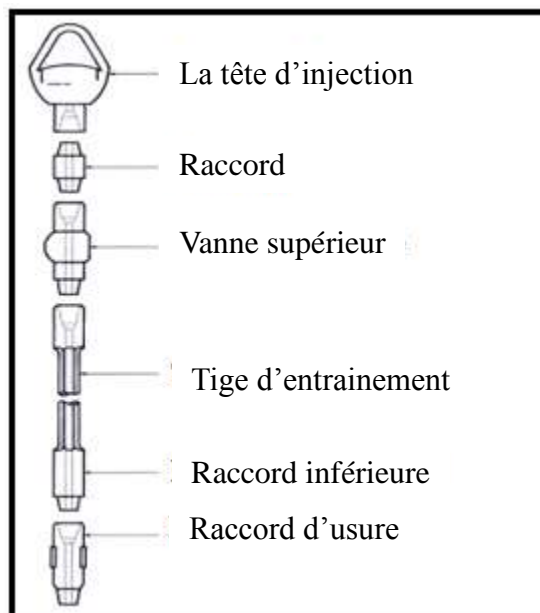


Figure 1.21 : Nomenclature de la tige d'entraînement [5]

A. La tige d'entraînement [Kelly] :

La tige d'entraînement [Kelly] Elle assure la liaison entre la garniture de forage et la tête d'injection et communique le mouvement de rotation de la table à la garniture de forage par l'intermédiaire du carré d'entraînement.

Les tiges d'entraînement peuvent être de section carrée ou hexagonale, elles sont désignées par leur dimension nominale (distance en pouces séparant deux faces opposées du carré ou de l'hexagone) [4].



Figure 1.22 : La tige d'entraînement [4]

B. Le raccord d'usure [Kelly saver sub] :

Raccord d'usure [Kelly saver sub] En cours de forage les ajouts de simples nécessitent de fréquents vissages et dévissages de la tige d'entraînement sur la garniture de forage. Pour éviter que le filetage inférieur de la tige d'entraînement ne s'endommage, on l'équipe d'un raccord d'usure amovible. Lorsque le filetage inférieur du raccord d'usure est usé ou endommagé, il suffit de le remplacer par un raccord neuf et de l'envoyer en réparation [5].

C. Vannes de sécurité [safety valves] :

Les tiges d'entraînement sont toujours équipées d'une vanne de fermeture à leur partie supérieure [upper safety valve] (Figure 1.23), entre la tête d'injection et son filetage femelle supérieur. C'est un dispositif de sécurité destiné à fermer l'intérieur du train de tiges en cas de venue et de protéger ainsi l'ensemble du circuit de refoulement. Par mesure de sécurité complémentaire, on équipe aussi la partie inférieure de la tige d'entraînement d'une deuxième vanne de fermeture [lower safety valve] (Figure 1.24). Située immédiatement au-dessus du raccord d'usure, elle est plus accessible au personnel de plancher et permet après fermeture de déconnecter la tige d'entraînement malgré la pression [4].



Figure 1.23 : Vanne supérieure

Figure 1.24 : Vanne inférieure [4]

D. La tête d'injection :

C'est le composant qui est suspendu par sans anse au crochet de levage. Il doit être conçu à la foi pour la charge maximale de garniture et pour la vitesse de rotation maximale. D'autre part, un joint d'étanchéité rotatif permet l'injection sous pression du fluide de forage par le flexible de forage relié au câble de cygne de la tête d'injection.

Il faut noter que toutes les connexions au-dessus de la section utile de la tige d'entraînement doivent être à filetage à gauche afin de ne pas être débloqués par la rotation à droite de la table de rotation [1].

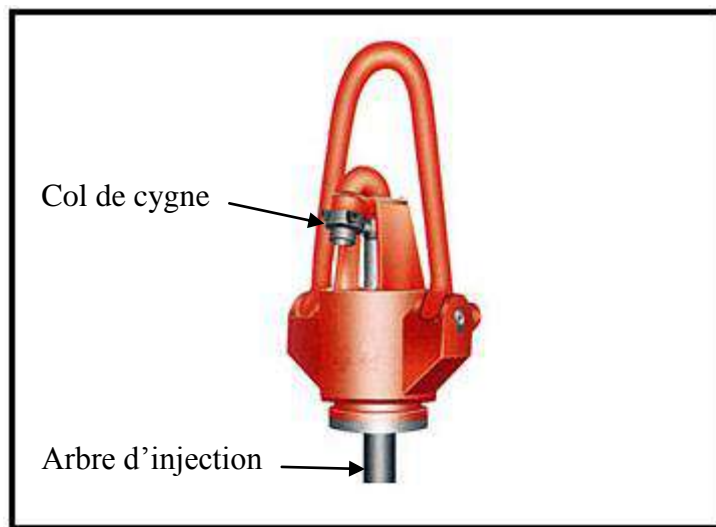


Figure 1.25 : Tête d'injection

2.2.3 Les équipements de pompage :**2.2.3.1 Les pompes de forage :**

Ce sont des pompes alternatives à pistons, le mouvement alternatif des pistons et des tiges étant produit par le système classique de la bielle et d'un vilebrequin. Ces pompes de principe volumétrique fournissent un débit qui est directement fonction de la cylindrée de la pompe et du régime de rotation du vilebrequin. Pour régler le débit, les foreurs comptent les cycles par minute ce qu'ils définissent par coups de pompes à la minute [5].

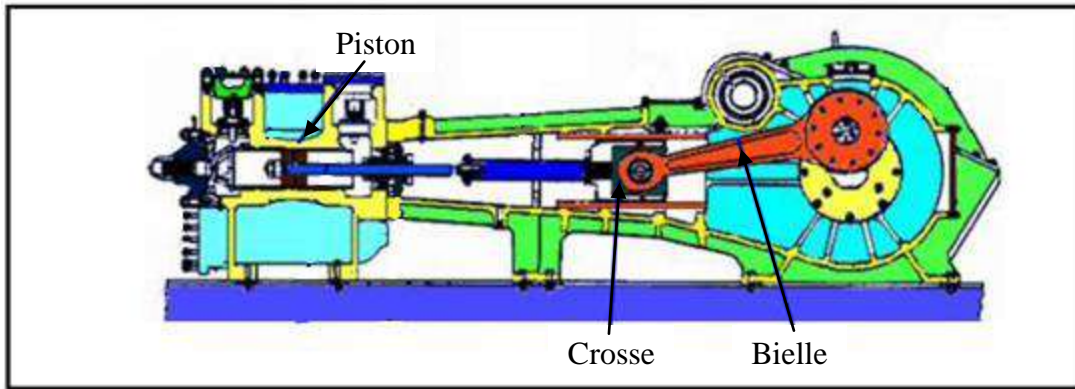


Figure 1.26 : Pomme de forage [1]

2.2.3.2 Cycle de la boue de forage :

Le départ de ce cycle, quand le foreur démarre les pompes à boue, ces pompes aspirent la boue des bassins par l'intermédiaire d'un tuyau flexible placé à la tête d'injection, cette dernière reliant la tige carrée au moufle, on injecte la boue de forage à l'intérieur des tiges. Elle débouche de l'outil par des trous aménagés dans le corps même de l'outil. Elle permet également, en remontant, d'entraîner avec elle par l'espace compris entre l'extérieur des tiges et la paroi du trou les débris de roche broyée. Ces débris sont évacués en surface sur des tamis vibrants ; la boue ainsi libérée de ces débris revient vers des bassins à boue et sera de nouveau injectée à l'intérieur des tiges [6].

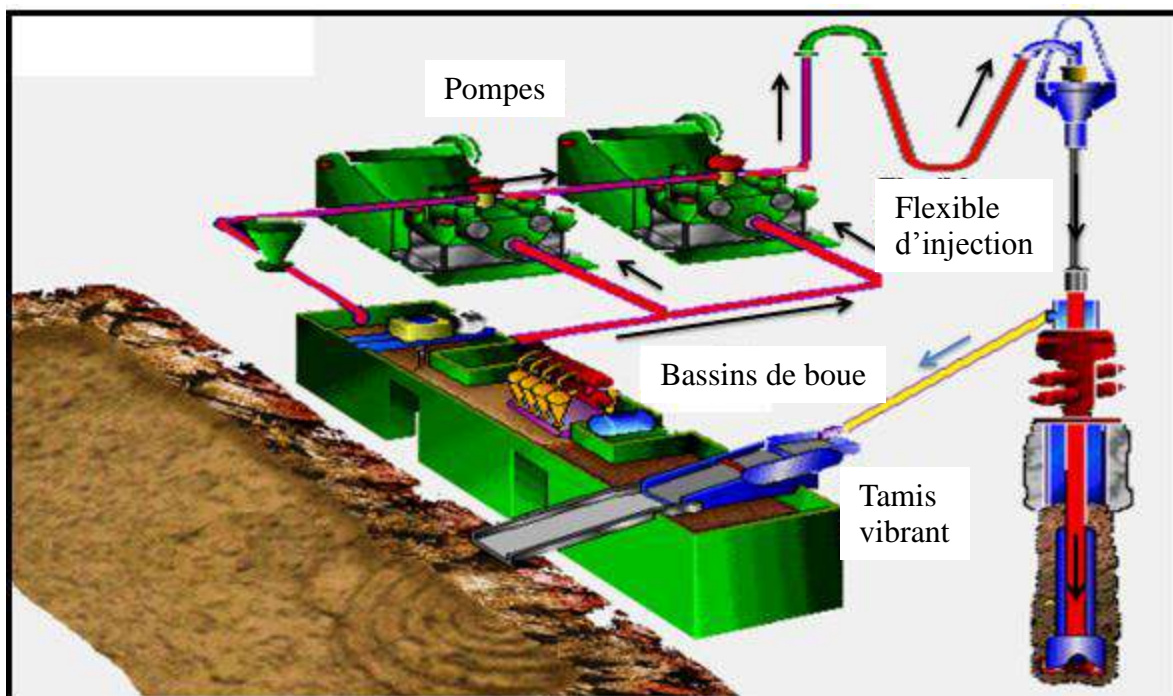


Figure 1.27 : Cycle du fluide sur le site de forage [1]

2.3 Les systèmes de transmissions de puissance :

*** Transmission mécanique :**

Plusieurs moteurs diesel travaillent en parallèle grâce à leur interconnexion par un système de chaînes, d'embrayage...

*** Transmission électrique :**

Les appareils de forage utilisent le système pour la consommation d'énergie électrique qui est fournie par le moteur diesel (Caterpillar) et les génératrices, l'avènement des thyristors SCR a pour rôle le développement du système AC/DC [2].

CHAPITRE 2

Les outils de forage

INTRODUCTION

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains.

Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser.

La facilité avec laquelle une roche est détruite dépend de nombreux paramètres :

- La nature de la roche (dureté et abrasivité du minéral la constituant, etc.).
- Les caractéristiques du milieu environnant (contraintes en place, diagenèse du sédiment, pression de formation, pendage de la couche, etc.).
- La trajectoire du puits qui agit sur la répartition des contraintes dans la roche.
- Les moyens utilisés pour réaliser le puits (type d'outil, d'usage de l'outil, type de boue, de BHA, de garniture, etc.).
- Les paramètres appliqués pour détruire la roche (poids sur l'outil, vitesse de rotation, débit de forage, etc.).

1. Les outils de forage:

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

Une étude comparative de la performance des outils et des paramètres d'utilisation des outils est en générale effectués au cours des premiers forages pour choisir les meilleurs outils pour forer les prochains puits. Le meilleur outil étant celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré le plus bas

Plusieurs types d'outil sont utilisés dans le forage pétrolier, mais ils sont généralement classifiés en deux grandes catégories qui sont les outils à molettes et les outils à éléments de coupe fixes [10] :

1.1 Les outils à molettes :

Les outils à molettes ont été introduits dans le forage rotary par H.R. HUGUES en 1909.

Ils peuvent être des bi-cônes (utilisés actuellement dans les déviations par pression), des tricônes (les plus utilisés dans les forages actuels).

Un tricône est constitué de 3 bras forgés (figure 2.1), usinés avec leurs tourillons, qui subissent ensuite un traitement thermique et sont assemblés par soudure [4].

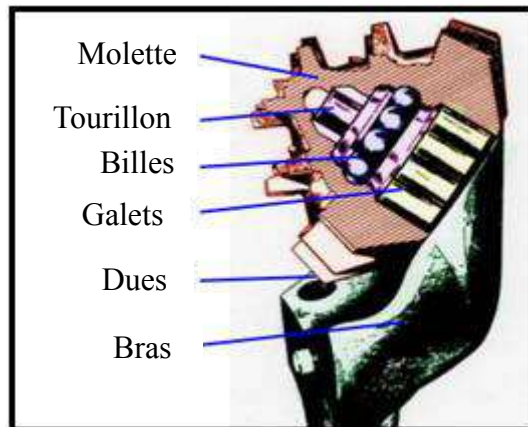


Figure 2.1 : Bras de l'outil [4]

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

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

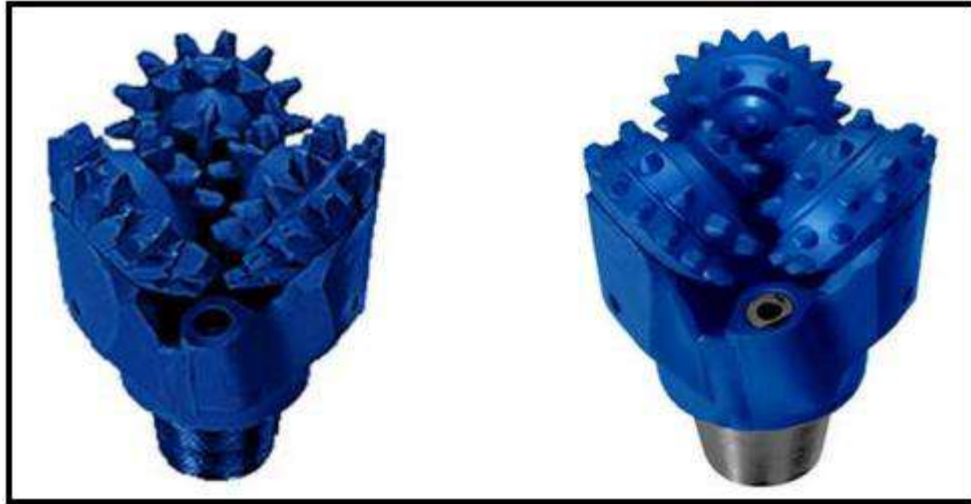


Figure 2.2 : Les outils à molettes (tricône) [10]

1.1.1 Mode de travail d'un tricône :

Sous l'effet de la compression, la dent pénètre dans la roche et l'éclate. En tournant sur elle-même sous l'effet de la rotation, la molette ripe la roche et arrache le copeau. L'effet d'éclatement et de ripage sont complémentaires et varient en fonction du terrain : le ripage dans le cas d'un terrain tendre est plus important que dans un terrain dur, tandis que l'éclatement dans un terrain dur est plus grand que dans un terrain tendre [4].

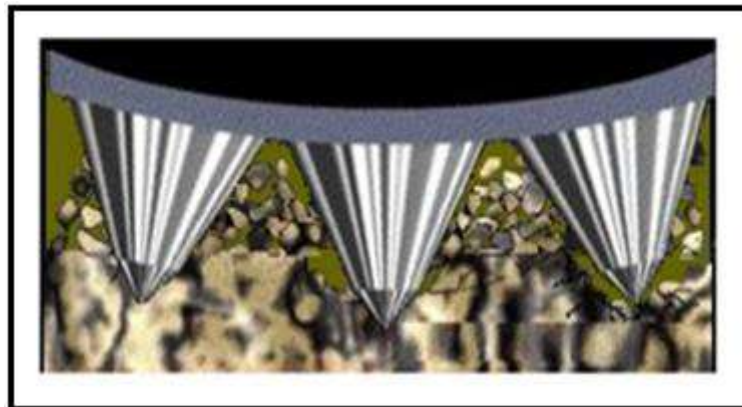


Figure 2.3 : Travail d'un outil [4]

1.1.2 L'hydraulique à l'outil :

Le tricône dit « conventionnel » comporte un simple passage de fluide dans l'axe de l'outil. Le fluide lave l'outil par l'intérieur des cônes avec moindre efficacité que des jets. On ne le rencontre pratiquement que pour les gros diamètres de forage.

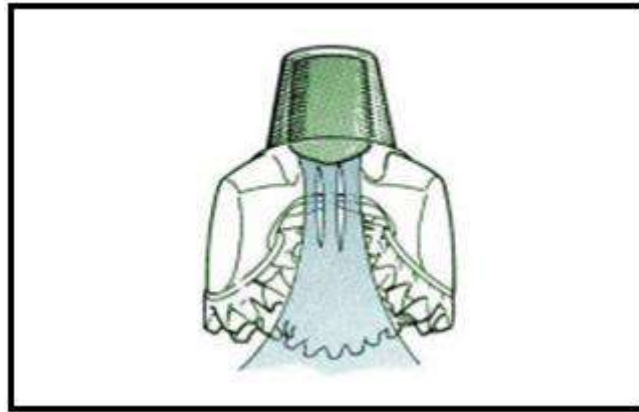


Figure 2.4 : Outil conventionnel [4]

L'outil à jet comporte trois duses (jet nozzle) situées entre les bras du tricône. On peut régler le jet à son efficacité maximale en changeant le diamètre de passage. La turbulence est efficace pour des vitesses comprises entre 80 et 150 m/s. Les jets ont pour rôle de nettoyer les molettes, de refroidir les paliers et surtout de refouler les cuttings vers l'espace annulaire. Sur certains outils des duses rallongées améliorent les performances de nettoyage [5].

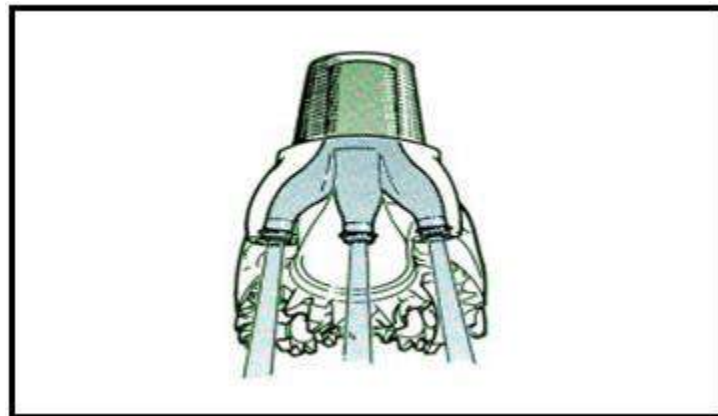


Figure 2.5 : Outil à jet [4]

1.1.3 Système de lubrification :

Les outils à paliers étanches ont leur système de lubrification dans chaque bras. Celui-ci comprend un réservoir à graisse, un compensateur par membrane caoutchouc et un canal étanche. Le compensateur égalise la pression dans le roulement entre celle du fluide de forage et celle de la graisse encapsulée à la fabrication [5].

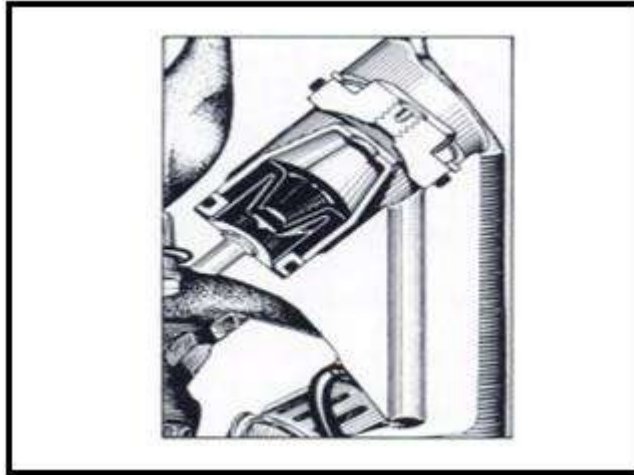


Figure 2.6 : Système de lubrification des paliers [5]

1.2 Les outils à éléments de coupe fixes :

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. Des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot [11].

1.2.1 Les outils diamants :

Il existe deux catégories d'outils diamantés cités ci-dessous :

1.2.1.1 Les outils à diamant naturel :

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

Le diamant est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80000 bar (carbure de tungstène : 50000 ; acier : 15000). Son point de fusion est très élevé (3650°C). Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0.2 gramme) [12] [13].

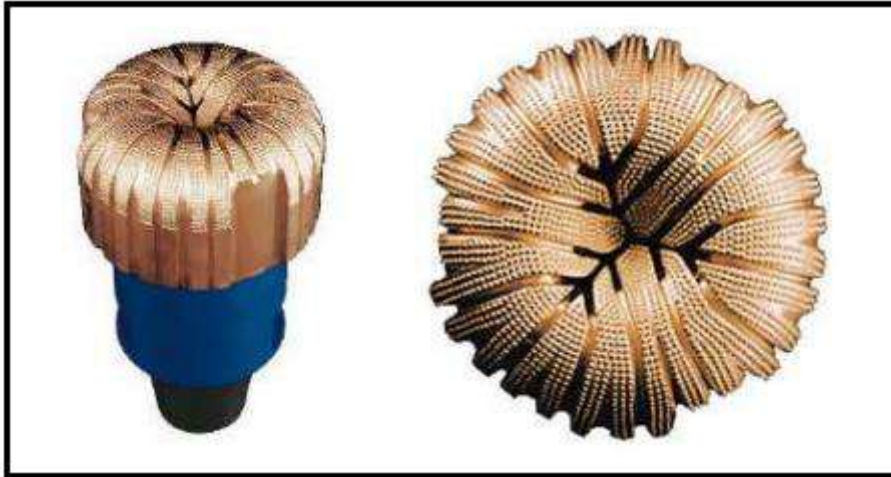


Figure 2.7 : Outil à diamant naturel [10]

1.2.1.2 Les outils à diamant synthétique :

On distingue deux types :

➤ Les outils PDC (Poly cristalline Diamand Compact) :

Ces outils 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. En effet l'avantage fondamental des outils PDC réside dans l'absence des parties mobile, d'où leur nom d'outils monobloc. L'inconvénient majeur des PDC est de ne pas supporter des températures au-delà de 800°C [12].



Figure 2.8 : Les Outils PDC [12]

➤ **Les outils TSP (Polycristallins diamants thermostables) :**

Contrairement au PDC les TSP ont subi un traitement thermique pour éliminer les éléments incompatibles d'un point de vue dilatation thermique ils pourront donc supporter des températures de fabrication d'une matrice carbure. Leur forme triangulaire présente des arêtes agressives pour le cisaillement de la roche. Leur utilisation est souvent associée à l'action de diamants naturels [12].

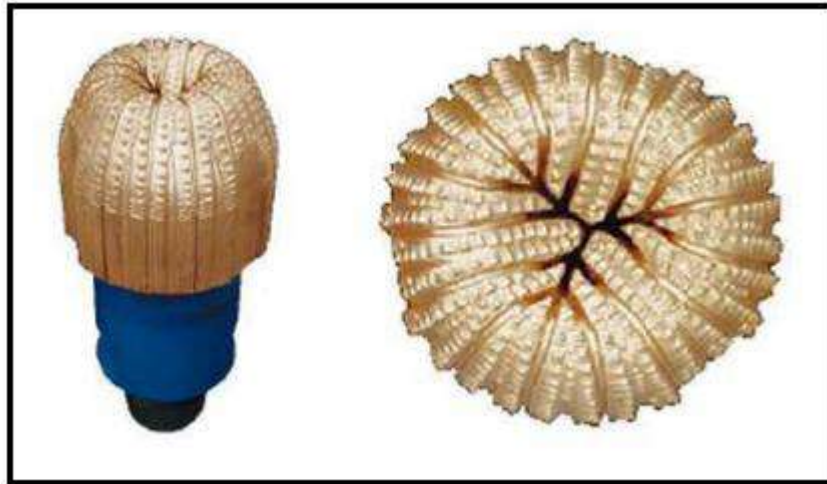


Figure 2.9 : Les Outils TSP [10]

➤ **Les outils imprégnés :**

Ce type d'outil comporte des lames en carbure de tungstène imprégnées de petits grains de diamants permettant de creuser à travers des roches très dures. Le carbure de tungstène s'use sur la surface de coupe et les grains de diamants usés tombent, faisant place à des grains non usés.

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

Pour optimiser la performance des imprégnés il faut les coupler avec des moteurs (PDM) High Speed ou avec des turbines [10].

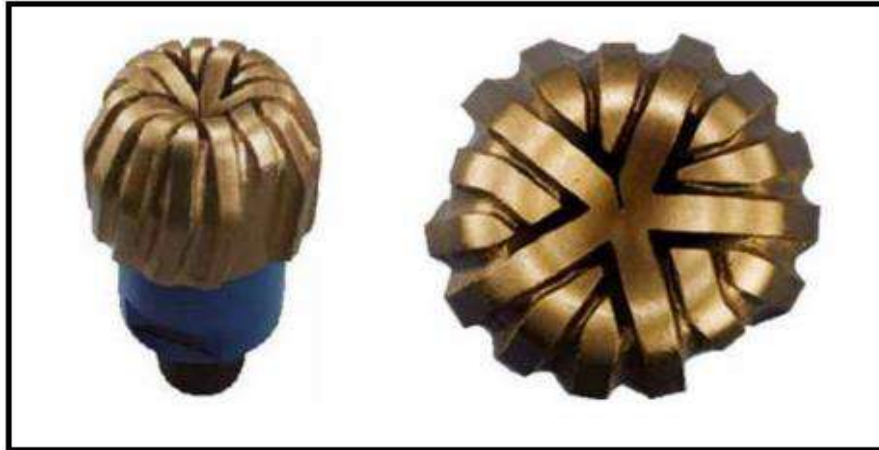


Figure 2.10 : Les Outils imprégnés [10]

1.2.2 Avantages de diamant synthétique et diamant naturel :

- Les deux produits (PDC, TSP) sont plus résistants à l'abrasion que les diamants naturels mais ils sont moins durs.
- La raison de l'énorme succès des pierres synthétiques et que le scientifique a la possibilité de fabriquer des diamants qui répondent exactement aux exigences des industriels [13].

1.2.3 Mode de destruction de la roche par les différents types de diamants :

1.2.3.1 Les diamants naturels :

Il agit par abrasion en creusant un sillon autant par fracturation que cisaillement, il laboure la roche. L'effort d'écrasement a autant d'importance que l'effort tangent. Il sera nécessaire d'appliquer un poids et une vitesse de rotation relativement élevés pour forer.

Le handicap du diamant naturel est la faible dimension des pierres utilisées. La profondeur de l'entaille produite dans la roche est très faible (de l'ordre de 0.1 mm). Cela limite l'utilisation du diamant naturel aux terrains les plus durs et abrasifs. Les vitesses d'avancement obtenues seront donc relativement faibles (de 2 à 5 m/h) [13].

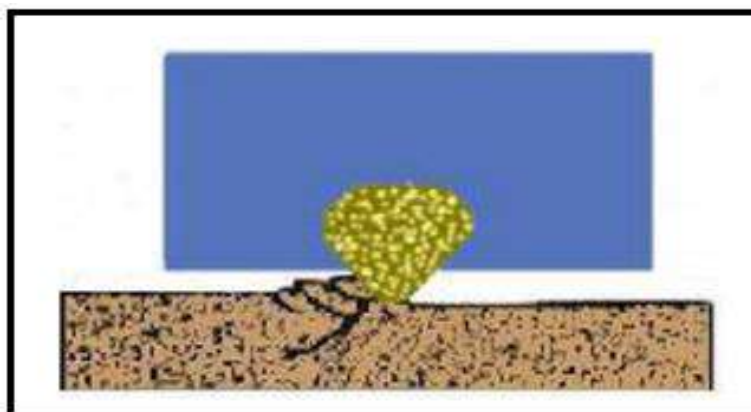


Figure 2.11 : Mode de destruction de la roche par les outils à diamant naturel [13]

1.2.3.2 Les PDC :

Les outils PDC forent en coupant la formation par cisaillement.

Pour garder l'efficacité du mécanisme de cisaillement à un niveau élevé, il est essentiel que les bords des éléments de coupe du PDC restent tranchants. Comme la dent s'use et développe un méplat, l'énergie spécifique du système de coupe augmente autant que le poids qui est exigé pour maintenir une profondeur constante de coupe.

Les taillants PDC maintiennent un bord tranchant pendant qu'ils s'usent parce que le carbure de tungstène qui est directement derrière la couche de diamant s'use plus rapidement que le diamant du poly cristalline, dû à sa résistance à l'abrasion plus faible. Cela a pour résultat la formation d'une lèvre de diamant qui reste tranchant durant la vie du PDC, cet effet est appelé auto-affûtage des cutters PDC. Par conséquent les outils PDC maintiennent une vitesse d'avancement relativement élevée dans l'intervalle total foré [13].

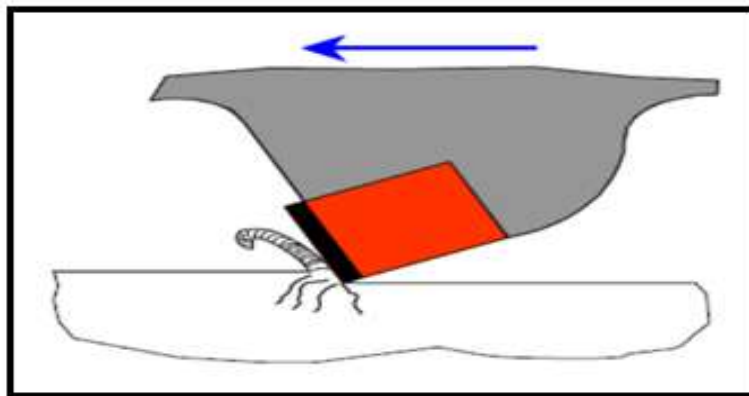


Figure 2.12 : Mode de destruction de la roche par les outils PDC [13]

1.2.3.3 Les TSP :

L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de destruction des PDC et des diamants naturels. Lorsque l'outil est conçu pour forer des formations tendres, le TSP cisaille la roche. Dans les formations dures, il laboure la roche de la même manière que le diamant naturel.

Quel que soit le type de diamant utilisé, la friction entre les taillants et la formation produit beaucoup de chaleur, le débit de circulation doit être important pour refroidir correctement l'outil et éviter de détruire les diamants [13].

2. Les paramètres de forage :

Ce sont les paramètres mécaniques et hydrauliques pouvant agir sur la vitesse de progression du forage, traduite dans le métier par le ROP (Rate of Penetration) ainsi que sur le comportement directionnel du système de forage. L'optimisation du ROP est l'un des aspects les plus importants dans l'économie du forage car environ la moitié du coût total du puits est directement proportionnelle au temps de forage. Augmenter le ROP, donc augmenter l'efficacité du processus de forage, permet de réduire significativement le coût de réalisation du puits [15].

2.1 Paramètres mécaniques :

Sont des paramètres issus par l'utilisation des processus mécanique appliqué sur la roche tel que la traction, la compression pour un bon avancement, ces paramètres sont :

➤ **Le poids à l'outil (Weight On Bit, WOB) :**

Ce paramètre désigne la force appliquée par la garniture de forage sur l'outil suivant son axe de révolution pour qu'il puisse pénétrer la roche. Cette force dépend du poids déjaugé de la garniture, du poids au crochet (tension en surface).

➤ **La vitesse de rotation (Revolutions Per Minute, RPM) :**

Le choix de la vitesse de rotation dépend de celui (WOB). En surface, elle peut être précisément contrôlée mais elle peut être différente de la vitesse de rotation du trépan. Elle peut varier entre 50 et 1000 tr/min.

➤ **Le couple à l'outil (Torque On Bit, TOB) :**

Ce paramètre correspond au couple transmis par la garniture au trépan suivant son axe de révolution. Il représente les effets combinés du couple réactif et des forces de frottement non linéaires sur la longueur du BHA [14].

2.2 Paramètres hydrauliques :

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

➤ **Type de boue :**

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

➤ **Débit et pression hydraulique**

Le débit et la pression hydraulique représentent les variables physiques qui doivent favoriser une bonne évacuation des déblais et éviter des problèmes d'encrassement du trépan ou du puits.

➤ **Densité de la boue :**

L'obtention des informations relatives au puits et particulièrement le contrôle de la pression dans le puits s'effectue à travers la densité de la boue. La boue de forage ramène à la surface les déblais, mais aussi du gaz contenu dans les roches. Cela fournit des indications sur la nature des fluides se situant dans le réservoir et représente un élément important dans le pilotage de la garniture [14].

3. Explication de l'effet de paramètre mécanique sur le ROP :

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

➤ **Le poids sur l'outil :**

Un test de forabilité typique qui illustre le changement de ROP contre le WOB est montré dans la figure (2.13), la réponse de ROP au changement de WOB est caractérisée par 03 régions, la première région (ab) est quand le WOB appliqué est insuffisant pour forer ainsi plus de poids est nécessaire pour être appliqué sur l'outil pour pousser ses dents à l'intérieur de la formation, le forage dans cette région est inefficace et le poids appliqué, appelé au-dessous de la profondeur de la coupe, devrait être augmenté pour atteindre la valeur exigée de l'outil pour forer ou ce qui s'appelle le poids de seuil.

Dans la deuxième région (bc) un forage efficace a été établi et la ROP répond linéairement au changement de WOB. Dans cette région l'efficacité de forage est à son maximum et la

ROP peut seulement être augmenté par une augmentation de WOB, la pente de la ligne de ROP versus WOB dépend du type de formation, du type de l'outil et de la vitesse de rotation.

La troisième région (cd) commence au point d'effondrement (founder point) quand la ROP arrête à augmenter linéairement avec le WOB, ceci signifie que le système a approché son performance maximale dans les conditions actuelles, de nouvelle conception est nécessaire pour plus d'amélioration de ROP, les causes du point d'effondrement peuvent être des vibrations sévères, mauvais nettoyage du trou ou bourrage de l'outil de forage [10].

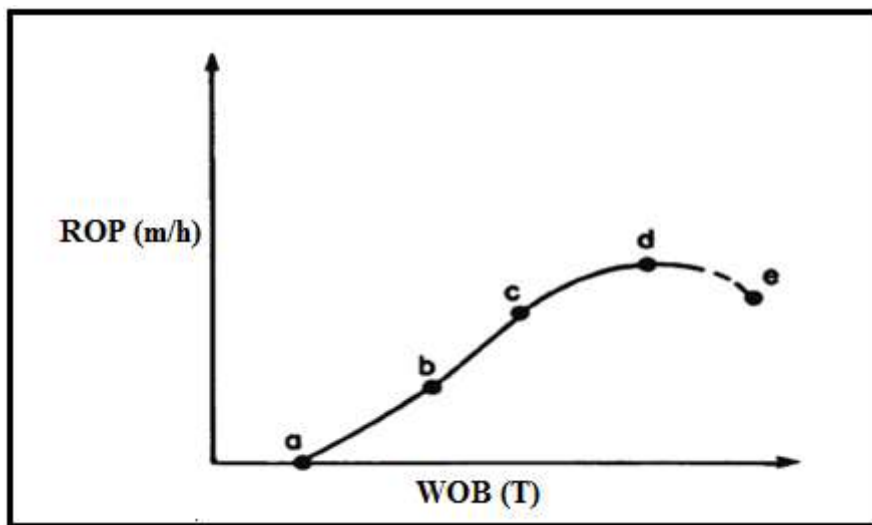


Figure 2.13 : Effet de WOB sur ROP.

➤ **La vitesse de rotation :**

La vitesse de pénétration répond positivement à l'augmentation de la vitesse de rotation, la figure (2.14) montre la relation linéaire entre la ROP et la vitesse de rotation. Dans une certaine gamme de RPM, l'augmentation de ROP est proportionnelle à l'augmentation de RPM; à partir d'une certaine valeur de RPM, l'augmentation de ROP diminue fortement et devient quasiment nulle. La raison de cette faible augmentation de ROP lorsque la RPM devient relativement importante est due au fait que le temps entre les impacts des éléments de coupe sur la roche et de plus en plus court. Ce temps devient insuffisant pour permettre aux éléments de coupe de pénétrer suffisamment dans la formation, de la fissurer (ce dernier point est supporté par le fait que l'augmentation de le RPM produit une diminution de couple à l'outil) et pour évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille.

Contrairement au WOB, il n'existe pas de seuil de vitesse pour les formations dures, l'outil avance dès qu'il commence à tourner. L'augmentation de la RPM a beaucoup plus d'effet sur

les formations tendres que sur les formations dures (pente de variation de ROP plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

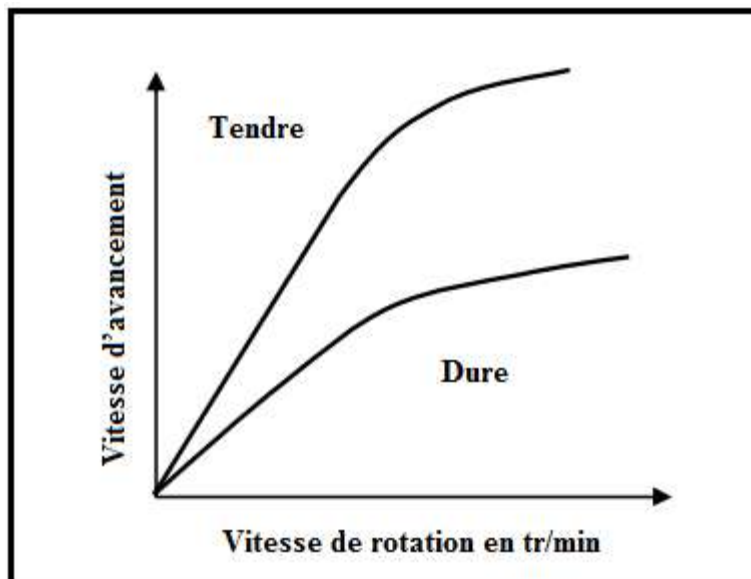


Figure 2.14 : Effet de la vitesse de rotation sur ROP [10]

Les paramètres mécaniques WOB et RPM à appliquer sur un outil varient suivant le type de l'outil. Les fabricants indiquent pour chaque type les plages de WOB et RPM que l'on peut appliquer (il est recommandé de rester à l'intérieur de ces plages pour ne pas dépasser les capacités des roulements et des structures de coupe).

Pour les outils à diamant naturel, le poids est un paramètre important. Par contre pour 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 [10].

CHAPITRE 3

Optimisation des paramètres mécanique

INTRODUCTION

L'optimisation selon la définition est le processus de choisir les meilleures variables afin de maximiser ou minimiser un paramètre spécifique. L'optimisation de forage consiste à minimiser le coût du mètre foré ou minimiser les problèmes de forage. La réduction du coût du mètre foré peut être réalisée par le choix des variables de forage contrôlables qui donnent la vitesse de pénétration optimale tout en tenant compte de l'usure des dents de l'outil.

L'optimisation de forage n'est pas limitée à l'optimisation de la vitesse de pénétration, elle inclut tous les opérations et équipement qui entrent dans le procédé de construction du puits tel que le choix de tubage, le choix de la garniture de forage, le choix de boue, le nettoyage du trou et ainsi de suite, mais pour les objectifs de cette étude ils sont considérés être déjà optimisés.

Les variables contrôlables de forage qui seront optimisées dans cette étude sont le poids sur l'outil et la vitesse de rotation [10].

Le poids sur l'outil optimum et la vitesse de rotation optimale choisis devraient produire le minimum coût par mètre foré possible.

$$Cost\ total = P_0 + P_h (T_m + T_f) \dots \dots \dots (1)$$

$$P_m = \frac{P_0 + P_h (T_m + T_f)}{M} \dots \dots \dots (2)$$

P_m : le prix de mètre foré.

P_0 : le prix de l'outil.

P_h : le prix de l'heure de l'appareil.

T_m : le temps de manœuvre nécessaire pour descendre et remonter l'outil.

T_f : le temps de rotation de l'outil pour effectuer la profondeur M.

1. Model de ROP :

Plusieurs méthodes ont été développées pour optimiser les paramètres de forage. Bien entendu, le détail de la plupart de ces méthodes reste confidentiel, car elles restent la propriété industrielle de la société qui a investi sur cette recherche. Néanmoins, les éléments de base de chaque recherche sont publiés dans les revues internationales [16].

Auteurs	Modèle ROP
Graham et Muench (1959)	$ROP = C_{for} D^k N^{0.584} WOB$
Galle et Woods (1960)	$ROP = C_{for} \cdot \frac{WOB^{K1} N^{K2}}{(0.93h^2 + 6h + 1)^p}$
Teale (1965)	$ROP = \frac{13.33u_s \cdot N}{d_b \left(\frac{CCS}{EFF_M \cdot WOB} - \frac{1}{A_B} \right)}$
Bourgoyne et Young (1974)	$ROP = e^{(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j \cdot x_j)}$
Eckel (1967)	$ROP = a * WOB^b * RPM^c$

Figure 3.1 : Résumé des modèles d'optimisation de ROP [10]

1.1 Modèle d'Eckel :

Modèle d'Eckel effectuées sur des micro-outils exprimant la vitesse d'avancement de façon exponentielle en fonction de nombre de Reynolds au fond du puits.

La relation présentée est indépendante du poids sur l'outil, de la vitesse de rotation, de la pression différentielle, et de la formation. Présente par l'équation suivante :

$$ROP = a * WOB^b * RPM^c \dots\dots\dots (3)$$

ROP : la vitesse d'avancement (m/hr).

WOB : le poids sur l'outil (T).

RPM : la vitesse de rotation (t/min).

a, b, c : les coefficients dépendant de la formation.

1.1.1 Calcul des coefficients a, b, c :

Pour obtenir un modèle consistant les coefficients a , b , c devrait être choisi de sorte que l'erreur résiduelle soit au minimum, pour réaliser ceci, utilise la méthode des moindres carrés (**least squares method**).

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

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=n-l}^n \log ROP_i - \sum_{i=n-l}^n \log a - \sum_{i=n-l}^n b \log WOB_i - \sum_{i=n-l}^n c \log RPM_i = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial b} &= \sum_{i=n-l}^n \log ROP_i * \log WOB_i - \sum_{i=n-l}^n \log a * \log WOB_i - \sum_{i=n-l}^n b(\log WOB_i)^2 \\ &- \sum_{i=n-l}^n c \log RPM_i * \log WOB_i = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial c} &= \sum_{i=n-l}^n \log ROP_i * \log RPM_i - \sum_{i=n-l}^n \log a * \log RPM_i - \sum_{i=n-l}^n c(\log RPM_i)^2 \\ &- \sum_{i=n-l}^n b \log WOB_i * \log RPM_i = 0 \end{aligned}$$

Les équations peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$X*A=Y$$

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i & \sum_{i=n-l}^n \log RPM_i \\ \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i & \sum_{i=n-l}^n (\log WOB_i)^2 & \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i * \log RPM_i \\ \sum_{i=n-l}^n \log RPM_i & \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i * \log RPM_i & \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i * \log RPM_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \log a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=n-l}^n \log ROP_i \\ \sum_{i=n-l}^n \log ROP_i * \log WOB_i \\ \sum_{i=n-l}^n \log WOB_i * \log RPM_i \end{bmatrix}$$

La matrice sera résolue pour les coefficients du modèle ROP (a, b, c)

$$A=X^{-1}* Y$$

1.2 Modèle de régression :

Le plus souvent, le problème qui se pose à l'ingénieur est le suivant : il dispose d'un ensemble de mesures de variables d'un processus de nature quelconque (physique, chimique, économique, financier, ...), et du résultat de ce processus ; il suppose qu'il existe une relation déterministe entre ces variables et ce résultat, et il cherche une forme mathématique de cette relation [17].

La régression est une méthode permettant de déterminer un modèle linéaire ou non linéaire de relation entre la variable dépendante et un groupe de variables indépendantes. À partir d'un ensemble de valeurs expérimentales, représentées par des points sur un graphique, on cherche à calculer la courbe qui reproduit le mieux les variations de la grandeur à étudier, c'est-à-dire celle qui passe par tous les points ou le plus proche possible. La régression est donc l'opération qui consiste à faire passer une droite ou tout autre courbe mathématique "le plus près possible" d'un certain nombre de points obtenus d'une manière expérimentale [18].

2. Critère de Performance du Modèle :

Il existe de nombreux critères pour l'évaluation des modèles conceptuels. Le coefficient de détermination multiple R^2 peut être classé comme des indicateurs numériques pour définir un modèle optimal.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \dots \dots \dots (4)$$

Y : La sortie réelle.

\hat{Y} : La sortie donnée par le modèle.

\bar{Y} : La moyenne mathématique de sortie réelle.

3. Application des modèles de ROP sur le puits HAZ-106 :

On prend profondeur (Tableau 3.1) comme exemple d'application de l'optimisation de la vitesse d'avancement en utilisant le modèle d'Eckel et modèle de régression et la méthode des moindres carrés.

La vitesse d'avancement réalisée et les paramètres appliqués en fonction de la profondeur sont présentés dans le tableau suivant :

Profondeur (m)	ROP (m/h)	WOB (T)	RPM (t/min)
2442	5,330	8,907	92,341
2443	2,709	9,900	99,912
2444	2,332	9,917	103,068
2445	2,603	9,679	101,838
2446	3,252	10,871	95,135
2447	5,625	11,797	98,195
2448	4,642	12,939	102,105
2449	3,136	11,682	97,909
2450	21,179	10,970	105,823
2451	12,060	11,069	95,001

Tableau 3.1 : Les paramètres de forage appliqués et la vitesse d'avancement enregistré.

3.1 Le modèle d'Eckel :

$$\text{ROP} = a * \text{WOB}^b * \text{RPM}^c \dots\dots\dots (3)$$

On calcule les coefficients de l'équation d'Eckel en utilisant la méthode des moindres carrés et on réinjecte les paramètres appliqués dans l'équation (3) pour calculer la vitesse d'avancement à partir du modèle afin de tester sa précision :

a	0,032
b	1,557
c	0,283

Donc :

$$\text{ROP} = 0,032 * \text{WOB}^{1,557} * \text{RPM}^{0,283} \dots\dots\dots (5)$$

La vitesse d'avancement calculée obtenue par l'injection des paramètres de forage appliqués dans cette équation est représentée dans le tableau suivant :

Profondeur (m)	ROP calculée (m/h)
2442	3,495
2443	4,213
2444	4,261
2445	4,089
2446	4,806
2447	5,508
2448	6,431
2449	5,420
2450	5,024
2451	4,941

Tableau 3.2 : La vitesse d'avancement calculé.

3.1.1 Performance du modèle ROP {Eckel} :

L'instabilité de la vitesse d'avancement due aux changements de la nature de la formation.

Profondeur (m)	ROP (m/h)	ROP calculée
2442	5,330	3,495
2443	2,709	4,213
2444	2,332	4,261
2445	2,603	4,089
2446	3,252	4,806
2447	5,625	5,508
2448	4,642	6,431
2449	3,136	5,420
2450	21,179	5,024
2451	12,060	4,941

Tableau 3.3 : la vitesse d'avancement en fonction de la profondeur.

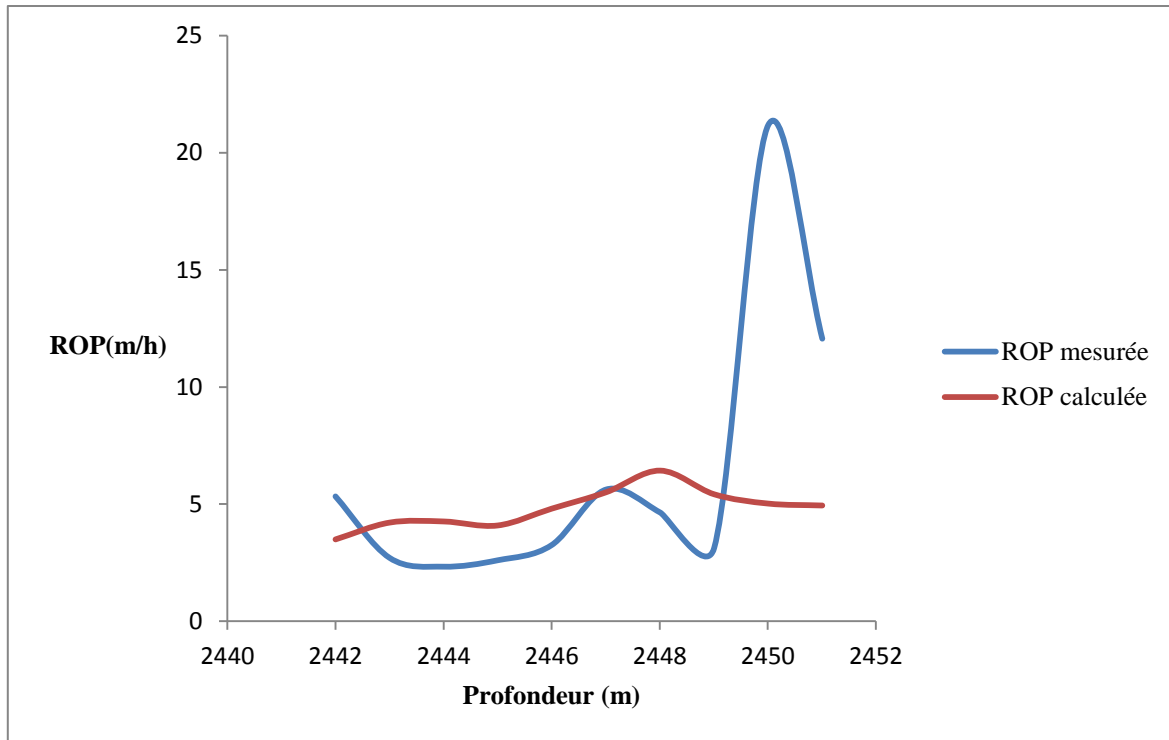


Figure 3.2: Les vitesses d'avancement mesurée et calculée en fonction de la profondeur.

La vitesse d'avancement calculée en utilisant le modèle de ROP (Eckel) ainsi que la ROP mesurée sont tracés contre la profondeur pour chaque point de donnée (Figure 3.2).

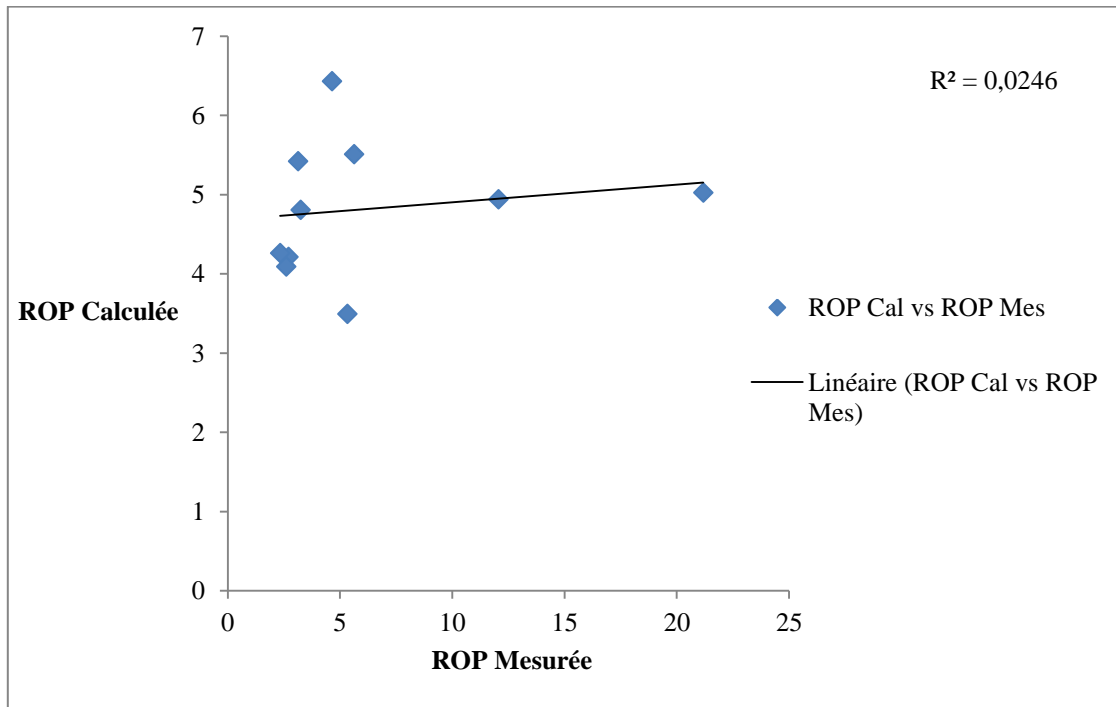


Figure 3.3: ROP Calculée versus ROP mesurée.

Le modèle adopté a été employé pour calculer la vitesse de d'avancement à chaque point de donnée et la ROP calculée a été tracée contre la ROP mesurée dans la figure (3.3), le coefficient de détermination $R^2 = 0,0246$ indique que le modèle donne une estimation inacceptable de la ROP.

3.2 Modèle de régression :

La vitesse d'avancement peut être calculée par un modèle mathématique, de plusieurs inconnus qui sont représentés par les paramètres de forage, il suffit de connaître les valeurs de l'un des paramètres de forage pour avoir la vitesse d'avancement.

On peut représenter le nuage de points de la série de l'exemple précédent Tableau (3.1) pour visualiser facilement la relation entre des variables (ROP, WOB, RPM).

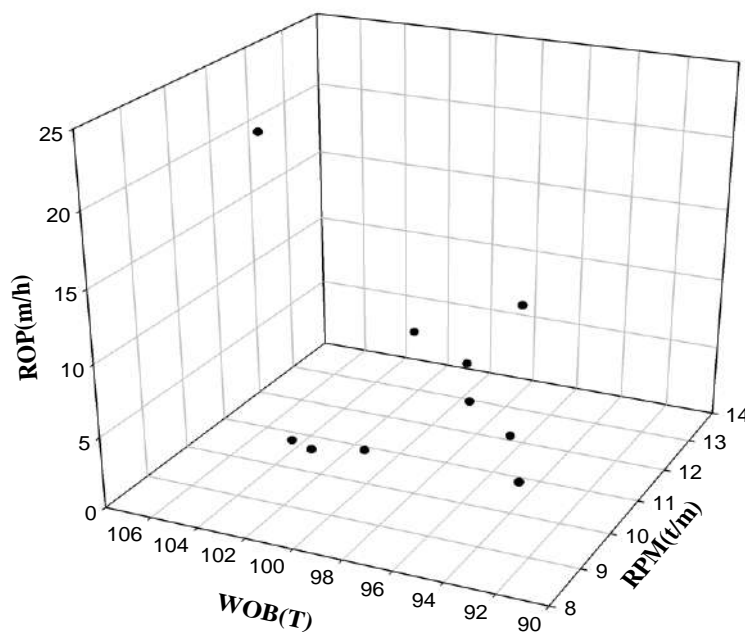


Figure 3.4: Le nuage de points quadratique.

D'après Nuage de points représentés dans la figure (3.4) la vitesse d'avancement peut se présenter sous la forme suivante :

$$\text{ROP} = a + b \text{ WOB} + c \text{ RPM} + d \text{ WOB}^2 + e \text{ RPM}^2 \dots\dots\dots (6)$$

On calcule les coefficients de l'équation de régression en utilisant la méthode des moindres carrés et on réinjecte les paramètres appliqués dans l'équation (6) pour calculer la vitesse d'avancement à partir du modèle afin de tester sa précision.

Et on a obtenu le résultat suivant :

a	2864
b	39,33
c	-62,57
d	-1,702
e	0,317

Donc :

$$\text{ROP} = 2864 + 39,33 \text{ WOB} - 62,57 \text{ RPM} - 1,702 \text{ WOB}^2 + 0,317 \text{ RPM}^2 \dots\dots\dots (7)$$

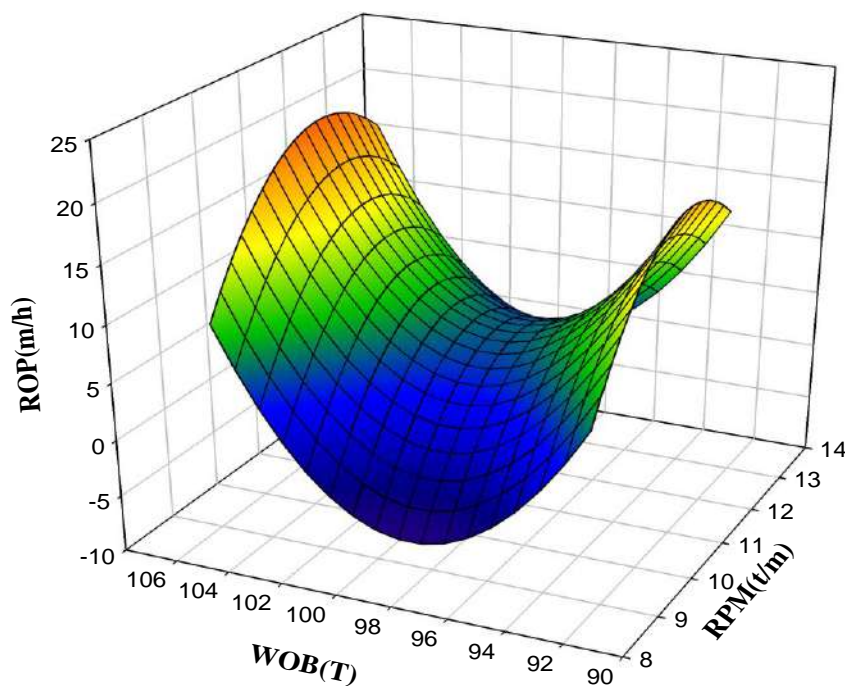


Figure 3.5 : ROP en fonction WOB et RPM.

La vitesse d'avancement calculée obtenue par l'injection des paramètres de forage appliqués dans cette équation est représentée dans le tableau suivant :

Profondeur (m)	ROP calculée
2442	4,522
2443	0,517
2444	5,177
2445	0,822
2446	6,881
2447	3,644
2448	4,095
2449	3,833
2450	19,211
2451	7,582

Tableau 3.4 : La vitesse d'avancement calculé.

3.2.1 Performance du modèle ROP :

Les vitesses d'avancement réalisée et calculé moyennant modèle de régression dans l'intervalle 2442 m à 2451 m sont présentées dans le tableau suivant :

Profondeur (m)	ROP (m/h)	ROP calculée
2442	5,330	4,522
2443	2,709	0,517
2444	2,332	5,177
2445	2,603	0,822
2446	3,252	6,881
2447	5,625	3,644
2448	4,642	4,095
2449	3,136	3,833
2450	21,179	19,211
2451	12,060	7,582

Tableau 3.5 : la vitesse d'avancement en fonction de la profondeur.

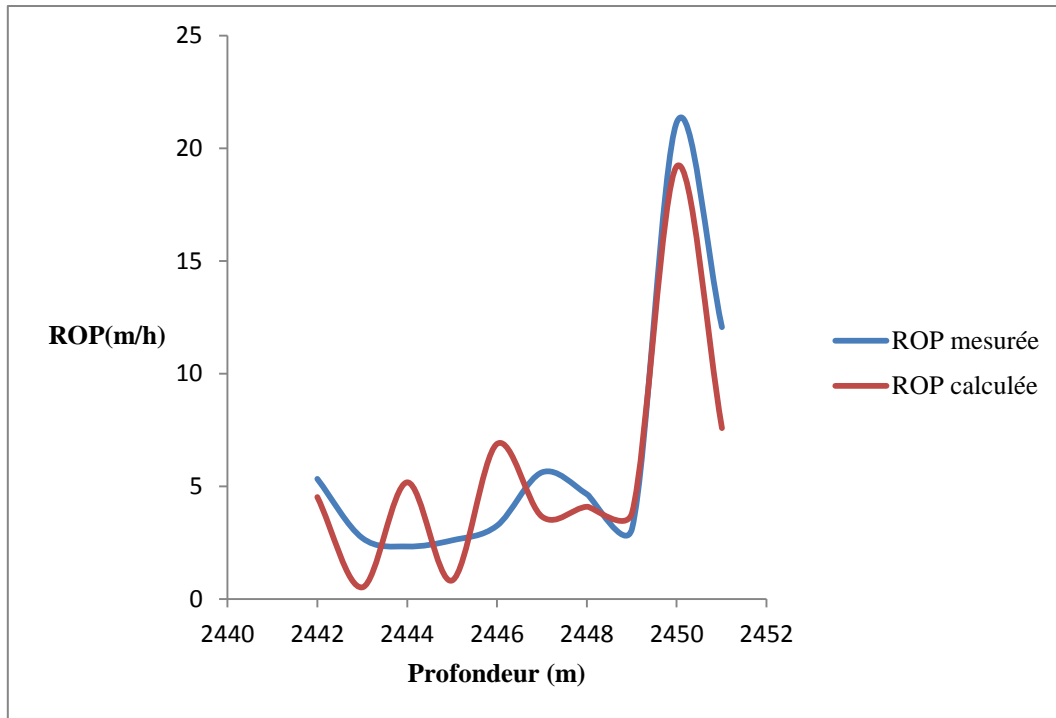


Figure 3.6 : Les vitesses d'avancement mesurée et calculée en fonction de la profondeur.

La vitesse d'avancement calculée en utilisant le modèle de ROP ainsi que la ROP mesurée sont tracés contre la profondeur pour chaque point de donnée (Figure 3.6).

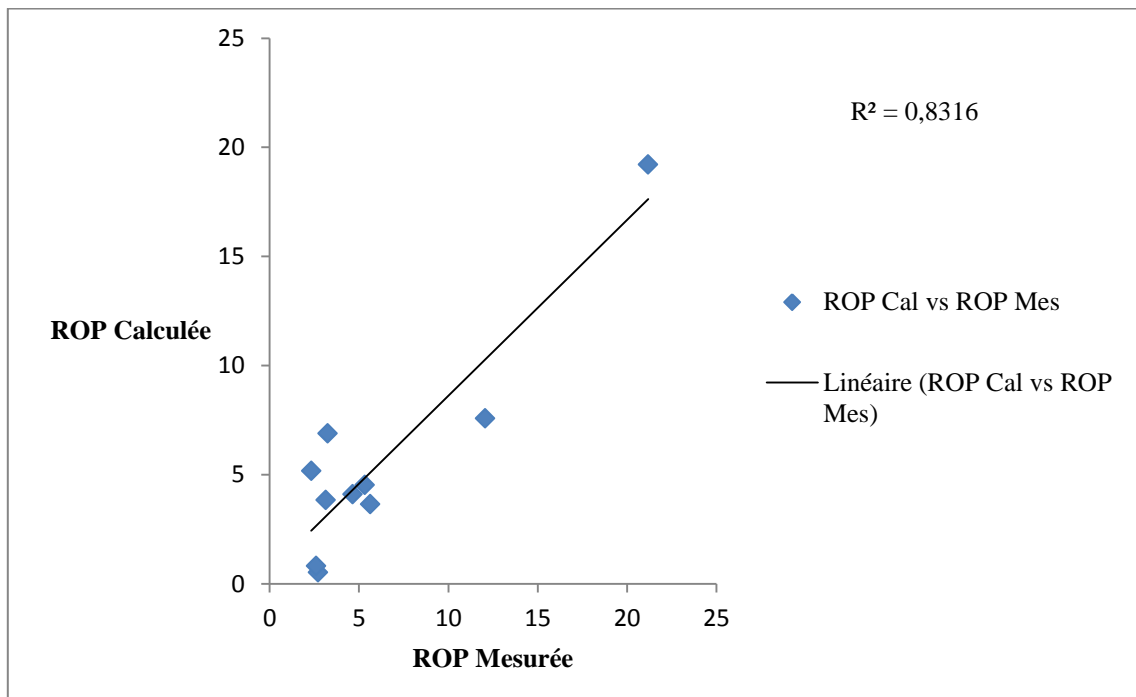


Figure 3.7: ROP Calculée versus ROP mesurée.

Le modèle adopté a été employé pour calculer la vitesse de pénétration à chaque point de donnée et la ROP calculée a été tracée contre la ROP mesurée dans la figure (3.7), le coefficient de détermination $R^2 = 0,8316$ ce qui indique que le modèle de ROP donne des bons résultats.

3.2 Choix du modèle :

A chaque intervalle, nous devons appliquer les 2 modèles désignés ci-dessus de manière à déterminer le modèle le mieux adapté.

Il existe une seule méthode en notre possession pour comparer les 2 modèles pour chaque intervalle .Le coefficient de détermination multiple R^2 peut être classé comme des indicateurs numériques pour définir un modèle optimal.

On met le résultat d'intervalle [2442 ,2451] dans un tableau pour faciliter le choix du modèle, le tableau se présente comme suit :

Le coefficient de détermination	
Modèle de régression	Modèle d'Eckel
$R^2 = 0,8316$	$R^2 = 0,0246$

Tableau 3.6 : Choix du modèle.

On a conclue à partir de ce tableau que le meilleur modèle est : le modèle de régression.

4. Optimisation de ROP :

L'équation (2) ont été employé pour calculer le poids sur l'outil optimum et la vitesse de rotation optimale qui produiraient la ROP optimale qui donne le coût de forage le plus bas. Nous programmons la modèle de régression par le logiciel MATLAB.

$$WOB_{min} \leq WOB_{opt} \leq WOB_{max}$$

$$RPM_{min} \leq RPM_{opt} \leq RPM_{max}$$

L'optimisation a été exécutée pour l'intervalle [2442 ,2451] et les résultats sont présentés dans le tableau (3.7).

Paramètres	WOB_{min}	WOB_{max}	RPM_{min}	RPM_{max}	WOB_{opt}	RPM_{opt}	ROP_{opt}
Valeurs	3	13	95	105	11,5	95	8

Tableau 3.7: Optimisation de WOB et RPM.

Le poids sur l'outil optimum et la vitesse de rotation optimale ont été utilisés pour calculer la vitesse pénétration optimale.

Le temps de forage réel est : $T_{réel} = 2,5$ heures, Le temps de forage optimisé est : $T_{op} = 1,4$ heures.

Le temps gagné est égal :

$$\Delta T_f = (T_{réel} - T_{op})$$

$$\Delta T_f = 1,1 \text{ heure}$$

Le but de l'optimisation de ROP est de réduire au minimum le coût de forage qui dépend en grande partie de temps de forage (T_f), de ce fait la réduction du temps de rotation de l'outil réduira le coût du mètre foré.

Le modèle utilisé (Régression) a donnée de bons résultats avec un coefficient de détermination R^2 égale à 0,8316 soit un coefficient de corrélation R égale à 0.911.

CONCLUSION

Le forage des puits pétroliers est souvent perturbé par des arrêts imprévisibles générés par des incidents et des attentes (pannes des équipements de surfaces, attente matériels...). Aussi, le mauvais choix des paramètres de forage influe considérablement sur la vitesse d'avancement et par conséquent augmentation des couts de réalisation du puits.

Le but de cette étude était de minimiser le prix du mètre foré par un traitement des données d'un puits le plus proche et en temps réel, pendant le forage, et dans les meilleures conditions de sécurité, et de choisir des paramètres mécaniques optimaux pour chaque intervalle afin d'obtenir un temps de forage minimal et par conséquent un prix minimal aussi.

Destruction de la roche et la vitesse d'avancement dépendent essentiellement du type d'outil choisi et des paramètres de forage qui lui sont appliqués, donc Il est nécessaire de faire un choix judicieux des outils pour optimiser la vitesse d'avancement.

Les modèles établis permettent de calculer la vitesse d'avancement pour valeurs des paramètres mécanique de forage (WOB, RPM) pour n'importe quel puits dans La région de Rhourde Nous. On avait appliqué une méthode statistique afin de choisir le modèle le plus adapté pour l'outil parmi 2 modèles définissant le processus d'avancement.

Finalement, on peut considérer ces étapes d'optimisation des paramètres pour chaque méthode présentée dans cette étude comme une procédure générale, et afin d'améliorer les résultats obtenus, on doit simplement utiliser les modèles les plus adaptés aux problèmes posés.

1.Présentation de la région de Rhourde Nouss et l'implantation du puits HAZ106

1.1 Situation géographique :

La région de Rhourde Nouss fait partie de la Willaya d'ILLIZI :

Et se positionne entre :

29°16' et 30° parallèles.

06°24' et 07° méridien.

- Elle est située à 350 km au Sud/Sud-est de OUARGLA, à 1200 km au Sud/Sud-est
- d'ALGER et à 270 km au Sud/Sud-est de HASSI MESSAOUD. Elle est reliée à la route nationale N3 (OUARGLA-ILLIZI) par une bretelle de 30km goudronnée.
- L'altitude moyenne est située à 275m par rapport au niveau de la mer.
- Son climat est désertique (sec avec un très faible taux d'humidité).
- La température maximale est de 50°C à l'ombre en été.
- La température minimale est de 2 à 3°C.
- Elle enregistre une pluviométrie très faible (2 à 4 mm/an).

Les vents dominants sont de direction Nord/Est avec une vitesse maximale de 70 à 80 km/h pendant la période de vents de sable (Février/Mars) [19].

1.2 Limitation géologiques :

La région de RHOURE NOUSS est située sur la bordure sud du bassin triasique. Elle est limitée :

A l'ouest, par la mole d'Amguid –El Biod au niveau de la faille de Ramade. Cette mole présente une vaste unité structurale subméridienne s'étendant sur 600Km allant d'Amguid au sud à RHOURE EL BAGUEL au Nord.

Au nord-est, par le bassin de Ghadamès vers lequel s'annoient les axes SO-NE des structures de RHOURE HAMRA et de RHOURE CHOUFF.

Au sud-est par la partie occidentale de mole d'Ahara [19].

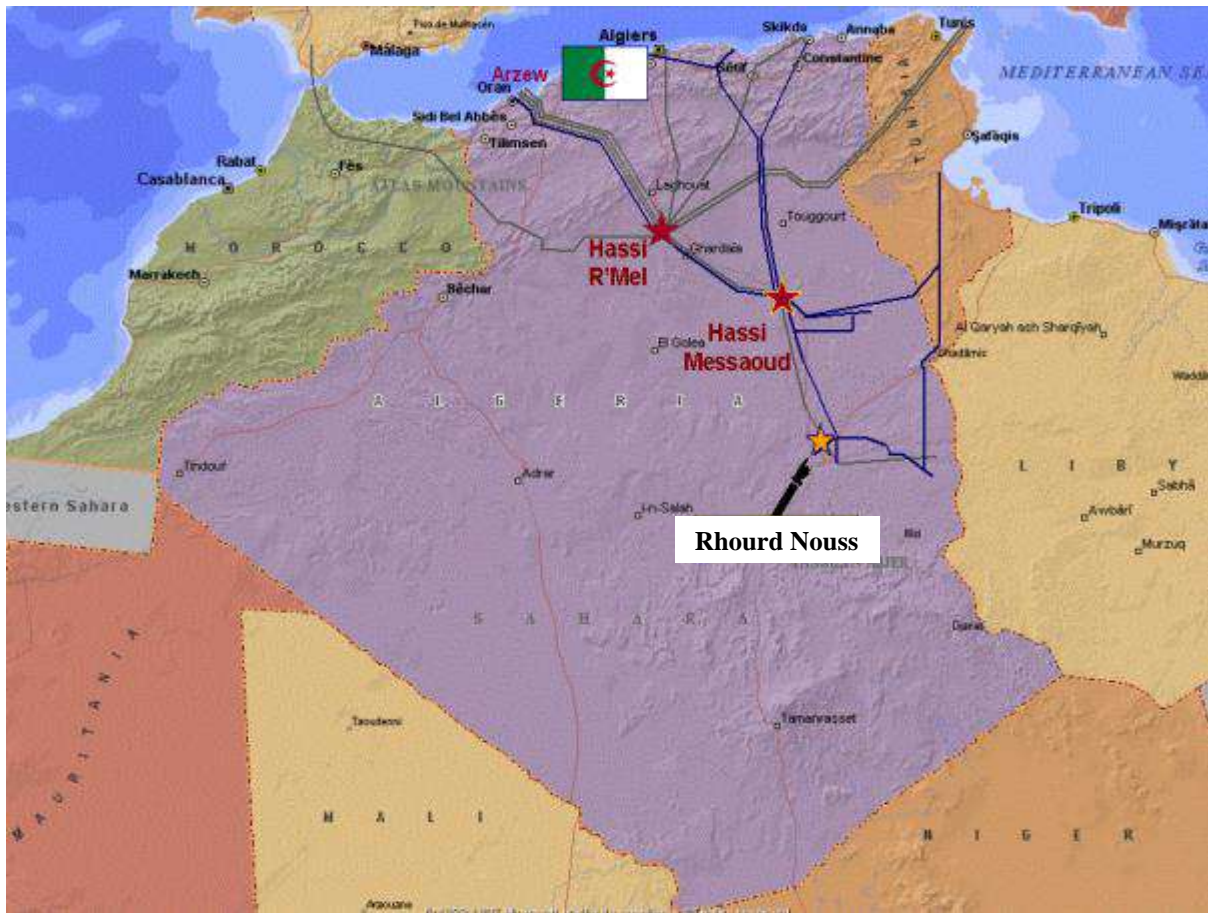


Figure 1 : Situation géographique de la région de Rhourde Nours.

1.3 Location du puits HAZ106 :

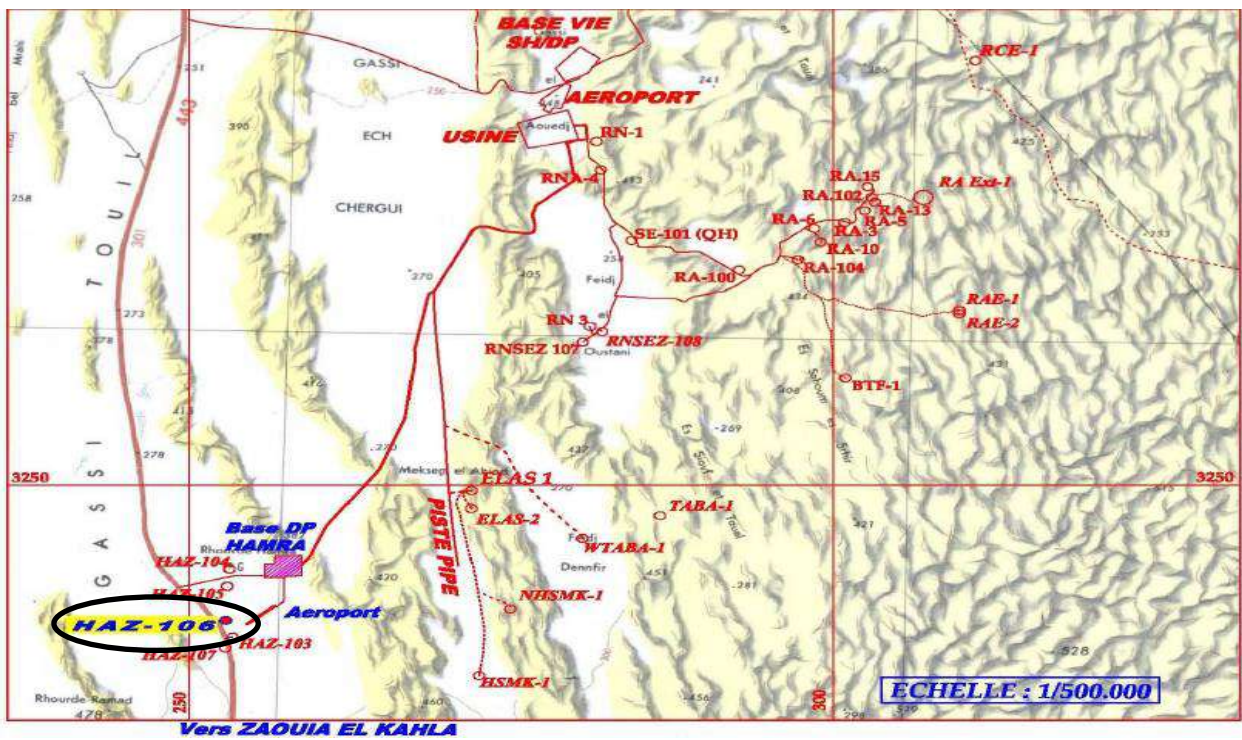


Figure 2 : Location du puits HAZ106 [19]

ANNEXE

1.4 Pronostique de puits :

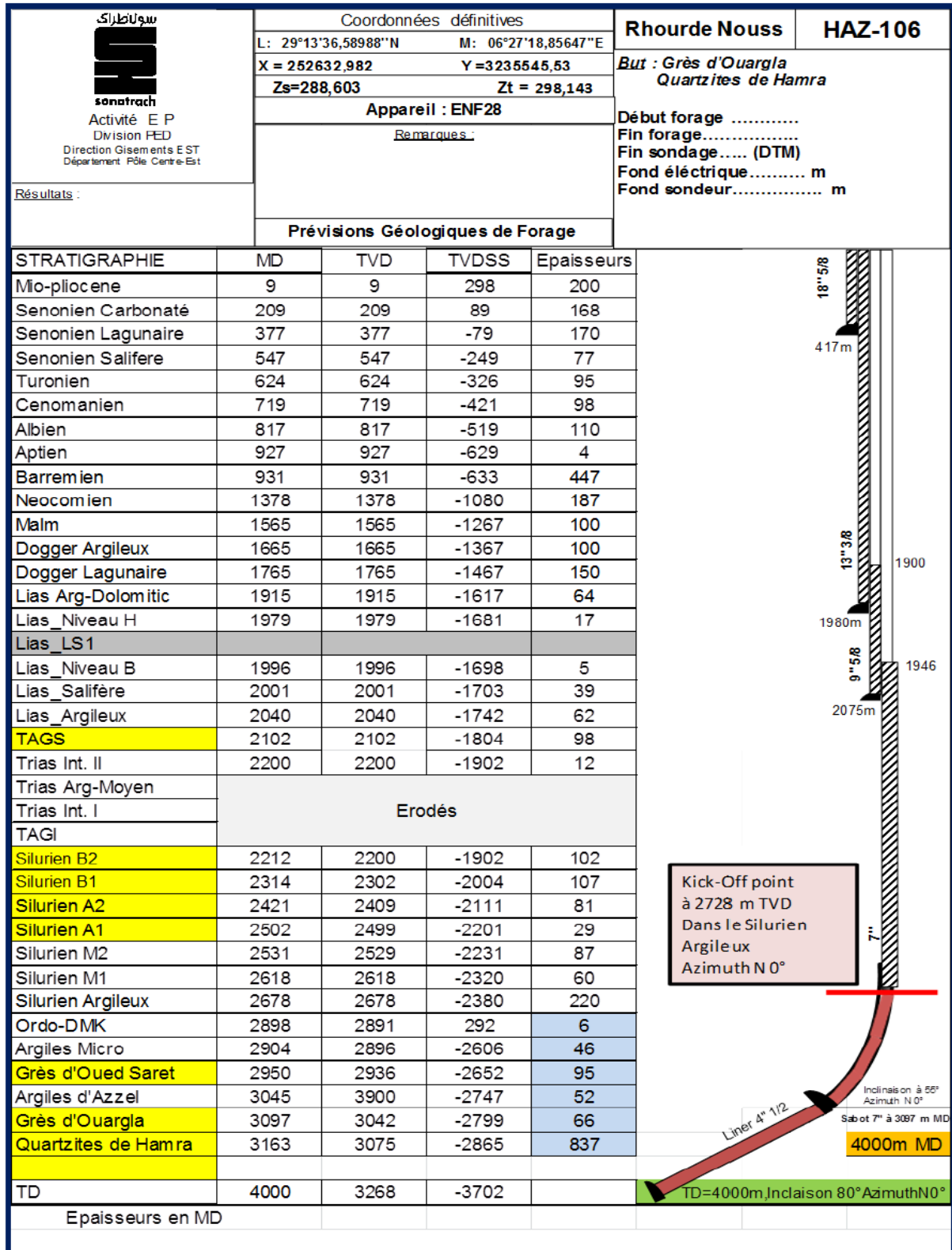


Figure 3 : Stratigraphie et Top sabots [19]

Références

- [1] SOMAA Ismail et HAFSI Takieddine “Appareil de Forage, Etude et Dimensionnement Cas: Champs Hassi Messaoud”, Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011/2012.
- [2] CHERIFI Mahfoudh “Etude et Maintenance de Treuil de Forage OIL WELL 840E ”, Mémoire De Master, Université Hassiba Benboualide Chlef, 2012.
- [3] ZEHRI Ilyes et SLIMANI Samir “Optimisation des Paramètres de Forage dans les Réservoirs cambro- ordoviciens (périmètre Tidikelt la région d’In-Salah)”, Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011/2012.
- [4] SLIMANI-A et DADOU-M, SONATRACH-Division forage « Module M1 »,2004.
- [5] Jean-Paul Nguyen. “Techniques D'exploitation Pétrolière le Forage” .1993.
- [6] SOUSSA Abdelkrim “Etude des Instabilités dans une Tige de Forage Pétrolier Influence du Frottement Visqueux”, Mémoire de magister, Université El-Hadj–Lakhdar – Batna, 2011/2012.
- [7] ALILICHE Tarik et KIRAT Abdelaali “Choix d’un Train de Tige pour Réaliser un Forage Horizontal à HMD Etude d’un cas Puits : OMJZ 201”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [8] NEGADI Ali “La Maintenance des Equipements de Forage (cas TP127 Hassi Messaoud)”, Mémoire de master, Université Abdou Belkaid Tlemcen, 2013/2014.
- [9] TAIBAT Belkassem et NEGHMOUCHE Ali ourabi, “Etude Comparative de la Fiabilité du Top drive à Courant Continu et à Courant Alternatif”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015/2014.
- [10] NACEF Ali, “Modélisation de la Vitesse D’avancement de L’outil de Forage ” Mémoire De Magister, Université M’hamed Bougara- Boumerdes, 2014/2015.
- [11] BAALI Ahmed et FEKHAR Mustafa, “Influence des Paramètres de Forage sur le Choix d’un Outil Durant la Phase 6” du Drain Horizontal dans la Région de Hassi Messaoud ”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [12] HOUILI Mokhtar et HAMOUDI Mohammed, “Etude de Performance des Outils de Forage dans le Drain Horizontal de la Phase 6” : Champs de HMD ”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013/2014.

- [13] AMRAT Oussama et GHERIB Samir, “Etude de la performance des outils PDC hybrides de la phase 8”1/2 dans le champ Gassi Touil ”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015/2016.
- [14] DJAMIL Rezki, “Système Intelligent D’aide à la Décision pour le Pilotage d’un Processus de Forage Pétrolier”, Mémoire de Magister, Université BATNA 2, 2015/2016.
- [15] Ngoc Ha DAO, “Modélisation de la Fatigue des Systèmes de Forage de Puits à Trajectoire Complexe”, Thèse de doctorat, ParisTech –Institut des Sciences et Technologies-, 2014.
- [16] DJELAILA Brahim Ali DADI SIDI BOUAZA Kheireddine, “Optimisation Des Paramètres Mécaniques du Forage Horizontal”, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [17] G. DREYFUS, “Les Réseaux de Neurones”, École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, 1998.
- [18] La Recherche Electronique :
https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/fr/SSLVMB_23.0.0/spss/regression/idh_nlr.html
- [19] Sonatrach, Exploration, Production, Division Forage, Opérations Forage- Drilling Program, Ref: SH/E-P/FOR/DDO/PFC/17.

RESUME

L'optimisation de forage a pour but de minimiser le coût global du forage d'un puits pétrolier. La réduction des coûts de forage peut être réalisée en réduisant au minimum le temps de rotation qui représente une partie importante de la durée des opérations de forage. Nous présentons dans notre travail une approche d'optimisation des paramètres mécaniques de forage. Les modèles d'optimisation proposés se basent sur des modèles de régression, permettant la correction des paramètres en fonction de la nature des formations traversées afin de maximiser la vitesse d'avancement.

Mots clés : Optimisation, vitesse d'avancement de forage, poids sur l'outil, vitesse de rotation, modèle de régression.

ABSTRACT

Drilling optimization aims to minimize the drilling cost; reducing drilling cost can be achieved by minimizing the rotating time which represents an important part of the drilling operations time. We present in our work an optimization approach of the drilling mechanical parameters. The optimization models suggested based on regression models, allowing adjustment of the drilling parameters depending on the nature of the formations penetrated in order to maximize the rate of penetration.

Keywords : Optimization, rate of penetration, weight on bit, revolutions per minute, regression model.

المخلص

يهدف تحسين عملية الحفر لتقليل تكلفة الحفر، ويمكن تحقيق خفض تكلفة الحفر عن طريق التقليل من وقت دوران رأس الحفر الذي يمثل جزءا هاما من وقت العمليات الإجمالي. نقدم في عملنا هذا تقاربا أمثليا لمعلمات الحفر الميكانيكية،. النماذج المطروحة تستخدم نهجا تقاربيا، إستنادا إلى نماذج إنحدار سامحة بذلك لتصحيح المعلمات وفقا لطبيعة الصخور المخترقة من أجل تحقيق أقصى سرعة تغلغل ممكنة.

الكلمات المفتاحية: استمثال، سرعة الحفر، الوزن على رأس الحفر، سرعة الدوران، نموذج انحدار.