

Université KASDI Merbah Ouargla



Faculté des hydrocarbures énergies renouvelables et science de la terre et de l'univers

Département de forage et MCP

MEMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Option: Forage

-THEME-

ETUDE DE PERFORMANCES D'UN OUTIL IMP MUNI D'UN MOTEUR ET SANS MOTEUR DANS LES QUARTZITES DE HAMRA REGION DE AIN SALAH

Présenté Par:

- ABERKANE Mohamed Lamine**
- KHADARI Mouad**
- GHENDIR Ahmed**

Soutenance du : 28/05/2014 devant la commission d'examen

Jury:

Président:	YACINE ABDSLEME	Univ. Ouargla
Rapporteur:	MEHDI MOHAMED KADRI	Univ. Ouargla
Examineurs:	ZIARI SABRE	Univ. Ouargla

Sommaire

INTRODUCTION	01
Chapitre I : LES ÉQUIPEMENTS DU FOND	
1. LA GARNITURE	02
1.1 Ses principaux rôles	02
1.2 Composition de la garniture de forage	02
1.2.1 LES TIGES DE FORAGE	02
1.2.2 LES TIGES LOURDES OU HEAVY WEIGHT : DPHW	03
1.2.3 LES MASSES-TIGES OU DRILL COLLARS	03
1.2.4 La Tige d'entraînement ou Kelly	04
1.2.5 LES COULISSES DE FORAGE (DRILLING JARS)	04
1.2.5.1 Principe	04
1.2.5.2 Utilisation	05
1.2.5.3 Positionnement	05
1.2.5.4 Différents types	06
1.1.2.6.LES STABILISATEURS	06
2. LES OUTILS DE FORAGE	08
2.1 Les outils à molettes	08
2.1.1 Mode de travail d'un tricône	08
2.1.2 Outils pour terrains tendres	08
2.1.3 Outils pour terrains durs	08
2.1.4 Outils pour terrains durs	08
2.2 Les outils à éléments de coupe fixes	09
2.2.1 Types de diamant utilisés	10
2.2.2 Diamants naturels industriels	10
2.2.3 Diamants synthétiques	10
2.2.4 Diamants naturels	11
2.2.5 Amélioration de la stabilité de l'outil	12
2.3 L'usure des outils	14

Chapitre II : LES MOTEURS DE FOND

1. LES TURBINES	16
2. Composition	16
2.1 Section motrice	16
2.2 Etage de turbine	17
2.2.1 Stator	17
a) Puissance	21
b) Vitesse de rotation	21
c) Couple moteur	22
d) Rendement	22
e) Chute de pression	22
3. Les PDM (Positive Displacement Motors)	23
3.1 Composition	23
3.1.1 Dump valve	23
3.2 Section motrice	24
3.3 Section d'appui	25
3.4 Transmission	26
a) Moteurs low speed	27
b) Moteurs medium speed	28
c) Moteurs high speed	28
3.5 Caractéristiques des PDM	28
a) Chute de pression	28
b) Couple et vitesse de rotation	29
c) Puissance délivrée par le PDM	29
d) Rendement du moteur	31

Chapitre III : Les paramètres de forage

1. Les paramètres mécaniques	32
1.1 Poids sur l'outil	32
1.2 Vitesse de rotation	33
1.3 Torque	34
2. Paramètres hydrauliques	35

2.1 Débit (Flow)	35
2.1.1 Procédure pour le comptage de l'efficacité des pompes	36
2.1.2 Notion de pertes de charge	36
a) Pression hydrostatique	37
b) Pression exercée sur le fond d'un puits	37
c) Pression de pore et de fracturation (Ppore) / (Pfrac)	37
d) La dépression et la surpression	37
e) Densité équivalente	37
f) Dépression et surpression	38

Chapitre IV : Etude des paramètres de forage

1. Pour THN 1	39
a) Flow	39
b) RPM	40
c) WOB	40
d) SPP	41
e) TORQUE	42
2. Pour THW1	42
a) Flow	42
b) RPM	43
c) WOB	43
d) SPP	44
e) Torque	45

CONCLUSION

Recommandations

Bibliographie

Liste des figures :

Chapitre I :

Fig. I.1 : Les tiges de forage	02
Fig. I.2 : DPHW	03
Fig. I.3 : Les masses-tiges	03
Fig. I.4 : hexagonale	04
Fig. I.5 : carrée.....	04
Fig. I.6 : Les lames de stabilisateurs.....	07
Fig. I.7 Outil Tricône.....	09
Fig. I.8 : Outil PDC.....	11
Fig. I.9 : Mode de travail des outils PDC.....	11
Fig. I.10 : outils diamant naturel.....	12
Fig. I.11 . Outil imprégnés.....	13

Chapitre II :

Fig. II.1 : Section motrice d'une turbine.....	17
Fig. II.2 .Un étage de turbine.....	18
Fig. II.3 : Courbe de caractéristiques mécaniques des turbines de forage.....	20
Fig. II.4 : Variation de la puissance en fonction des débits.....	21
Fig. II.5 : Dump valve.....	23
Fig. II.6 : Caractéristique de la section motrice.....	25
Fig. II.7 : La longueur d'un étage de rotor.....	25
Fig. II.8 : Flux Rod.....	27
Fig. II.9 : Universel joint.....	27
Fig. II.10 : Courbe de pression d'un PDM.....	30

Chapitre III :

Fig. III.1 . Poids sur l'outil.....	33
Fig. III.2 .Capteur de fréquence SPM RPM.....	33
Fig. III.3 . Placement de capteur a la table de rotation.....	34
Fig. III.4 : Capteur de fréquence torque.....	35
Fig. III.5 : placement de capteur dans les pompes.....	36

Chapitre IV :

Fig. IV.1- La courbe de variation de ROP en fonction du FLOW(THN1).....39

Fig. IV.2- La courbe de variation de ROP en fonction du RPM(THN1).....40

Fig. IV.3- La courbe de variation de ROP en fonction du WOB (THN1).....40

Fig. IV.4- La courbe de variation de ROP en fonction du SPP (THN1).....41

Fig. IV.5- La courbe de variation de ROP en fonction du Torque(THN1).....42

Fig. IV.6- La courbe de variation de ROP en fonction du FLOW(THW1).....42

Fig. IV.7- La courbe de variation de ROP en fonction du RPM (THW1).....43

Fig. V.8- La courbe de variation de ROP en fonction du WOB(THW1).....43

Fig. V.9- La courbe de variation de ROP en fonction du SPP(THW1).....44

Fig. IV.10- La courbe de variation de ROP en fonction du Torque(THW1).....45

Fig. IV.11. La histogramme des valeurs de ROP d'une THN-1 et THW-1.....45

INTRODUCTION

Les paramètres de forage jouent un rôle primordial dans l'avancement dans les terrains durs.

Les quartzites de Hamra sont des roches compactes que les foreurs prennent beaucoup de temps pour les traverser.

Dans notre étude on a choisi deux puits. Le premier a été foré avec un moteur de fond et le second avec un outil.

Pour une meilleure corrélation on a établi la courbe de variation des paramètres en fonction du ROP dans les deux cas pour avoir une idée sur l'état d'avancement du forage .

Et à partir des histogrammes de ROP corrélatifs entre les deux systèmes, on a pu déterminer le choix le plus rentable.

LES ÉQUIPEMENTS DU FOND

1. LA GARNITURE

La garniture de forage (Drill string) est également appelée "train de tiges ou train de sonde.

Elle assure la liaison entre l'outil de forage et la surface.

1.1 Rôles

- Permettre la rotation de l'outil pour détruire la roche
- Mettre du poids sur l'outil
- Permettre la circulation du fluide de forage.

1.2 La garniture de forage est composée de

- Tige d'entraînement ou Kelly
- Tiges de forage ou Drill Pipe
- Tiges Lourdes au Heavy Wight Drill Pipe
- Masses-Tiges ou Drill Colla

Accessoires tels que : Réductions, Aléseurs, Stabilisateurs les coulisse de forage (drilling jars)

La partie supérieure de la garniture travaille en traction tandis que la partie inférieure travaille en compression pour appliquer le poids sur l'outil.

Les tiges lourdes, les masses-tiges, d'autres accessoires et le trépan constituent l'assemblage de fond communément appelé BHA (Botton Hole Assembly).

1.2.1 LES TIGES DE FORAGE



Fig. I.1 : Les tiges de forage

Description

Ce sont des tubes métalliques fabriqués selon les normes API. Elles sont constituées d'un corps généralement uniforme de 2 Tools-Joint de part et d'autre (1 Tool-Joint mâle ou PIN et 1 Tool-Joint femelle ou BOX). Ces Tool-Joints sont filetés ou soudés de manière à ce que les tiges soient vissées les unes sur les autres pour former un train de tiges.

La norme API détermine le grade d'acier, le type de filetage, le diamètre et la résistance élastique de l'acier

1.2.2. LES TIGES LOURDES OU HEAVY WEIGHT : DPHW

Fig. I .2 : DPHW

Description

Les DPHW sont plus épaisses que les tiges simples. Elles se distinguent par :

- Tools Joint plus long : mâle 68.6 cm ; femelle 53.3 cm
- Un Upset central ou " coussin d'usure " de 61 cm pour les tiges de range II
- 2 Upsets centraux de 86.4 cm pour les tiges de range III

Ce sont des tiges conçues à travailler en compression. Elles sont placées juste au dessus des Drill Collars. Ce sont des tiges de transition. Elles assurent une meilleure continuité mécanique entre les tiges et les Drill Collars afin de diminuer les concentrations de contraintes entraînant la rupture du train de sonde. Celles-ci sont dues aux efforts de flexion alternée et des vibrations transversales au cours de la rotation de la garniture.

1.2.3 LES MASSES-TIGES OU DRILL COLLARS

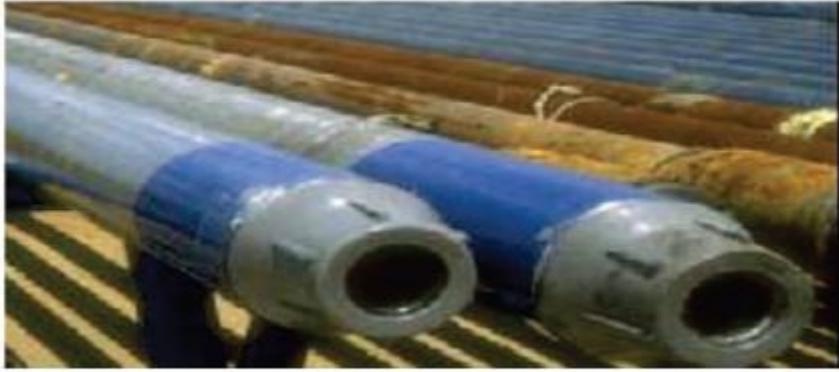


Fig. I.3 : Les masses-tiges

Ce sont des tubes d'aciers très épais, beaucoup plus lourds que les tiges de forage. Elles sont destinées pour appliquer du poids sur l'outil, elles travaillent en compression

Les Drill Collars normalisés par l'API sont désignés par les lettres NC suivies de 4 chiffres.

1.2.4 Tige d'entraînement ou Kelly

De forme hexagonale elle assure la liaison entre la table de rotation et la garniture de forage. Elle supporte également la charge totale de la garniture.

Ces principales fonctions sont :

- Relier la tête d'injection et la dernière tige de forage
- Transmettre le mouvement de rotation au train de tiges
- Permettre la circulation du fluide de forage de la tête d'injection qui ne bouge pas à l'intérieur du train de tige en rotation

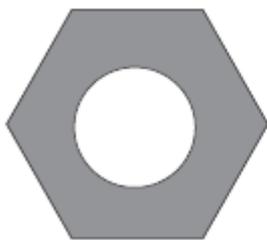


Fig. I.4 : hexagonale



Fig. I.5 : carrée

1.2.5-LES COULISSES DE FORAGE (DRILLING JARS)

1.2.5.1 PRINCIPE

Une coulisse de forage est un outil de fond intégré dans la garniture chaque fois que des problèmes de coincement peuvent se manifester.

Elle permet de battre soit vers le haut, soit vers le bas. Les systèmes de battage peuvent être soit mécaniques, soit hydrauliques.

- **Battage vers le haut**

Le déclenchement se fait en exerçant une traction vers le haut. A un moment donné, soit lorsque la traction atteint une certaine limite (cas des coulisses mécaniques), soit après un certain temps de temporisation (cas des coulisses hydrauliques), le joint de friction de la coulisse va se libérer rapidement, occasionnant un choc violent du marteau sur l'enclume, se répercutant sur la garniture de forage.

- **Battage vers le bas**

Il existe deux types de coulisses pour le battage vers le bas :

Le système où les tiges sont mises en compression suivant le même-principe que pour le battage vers le haut : soit à un poids donné, soit après un certain laps de temps, le mécanisme de la coulisse se libère rapidement en délivrant un violent choc vers le bas.

- Le système "Bumper Sub" où le choc n'est obtenu que par la chute libre du poids selon la course de la coulisse.

L'intensité des coups dépend de nombreux facteurs :

- la force initiale de traction ou compression
- la longueur de masse-tiges ou tiges lourdes au dessus de la coulisse
- la position de la coulisse dans le train de tiges
- la longueur de la course de la coulisse.

1.2.5.2 UTILISATION

L'emploi d'une coulisse de forage est systématiquement recommandé dans :

- tous les puits d'exploration et même en forage off shore ex : mer du nord
- tous les puits de forage dirigé
- les puits où il y a un risque de coincement en développement.

1.2.5.3 POSITIONNEMENT

- Les coulisses, suivant leur position dans le train de tiges, peuvent être descendues soit en tension soit en compression (Voir recommandations du constructeur).
- Certains outils ne peuvent être utilisés qu'en tension, ce qui oblige à les placer très haut dans le train de tiges, au détriment de l'efficacité de battage et avec des risques de coincement accrus dus à la plus grande longueur des masse-tiges.
- Du fait que les coulisses ne peuvent pratiquement pas résoudre les coincements par pression différentielle, mais par contre sont très efficaces en cas de coincement à l'outil ou aux stabilisateurs, la meilleure position de la coulisse est en compression à une masse-tige au dessus du dernier stabilisateur, surmontée d'autres masse-tiges et tiges lourdes.
- Dans les cas de puits difficiles risque de coincement à l'outil et en haut de l'assemblage de fond on peut être amené à descendre une deuxième coulisse en haut des masse-tiges.

Pour éviter un double battage on règle le déclenchement à des tensions différentes, si les modèles utilisés le permettent.

Les positions à éviter sont :

- ✓ Entre masse-tiges et tiges lourdes ou tiges, car l'effet de battage est considérablement amorti.
- ✓ dans la zone du point neutre, ce qui entraînerait sa destruction rapide.

1.2.5.4 DIFFERENTS TYPES

De nombreuses coulisses sont disponibles sur le marché.

Parmi les coulisses de forage les plus utilisées on peut citer :

- Les coulisses mécaniques :
 - L'EARTHQUAKER
 - DAILEY
- pour les coulisses hydrauliques :
 - JARCO
 - MASON
 - BOWEN

1.2.6 Les stabilisateurs

Rôles

- L'utilisation des stabilisateurs nous permet de forer un puits à bon profil
- Diminuer la déviation et la surface de contact des masses tiges avec le terrain
- Eviter les coincements
- Appliquer le poids convenablement sur l'outil.

Les stabilisateurs sont installés soit directement au-dessus de l'outil de forage et sont alors appelés "near-bit" ou plus haut dans la BHA où ils sont appelés "string".

Différents types de stabilisateurs sont disponibles, variant essentiellement par la conception de leurs lames :

- lames soudées,
- lames intégrales,
- à chemise,
- à chemise non rotative.

Les lames sont : droites, spiralées à droite et spiralées à gauche.

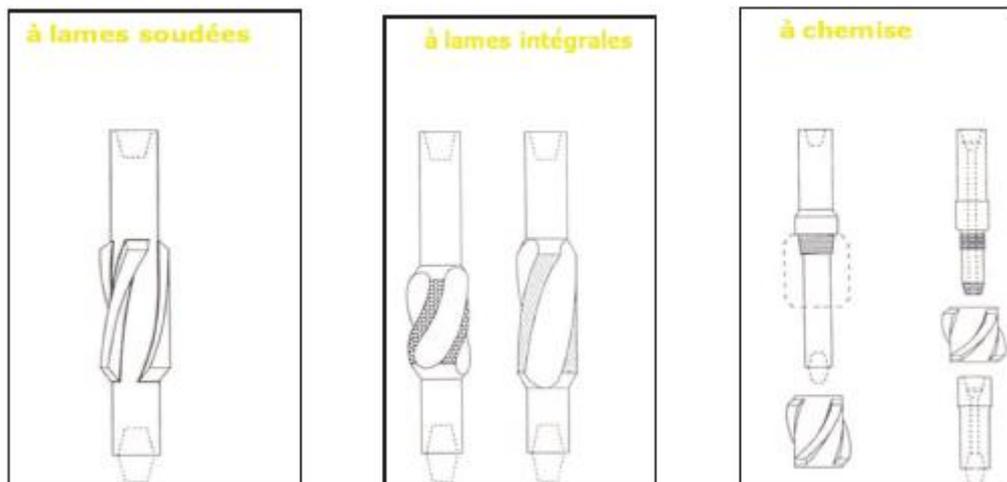


Fig. I.6 : Les lames de stabilisateurs

2. Les Outils de forage

Une étude comparative de la performance des outils et des paramètres d'utilisation des outils (mécaniques : le type et la forme de l'outil, WOB, RPM ; et hydrauliques : le débit, la pression, la nature de fluide de forage) effectués au cours des premiers forages permettra d'effectuer les autres forages de développement dans les meilleures conditions de rapidité et d'économie. Le meilleur outil étant celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré (P_m) le plus bas dans des bonnes conditions techniques et de sécurité.

On utilise la formule suivante :

$$P_m = [P_o + P_h \times (T_r + T_m)] / m$$

Avec :

P_o : prix de l'outil.

T_m : temps de manœuvre.

T_r : temps de rotation.

m : nombre de mètres forés.

P_h : le prix de location de l'appareil.

2.1 Les outils à molettes

2.1.1 Mode de travail d'un tricône

L'efficacité d'un outil à molettes dépend de sa capacité à broyer la roche et à évacuer les morceaux. La géométrie des outils pour terrains tendres et terrains durs est différente caractérisé par l'Offset qui est le décalage des axes des molettes par rapport au centre de l'outil.

2.1.2 Outils pour les terrains tendres

Les dents de l'outil sont longues et espacées elles travaillent par raclage, c'est l'effet du rippage. Les dents des trois tricônes sont intercalés ce qui permet un bon nettoyage de l'outil. L'offset est très important. La vitesse de rotation est élevée

2.1.3 Outils pour les terrains durs

Les dents sont courtes et rapprochées. Sous l'effet de la compression la dent pénètre et fait éclater la formation. c'est l'effet du broyage. La pression exercée par chaque dent sur le front de taille induit une fracture. L'offset est très réduit



Fig. I.7 Outil Tricône

2.1.4 Outils pour terrains très durs

Dans certains cas extrêmement durs, il est impossible d'y faire pénétrer les dents d'un outil, du fait de la grande résistance de la roche, qui provoque des ruptures de dents, on prévoit donc dans ce cas des pastilles peu espacées de carbure de tungstène emmanchées à la presse dans des alvéoles cylindriques ménagées dans la molette.

Ce type d'outil travaille par percussion et surtout écrasement qui fracture la roche sans qu'il y ait pénétration importante.

La vitesse de rotation est lente.

2.2 Les Outils à éléments de coupe fixes

Le diamant a un coefficient de dilatation très faible. Ce faible pouvoir de dilatation pose des problèmes lorsqu'il est associé à d'autres matériaux (voir stabilité thermique des PDC). Son point de fusion est très élevé (3650°), mais il se transforme superficiellement en graphite vers 1450°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 15 pierres au carat.

2.2.1 Types des diamants utilisés

Deux catégories de diamants sont utilisées par les fabricants d'outils : les diamants naturels et les diamants synthétiques.

2.2.2 Les diamants naturels industriels

La structure cristalline du diamant est sa caractéristique la plus importante, puisque c'est cette propriété qui est responsable de sa dureté, de sa forme, de son clivage et autres propriétés. Les trois structures cristallines majeures pour les diamants industriels sont :

- Le cube (6 faces carrées, chaque face croise un axe cristallographique et est parallèle aux deux autres).
- L'octaèdre (8 faces triangulaires équilatérales).
- Le dodécaèdre (12 faces en forme de losange).

2.2.3 Diamants synthétiques

Actuellement, deux produits polycristallins sont utilisés :

- **Les PDC (poly cristalline Diamond Compact)**

Diamant synthétique basse température. Le PDC dont le plus connu est le Stratapax de General Electric, se présente en général sous la forme d'une fine lamelle de diamant synthétique (épaisseur : 0,5 mm) avec des impuretés de cobalt, placée sur un substrat de carbure de tungstène. La couche de diamant est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires (structure comparable à celle du carbonado). Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux. Cette structure polycristalline confère au diamant synthétique une résistance à la compression (pas de plans de clivage) et à l'usure plus élevée que celle du diamant naturel de qualité standard. La couche de diamant s'use par micro-écaillage et par graphitisation, causés par les températures très élevées qui se développent au contact avec la formation forcée, ce qui entraîne un auto-affûtage du PDC qui maintient l'efficacité de l'arête de coupe. Les performances du taillant seront donc peu ou pas diminuées au cours de la vie de l'outil, tant que la surface de contact avec



Mode de travail des outils PDC

Fig. I.8 : Outil PDC



Fig. I.10 : outil diamant naturel

2.2.4 Les outils diamant naturel

Un autre type de fabrication existe également : **les diamants imprégnés**. Pour l'imprégnation, on utilise des diamants de très petite taille (150 pierres par carat, ce qui correspond à un diamètre de l'ordre de 0.8 mm).

- L'imprégnation se fait :

- Soit dans la masse de la matrice sur une épaisseur de l'ordre du cm. Au fond du moule, on place un mélange de diamants et de poudre servant à la fabrication de la matrice et l'ensemble est passé au four.
- Soit l'on fabrique des segments de carbure de tungstène imprégnés de diamants. Ces segments sont soit brasés, soit emmanchés en force dans le corps de l'outil.

Ces outils sont utilisés pour forer des formations très dures et abrasives ou pour augmenter la durée de vie de l'outil en tant qu'élément de renfort derrière les PDC (outils hybrides). Au fur et à mesure de l'usure de la matrice, les diamants exposés se déchaussent et de nouveaux taillants apparaissent.



Fig. I.11. Outil imprégnés

Différents types

Comme pour les outils à molettes il existe de nombreux types d'outils. Il faut se rappeler qu'un outil est défini par :

- Le nombre de « carats » que contient l'outil,
- Le nombre de « pierres au carat » qui définit la taille des pierres.
- Grosses pierres : 1 à 4 au carat.

- Petites pierres : plus de 6 au carat.
- La disposition et l'exposition des pierres.

Il est évident que les outils pour :

- Terrains tendres auront :
- Des grosses pierres
- Une exposition plus grande (jusqu'à 45% de la pierre).
- Terrains durs
- Petites pierres
- Très faible exposition

2.2.5 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. Deux types distincts de vibration peuvent être considérés :

- Vibration latérale.
- Vibration axiale.

Vibration latérale

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 cote opposée du centre de rotation. Les dommages 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.

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 du 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 Motors). 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 « Tools 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 cet 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.

Amélioration de la protection du diamètre

Les imprégnés produisent un moyen de protection supplémentaire des surfaces critiques du diamètre de l'outil. Les applications de forage directionnel au moteur « stèreable » 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.

2.3 L'USURE DES OUTILS

La détermination de l'usure des outils est une opération difficile, elle peut varier d'une

Personne à l'autre. Cependant, une détermination précise et objective est très importante car elle servira à :

- Sélectionner l'outil le mieux adapté au type de formation à forer.
- Optimiser les conditions de forage (paramètres de forage, garniture, reprise du fond, temps de rotation, etc.).
- Obtenir le prix de revient du mètre foré le plus faible.
- La détermination de l'usure se fait en considérant : Les structures de coupe.
- Les roulements.
- Le diamètre de l'outil.
- Elle sera grandement facilitée en comparant l'outil à évaluer avec un outil neuf.

1. Les turbines

Le fluide de forage (boue, eau...) est pompé à haute viscosité à travers la section motrice qui à cause de l'angle des aubes de chaque rotor et stator (lesquelles forment un étage), entraîne la rotation du rotor et par conséquent l'arbre du moteur. L'énergie cinétique de l'écoulement de la boue de forage est ainsi convertie à travers le rotor et le stator (étage) en énergie mécanique de rotation.

2. Compositions

Une turbine est constituée d'une section motrice composée de plusieurs étages, une section d'appui et un arbre de transmission pour faire tourner l'outil. Un "étage" consiste en un rotor et stator de profil identique. Les stators sont stationnaires, fixés au corps de la turbine, et dévient le flux du fluide de forage sur les rotors qui sont fixés à l'arbre de transmission. Comme les rotors sont forcés à tourner, l'arbre de transmission est aussi forcé à tourner, entraînant la rotation de l'outil.

2.1. Section motrice

Une turbine de forage peut avoir une ou plusieurs sections motrices, selon les exigences de puissance. Les sections sont numérotées à partir de celle du haut, c'est-à-dire la section du dessus est désignée "TS1" et la section motrice intermédiaire "TS2." Toutes les sections sont composées d'un grand nombre d'étages de turbine, (typiquement 75 à 125 par section).

L'étage de turbine est la machine de base de conversion de l'énergie dans une Turbo foreuse. Ils sont empilés les uns sur les autres dans la section motrice. La somme des puissances délivrées par tous les étages qui composent une turbine est égale à la puissance de la turbine elle-même. La puissance fournie par la turbine peut donc être modifiée en changeant le nombre d'étages incorporés. Ceci signifie qu'en augmentant le nombre d'étage, la capacité de la turbine augmente. Cependant en réalité ceci augmentera l'énergie hydraulique exigée par la Turbo foreuse pour délivrer une telle puissance.

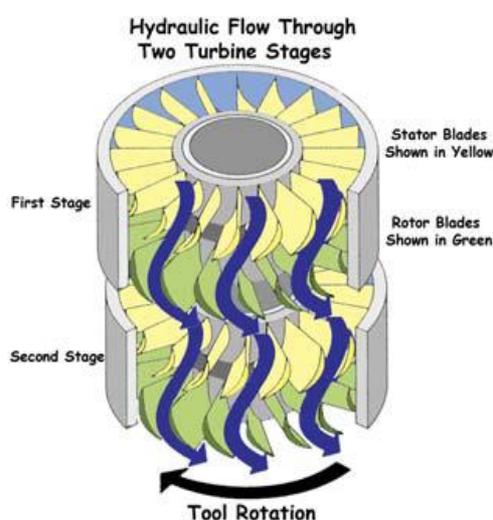


Fig. II.1 : Section motrice d'une turbine

2.2 Etage de turbine

Un étage de turbine est composé de :

➤ 2.2.1 Le stator

il est pressé de manière très serrée et colle parfaitement à l'intérieur du corps de la Turbine et ne peut pas tourner par rapport au corps. Ce serrage est très important. Si un stator pouvait tourner quand il reçoit un courant de fluide, il dissiperait l'énergie hydraulique contenu dans celui ci. Le serrage prévient aussi les fuites de fluide entre le stator et le corps de la turbine le long de la paroi. Les fuites dissipent l'énergie hydraulique lorsqu'elles sont possibles.

La fonction du stator est de collecter le flux semi - turbulent entrant à l'étage, de le réintroduire en courant laminaire, et diriger ce courant "amélioré" dans le rotor. Pour diriger le courant dans le rotor, la direction du courant est changée d'axial à semi-radial exigé par le rotor pour forcer la rotation. L'efficacité du stator est déterminée par:

- le degré auquel le courant axial est redirigé en un courant radial.
- L'ampleur à laquelle les conditions de l'écoulement laminaire sont rétablies dans le courant de décharge du rotor.
- L'importance des turbulences de sillage auto générées en aval des lames du rotor.

➤ 2.2.2 Le rotor

il est fixé à l'arbre de rotation de la turbine. Il reçoit le courant de fluide oblique (semi - radial) sortant du stator. Ce courant imprime un mouvement de rotation à l'arbre de la turbine. Les rotors (en dehors du rotor du dernier l'étage) déchargent le fluide directement à l'entrée du stator de l'étage suivant.

L'efficacité du rotor est dépendante de la forme des lames et du degré au quel le courant à travers le rotor est laminaire. Comme avec le stator, l'ampleur des turbulences de sillage auto générées est aussi importante. Des larges turbulences à la sortie du rotor entraineront d'importantes turbulences au rotor de l'étage suivant et par conséquent une baisse du rendement de l'étage en question.



Fig. II.2.Un étage de turbine

I.1.2.Caractéristiques mécaniques des turbines de forage

Turbo foreuse utilise des aubes de turbine axiales pour convertir l'énergie hydraulique (pression et de débit) en énergie mécanique qui peut être appliquée à l'outil sous la forme de couple.

Le couple développé par la Turbo foreuse atteint son maximum au calage. Le couple de calage, (T_0), donné en ft-lb, est égal à:

$$T_0 = \eta_m \frac{nw(1 - \varepsilon)Q^2}{g\lambda\pi b} (\tan\beta)$$

Avec:

η_m = rendement mécanique

n = Nombre d'étages de la turbine

w = la densité des fluides en (lb/ft³)

ε = coefficient de perte de fluide

Q = débit de fluide (ft³/sec)

g = accélération de la gravité (32.2ft/sec²)

λ = coefficient de contraction des fluides (dans le cas des fluides compressibles)

b = largeur de pale de rotor (m)

β = angle de sortie des pales de rotor et le stator

Le couple de la turbine peut être augmenté en augmentant le nombre d'étages de la turbine (n), en augmentant le débit de fluide (Q) ou en augmentant l'angle de sortie (β) des aubes de turbine.

Le couple, (T), diminue à mesure qu'augmente la vitesse de rotation et ceci d'après la relation suivante:

$$T = T_0 \frac{(1 - N)}{N_R}$$

Avec :

N est la vitesse de rotation,

N_R est la vitesse d'emballement.

La vitesse d'emballement est donnée par :

$$N_R = \frac{120(1 - \varepsilon)Q}{\lambda(\pi D)^2 b} (\tan \beta)$$

Comme le montre la courbe ci dessous, le couple diminue à partir d'un maximum de T_0 au calage à zéro à la vitesse d'emballement, (N_R). Les valeurs de couple total pour une turbo foreuse sont directement proportionnelles au nombre d'étages de la turbine.

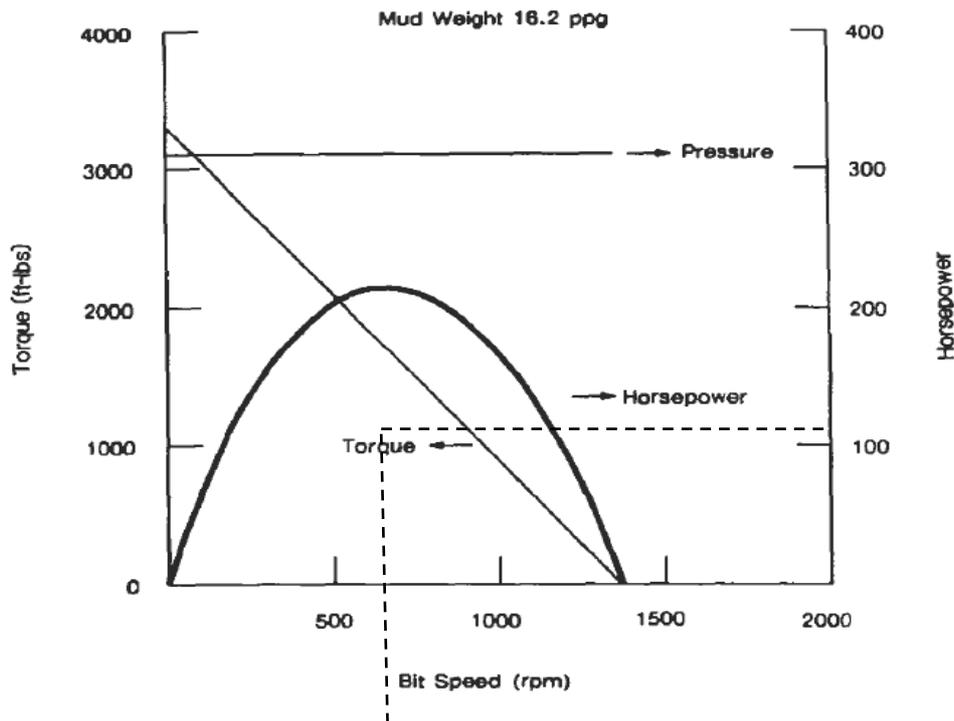


Fig. II.3 : Courbe de caractéristiques mécaniques des turbines de forage

Comme on peut le voir la turbine fournit le maximum de puissance à la moitié de sa vitesse d’emballement.

La vitesse d’emballement des turbo foreuses varie généralement entre 800 et 2000tr/mn. Ainsi, la puissance maximale est généralement livrée à des vitesses de 400 à 1000 tr / min. Ces grandes vitesses de rotation réduisent considérablement la durée de vie des outils à molette; des outils PDC et diamant sont généralement utilisés avec les turbines.

Après que les caractéristiques de fonctionnement de la turbine ont été déterminées pour un débit donné, (Q), et une densité de fluide hydraulique donnée (w). Les caractéristiques de fonctionnement pour les autres débits et densité de fluides peuvent être calculées comme suit:

$$F' = F\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \quad \dots (1) \quad \Delta P = \Delta P\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \quad \dots (2) \quad P = P\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^3 \quad \dots (3)$$

$$S' = S \left(\frac{Q'}{Q}\right) \quad \dots (4) \quad F' = F\lambda \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \quad \dots (5)$$

Avec:

λ = Rapport entre les densités de fluide (w'/w)

F' , F = poussées hydrauliques verticales sur les rotors de la turbine

$\Delta p'$, Δp = chute de pression à travers la turbine.

P' , P = puissance

S' , S = vitesse de rotation

T' , T = torque

a) Puissance

La puissance délivrée par une turbo foreuse est égale au couple de sortie multiplié par la vitesse de rotation. La puissance est donc proportionnelle au cube du débit.

En règle générale, le fonctionnement de turbo foreuse se déroule dans une gamme quasi-maximum de puissance. Les courbes suivantes représentent la puissance de sortie d'un type de Turbo drill. Les courbes telles que celles-ci sont disponibles pour chaque modèle de Turbo drill.

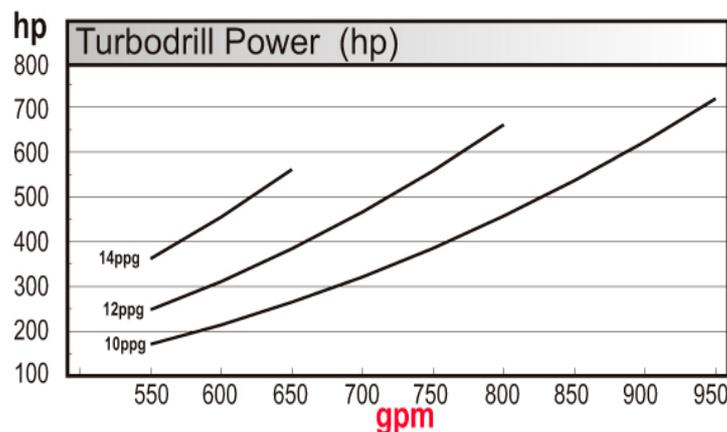


Fig. II.4 : Variation de la puissance en fonction des débits

b) Vitesse de rotation

La vitesse de rotation de la turbine est directement proportionnelle au débit de l'écoulement du fluide hydraulique. Dans la pratique, pour un débit donné, la vitesse réelle dépend du couple exercé par la formation sur l'outil. La vitesse varie donc entre la vitesse d'emballement en l'absence de couple appliqué par l'outil, (outil au dessus du fond), à zéro lorsque le couple appliqué par l'outil est égal ou supérieur au couple maximum (couple de calage).

c) Couple moteur

Turbo foreuse est un outil auto-régie qui a une caractéristique de travail préféré, qui dépend de la valeur du couple nécessaire à l'outil de forage. Le couple moteur est proportionnel au carré du débit de la boue, de la densité de la boue et au rayon des aubes de turbine. Le couple d'entraînement d'un outil particulier est directement proportionnel au nombre d'étages de la turbine. Pour un débit donné, le couple moteur varie de zéro avec l'outil au dessus du fond (vitesse d'emballement) à une valeur maximale lorsque la turbo foreuse est calée.

Au débit nominal, le couple de sortie est appelé «couple nominal ». Généralement, la gamme des couples de sortie d'un outil est calculée en fonction du couple nominal. Le couple nominal est d'environ la moitié de la valeur du couple de décrochage.

d) Le rendement

Le rendement d'une turbo foreuse est le rapport entre l'énergie mécanique produite, (puissance fournie par la turbine), et l'énergie hydraulique absorbée à partir des fluides hydrauliques.

Le type des lames utilisées dans une turbo foreuse donne un rendement théorique de 65% à 70%. Ces valeurs ne prennent pas les pertes par frottement dans les roulements en considération. En prenant en considération les pertes par frottement, l'efficacité est en général, d'environ 60% en fonction de divers facteurs tels que la vitesse de rotation de la garniture, le débit de boue, l'usure des roulements et les caractéristiques de la boue.

e) Chute de pression

La chute de pression hydraulique à travers une turbine est proportionnelle au carré du débit du fluide hydraulique à la sortie de l'outil, à la densité de la boue, et au nombre d'étage. En matière d'information la chute de pression est essentiellement indépendante de la vitesse de rotation de l'outil. Les courbes suivantes représentent la chute de pression à la sortie d'un modèle donné de Turbo drill. Les courbes telles que celles-ci sont fournies par les fabricants pour chaque configuration ou modèle de la gamme.

3. Les PDM (Positive Displacement Motors)

Les moteurs de fond appelés aussi moteurs à déplacement positif sont devenus les outils sans lesquels le forage dirigé n'aurait pu évoluer aussi rapidement dans ces dernières années. Ils dérivent de la "pompe à cavité progressive" inventée par le Français "Moineau" en 1934, inversée dans les années 50 pour en faire des moteurs, depuis en évolution continue.

3.1 Composition

Les moteurs modernes comportent plusieurs composants certains sont optionnelles et diffèrent d'une configuration à une autre et d'autres sont indispensables et communs à tous les PDM.

3.1.1. dump valve

Au-dessus de la section motrice peut se placer une vanne automatique à ressort de remplissage et de vidange pendant les manœuvres de descente ou remontée appelé dump valve ou by-pass. A $\pm 30\%$ du débit maximum recommandé la vanne est activée : la boue déplace une chemise vers le bas, isolant les orifices latéraux, et la circulation se fait à travers le moteur. Si on arrête la circulation, le ressort pousse la chemise vers le haut, ouvrant les orifices latéraux. Cette vanne est optionnelle sur beaucoup des PDMs : au lieu de faire partie intégrante du moteur, il s'agit alors d'un sub indépendant que l'on visse au top.

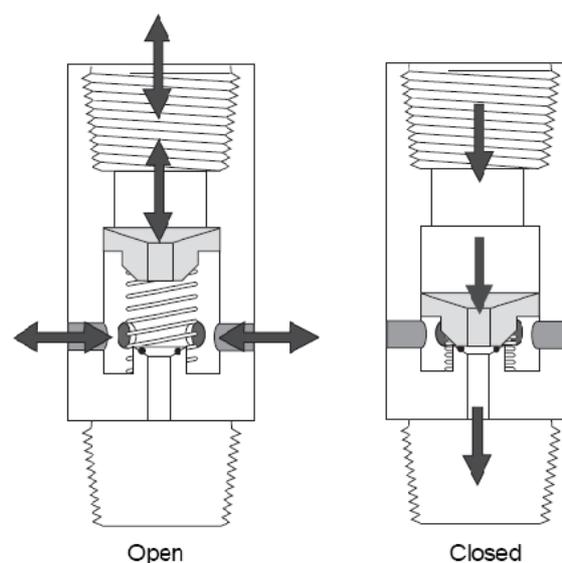


Fig. II.5 : Dump valve

3.2 Section motrice

La section motrice convertit l'énergie hydraulique du fluide de forage en puissance mécanique qui fait tourner le trépan. Ceci est accompli par l'application inverse du principe de la pompe Moineau. Le fluide de forage est pompé dans la section motrice du moteur à une pression qui provoque la rotation du rotor par rapport au stator. Cette force de rotation est ensuite transmise via un arbre de transmission et l'arbre d'entraînement à l'outil.

Le rotor est fabriqué d'acier inoxydable résistant à la corrosion. Il a généralement une mince couche de chrome pour réduire la friction et à l'abrasion. Des rotors de habillé d'une couche de carbure de tungstène sont également disponibles pour réduire l'usure due à l'abrasion et à la corrosion. Certains rotors sont percés afin de pouvoir accepter une duse de by-pass pour les applications à haut débit. Notez que ce n'est pas possible dans les très petites dimensions et les moteurs à applications spéciales.

Le stator est un tube d'acier avec une couche en élastomère (caoutchouc) moulée dans l'alésage du tube. Le revêtement est spécialement conçu pour résister à la détérioration provoquée par l'abrasion de particules contenues dans la boue.

Le rotor et le stator ont des profils similaires en hélice, mais le rotor a un lobe de moins que le stator. Dans une section motrice assemblée, le rotor et le stator créent une étanchéité continue à leurs points de contact, ce qui produit un certain nombre de cavités indépendantes. Lorsque le fluide (eau, boue ou de l'air) est forcé à travers ces cavités progressive, il oblige le rotor à tourner à l'intérieur du stator pour qu'il puisse passer à la cavité suivante. Ce mouvement du rotor dans le stator est appelé nutation. Pour chaque cycle de nutation fait par le rotor dans le stator, le rotor tourne la distance d'une largeur de lobe. Le rotor doit faire un cycle de nutation pour chaque lobe pour que l'outil accomplisse un tour complet. Un moteur avec une configuration a 7: 8 lobes (rotor / stator) et une vitesse à l'outil de 100 tr / min aura une vitesse de nutation de 700 cycles / min.

La section motrice d'un PDM est définie par le grand diamètre du stator (DH), le petit diamètre du stator (ID), l'excentricité du rotor (e), le nombre de lobes et la longueur de l'étage qui est définie comme un cycle plein de l'hélice du stator.

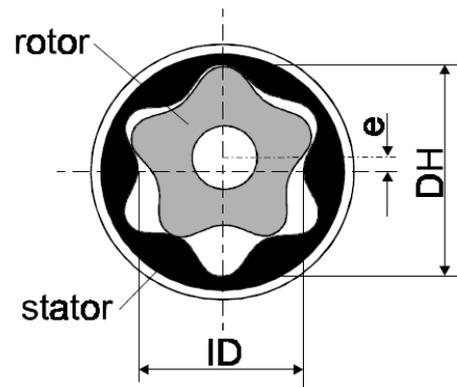


Fig. II.6 : Caractéristique de la section motrice

Généralement, plus le nombre de lobes est grand, plus le couple de sortie du moteur augmente et plus la vitesse ralentit. Étant donné que la puissance est définie comme la vitesse fois le couple, un plus grand nombre de lobes dans un moteur ne produit pas nécessairement plus de puissance, au contraire les moteurs avec un minimum de lobe ont un meilleur rendement car les jointures entre le rotor et le stator sont moins nombreuses.

Pour une longueur d'étage donnée on peut augmenter le nombre d'étage en augmentant la longueur de la section motrice. Ceci permettra d'augmenter le couple de calage et le rendement du moteur mais d'un autre côté on augmentera aussi la chute de pression et la longueur totale du moteur.

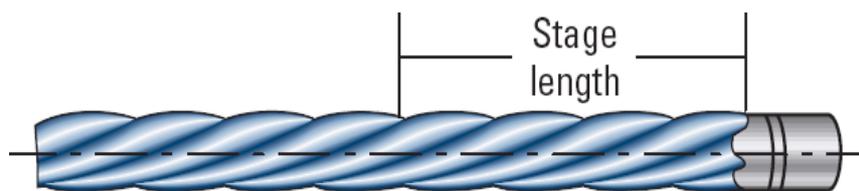


Fig. II.7 : La longueur d'un étage de rotor

3.3 Section d'appui

L'arbre d'entraînement est un tube creux construit en acier rigide. Il est soutenu dans la section d'appui par les paliers de butée radiale et axiale. La section d'appui transmet la poussée et la puissance de rotation à l'outil. La plupart du débit de boue est directement transmis à l'outil par le centre de l'arbre d'entraînement.

La section d'appui d'un PDM est principalement constituée des éléments suivant:

➤ Roulements axiaux off Bottom

Ils supportent la poussée hydraulique et le poids du rotor, bielle (joint universel), arbre moteur et outil de forage quand l'outil est suspendu et tourne librement hors du fond (off bottom). Ils sont normalement de type roulements à billes.

➤ Paliers de frictions radiaux:

Un manchon est utilisé pour les paliers de butée radiale supérieurs et inférieurs. Ils procurent le support radial à l'arbre moteur. Ils régulent également le débit de boue par l'intermédiaire du "flow restriction". La boue déviée (habituellement 4 - 10%) est utilisée pour refroidir et lubrifier l'arbre et les paliers de roulements. Elle sort directement vers l'espace annulaire au-dessus du raccord d'outil. Le pourcentage exact de boue détournée est déterminé par l'état des roulements et la chute de pression à travers l'outil

➤ Roulements axiaux on bottom :

Ceux-ci transmettent la charge du forage de la partie non rotative du moteur à l'outil de forage (en rotation). Ces paliers supportent la charge lors du forage. Les roulements peuvent être de type roulement à billes (ballbearing) ou des paliers de friction en diamant (diamond friction bearings) semblables à ceux des turbines. Le raccord d'outil de rotation est la seule partie externe en mouvement du moteur de fond.

4. Transmission

Vu que le rotor est façonné en spirale, il ne tourne pas de manière concentrique avec le rotor. Ce mouvement doit être converti en un mouvement concentrique puis être transmis à l'outil par l'arbre moteur. Cela est accompli par un système de transmission. Il y a plusieurs types :

➤ Universel joint

Les assemblées Universel Joint ont été utilisées par l'industrie et sont encore utilisées dans la plupart des PDM. L'ensemble consiste en deux joints universels, rempli de graisse, et scellé avec les manchons de caoutchouc résistant à l'huile pour les protéger du fluide de forage. Un inconvénient de l'Assemblée U-joint est le manque de force suffisante pour les applications à couple élevé, tels que ceux rencontrés avec les dernières générations de couple élevé PDM, en particulier lorsqu'il est utilisé avec les outils PDC. Cette faiblesse inhérente est le résultat du processus de fabrication.

➤ flexible coupling

Une évolution récente dans la technologie de raccordement a été l'utilisation de l'acier ou le titane flexible "barres flexibles". Bien que des tiges flexibles sont limités par le degré admissible de flexion latérale, ils ont l'avantage de nécessiter peu d'entretien, car ils ne nécessitent pas de lubrifiants ou de manchons en caoutchouc. Le flux Rod est désormais le standard sur la plupart des petits moteurs.

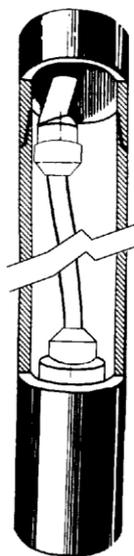


Fig. II.8 : Flux Rod



Fig. II.9 : Universel joint

4.1 Types de moteur de fond

a) Moteurs low speed

L'utilisation de coudes réglables avec des sections motrices à haut couple de sortie et faible vitesse de rotation rend le moteur à low speed idéale pour une utilisation dans des applications de forage dirigé y compris les puits horizontaux et des puits dans des formations à problèmes. Le couple de sortie élevé de sections motrices multilobées réduit efficacement la longueur des moteurs, permettant leur utilisation spécialisés dans diverses applications y compris le forage à court rayon.

b) Moteurs medium speed

Les caractéristiques de fonctionnement des moteurs à vitesse moyenne permettent un réglage fin des paramètres de fonctionnement et des taux de pénétration tout en maximisant la vie de l'outil et le temps au fond, réduisant ainsi les coûts. Les Applications pour les moteurs à vitesse moyenne sont le forage dirigé et droit, forage d'extension et le forage de performance.

c) Moteurs high speed

Les caractéristiques opérationnelles des moteurs high speed les rendent aptes à être utilisés dans les rectifications et les side tracks des applications où le contrôle directionnel précis permet l'établissement efficace de l'orientation nécessaire.

Les moteur low, medium et high speed peuvent être utilisés dans des applications de moteur droit ou orientable en fonction des paramètres de fond et les exigences opérationnelles.

3.5 Caractéristiques des PDM**a) Chute de pression**

Lorsque la boue est pompée à travers un moteur de fond qui tourne librement au dessus du fond (c.-à-d qu'il ne fait pas de travail) une certaine perte de pression est nécessaire pour surmonter les forces de frottement entre rotor et stator et causer la rotation du moteur. Cette perte de pression et la vitesse de rotation correspondante sont proportionnelles au débit. Leurs valeurs sont connues pour chaque taille et type de PDM. La perte de pression à vide ne dépasse généralement pas 100psi.

Quand l'outil touche le fond et un WOB de forage est appliqué, la pression de pompage augmente. Cette augmentation de la pression est normalement appelée la pression différentielle du moteur ($P_{onbottom} - P_{offbottom}$). Le couple moteur est directement proportionnel à la pression différentielle. Cette pression différentielle est nécessaire pour pomper un volume de boue donné à travers le moteur pour effectuer un travail utile. Elle est aussi appelée la chute de pression à travers le moteur (P_{motor}). Pour un moteur multilobe, elle peut être de 500 psi ou même plus.

Il est évident que, si la pression de pompage lors du forage avec un moteur est proche du maximum admis par le circuit de pompage, le calage du PDM peut conduire au déclenchement de la soupape de sécurité "pop-off valve". Ceci doit être pris en compte dans l'élaboration du programme hydraulique.

b) Couple et vitesse de rotation d'un PDM

La vitesse et le torque fournis par le moteur dépendent très largement des caractéristiques de la section motrice. Les lobes sur un rotor et stator agissent comme une boîte à vitesses. Pour un diamètre de moteur donné plus leur nombre augmente, plus le couple de sortie du moteur augmente et la vitesse de rotation de l'arbre de sortie diminue. La longueur de l'étage influence aussi le torque et la vitesse de rotation en déterminant l'angle d'inclinaison de la spirale du rotor. Plus l'étage est court plus cet angle est important ce qui réduit la force perpendiculaire à l'axe longitudinal du rotor et le volume des cavités dans chaque étage. Il en résulte une réduction de la production de couple et une augmentation de la vitesse de rotation du moteur. Inversement une plus grande longueur d'étage, produit une diminution de l'angle de pas, résultant en une augmentation du couple et une diminution de la vitesse. Pour une longueur d'étage et un nombre de lobe donné le nombre d'étage augmente aussi le torque produit par le moteur sans tout fois réduire la vitesse de rotation.

Le couple délivré par la section motrice est proportionnel aussi à la différence de pression à travers cette section d'où l'augmentation de pression visible en surface lorsque l'on met du poids sur l'outil. Le couple maximum est limité par la résistance mécanique de l'élastomère du stator. Ou cette résistance mécanique est affaire de compromis. En effet l'élastomère doit être suffisamment rigide pour résister à l'abrasion des solides de la boue, mais en même temps il doit être suffisamment flexible pour procurer une étanchéité sous pression entre le rotor et le stator. La vitesse de rotation elle est proportionnelle au débit du fluide de forage pour une configuration de lobes donnée.

c) Puissance délivrée par le PDM

Tout comme dans le cas de la turbine, la puissance du moteur est définie comme étant la puissance mécanique produite par la section motrice, c'est une fonction du couple produit et de la vitesse du moteur (RPM). La puissance à une pression donnée est calculée en utilisant la valeur du couple et la valeur correspondante de la vitesse pour cette pression à un débit spécifique.

Les puissances maximums ne devraient pas être calculées en utilisant la valeur de couple de calage (où il n'y a aucune rotation de l'outil de forage) ou en utilisant la vitesse de rotation maximale (Off-bottom) où il n'y a aucune production de couple à l'outil.

La formule suivante nous permet de déterminer la puissance mécanique du moteur en HP (Horsepower) :

$$\text{Puissance Mécanique} = \frac{\text{Output RPM} \times \text{Output Torque}}{5252}$$

Des études récentes ont montré que la courbe de puissance est une parabole et ne pas une courbe lisse vers le haut, comme on le pensait initialement. Cela signifie que si le PDM est utilisé à 50% -60% de la pression différentiel maximale admissible par la section motrice, les mêmes performances devraient être atteintes que lorsqu'ils fonctionnent à 90% de la pression différentiel. La première situation est beaucoup mieux, car elle donne une plus grande marge avant le calage. Cela devrait déboucher sur une vie du moteur beaucoup plus longue.

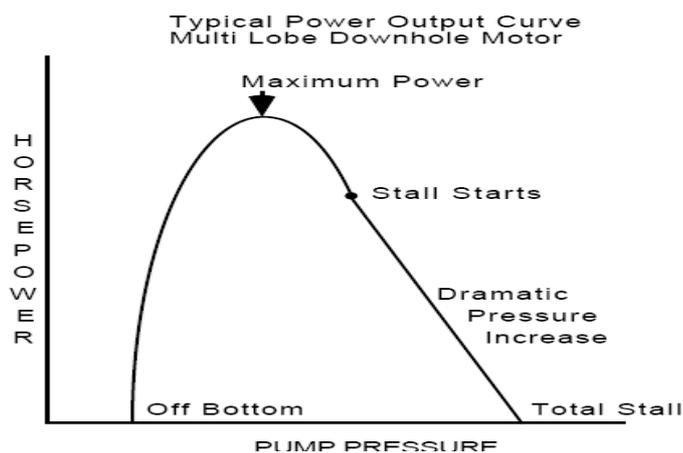


Fig. II.10 : Courbe de pression d'un PDM

Cependant, les courbes fournies par les constructeurs ne représentent la puissance que dans le domaine d'utilisation normale du PDM et ne vont pas jusqu'au calage du moteur. Ces courbes de puissance ne sont pas des multiples exacts du couple maximal et de la vitesse maximale de sortie, mais ils sont plus représentatifs des résultats pratiques. Il est recommandé que la pression différentielle de fonctionnement dans les conditions normales de forage ne dépasse pas 80% du maximum autorisé, le maximum étant la valeur de pression différentielle correspondant à la puissance maximale.

d) Rendement du moteur

Le rendement d'un moteur relie les puissances hydrauliques (débit et pression) fournies au moteur aux puissances mécaniques correspondantes (couple et RPM) produites par le moteur. Le rendement du moteur à une différence de pression spécifique est obtenu en divisant la valeur de la puissance mécanique fournie par le moteur et la valeur de la puissance hydraulique correspondante consommée. Il est donné par la formule suivante:

$$E = \frac{32.64 \times T \times S_r}{q_m \times p_d}$$

La perte de l'étanchéité entre rotor et stator réduit sévèrement le rendement du moteur c'est pourquoi le rendement des PDMs est sérieusement affecté aux températures de puits élevées en raison de l'altération de l'élastomère. Il varie aussi en fonction des caractéristiques de la section motrice ainsi il augmente avec l'augmentation de la longueur d'étage et diminue avec l'augmentation du nombre de lobe.

1. Les paramètres de forage

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage.

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- Les paramètres mécaniques
- Les paramètres hydrauliques

1.1 Les paramètres mécaniques

Les terrains traversés présentent une grande variété de la dureté. Les avancements peuvent varier de 80 mètres/heure à quelques dizaines de centimètres par heure. Il est évident que pour forer des roches de différentes duretés on utilise des outils bien spécifiques selon la nature géologique.

a) Poids sur l'outil

A une vitesse de rotation constante, l'augmentation du poids sur l'outil contribue une augmentation de la vitesse d'avancement, à peu près en proportion directe si le débit de Circulation est suffisant.

Le poids sur l'outil(WOB) c'est un paramètre calculer selon un principe physique, prend on considération le poids de la garniture libre(WOHL) et le poids de la garniture durant le forage(WOHF).

$$WOB = WOH_L - WOH_F$$

La charge de tous la garniture est supportée par le corps du cône qui s'applique contre la formation et il en résulte une diminution de la vie de l'outil. Cette charge est d'autant plus importante dans les terrains de plus en plus durs.

le range maximale et minimale du poids sur l'outil (WOB) est limité par le constricteur.

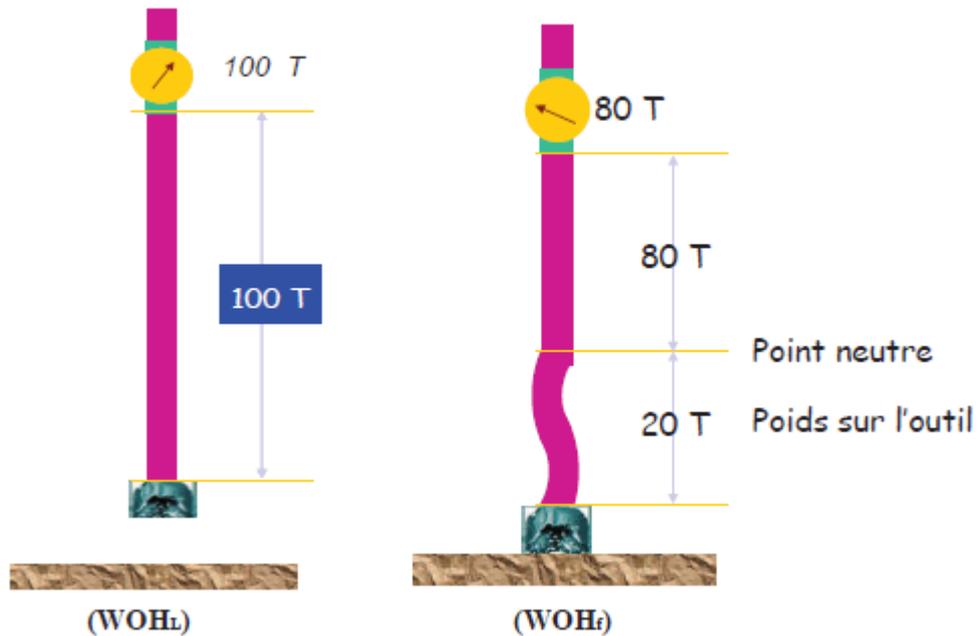


Fig. III.1. Poids sur l'outil

1.2 Vitesse de rotation

La vitesse de rotation (RPM) c'est un paramètre physique qui indique le nombre de tour de la table dans le ring-floor par minute, identifié à l'aide d'un capteur La vitesse de rotation croît en fonction de la dureté de la formation et le paramètre torque peut être limitée également par Les vibration qui affectent la garniture de forage (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures).



Fig. III.2. Capteur de fréquence SPM RPM

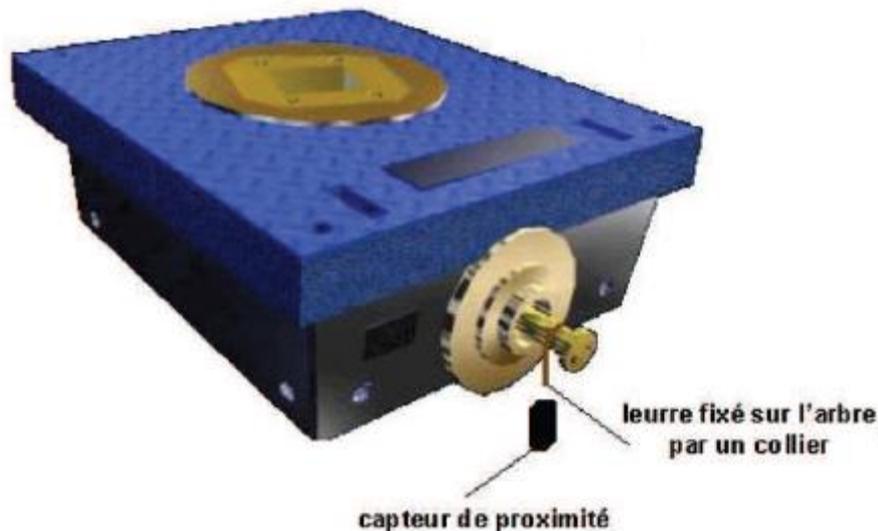


Fig. III.3. Placement de capteur a la table de rotation

1.3 Torque

C'est un paramètre physique enregistré au cours du forage par un capteur, à vrai dire le torque est la force opposée à la rotation. Tout dépend aussi de la résistance des roches traversées. Comme le poids, le couple en surface n'est pas transmis intégralement à l'outil de forage, mais la mesure de surface est la seule possible actuellement.

Un capteur à effet Hall est installé autour du conducteur d'amenée d'électricité (mesure le courant électrique)

Le torque indique :

- l'état de l'outil et surtout de ses roulements (tricône)
- les changements de formation
- éboulement de terrain au niveau de l'outil
- transmission du couple lors d'un back-off



Fig. III.4 : Capteur de fréquence torque

2. Paramètres hydrauliques

2.1 Débit (flow)

c'est un volume de boue déversé par les pompes de forage à travers le stand pipe et le drill string à l'intérieur du train de sonde.

La quantification du débit est basé sur le débit unitaire de des pompes (POP)

Calcul du débit unitaire:

Volume d'un cylindre de diamètre D (chemise) et de hauteur H (course)

$$\text{POP} = \frac{\pi \times D^2}{4 \times H}$$

Débit unitaire = 3 x V (3 pistons)

Et le nombre de coup par minute contribue par les pompes (SPM), le SPM il est enregistré à l'aide d'un capteur de fréquence similaire à celle de la rotation

L'unité de débit est le L/mn Les pompes de forage sont caractérisées par:

- Le nombre de pistons (02 duplex, 03 triplex)
- Le diamètre de la chemise (piston)
- La Course (10 " ou 12")

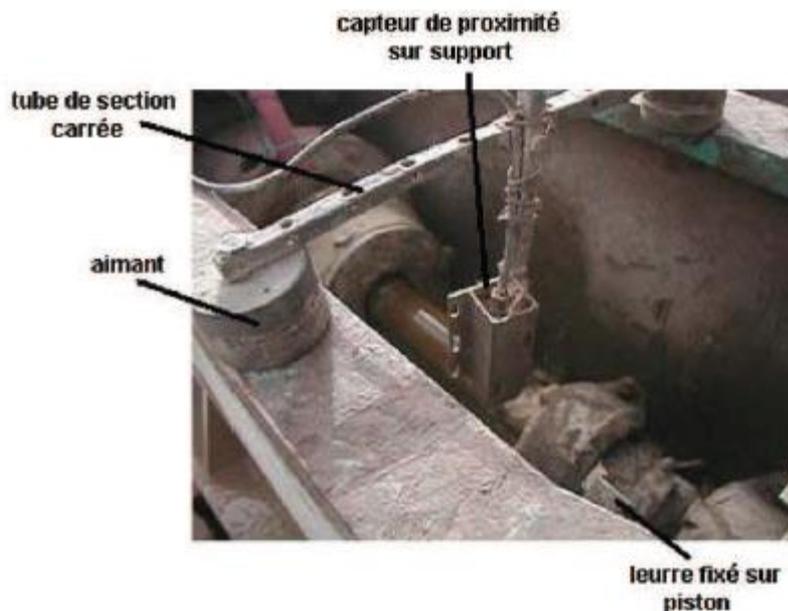


Fig. III.5 : placement de capteur dans les pompes

2.1.1 Procédure pour le comptage de l'efficacité des pompes

- On pompe à partir d'un bac actif environ 250 (à 300) coups de pompes et
Le retour dans un autre bac On mesure la variation de volume en centimètre dans le
bac actif duquel on a pompé Connaissant le volume unitaire de la pompe (exemple
19.57 l/ coup) et le volume linéaire du bac.

2.1.2 Notion de pertes de charge

Définition

C'est la résistance à l'écoulement des fluides.

Elles sont essentiellement dues aux frottements fluides avec fluide et fluide avec
parois, il faut noter aussi qu'en l'absence d'écoulement les pertes de charge sont
nulles.

Les pertes de charge dépendent

- du débit
- de la longueur du circuit
- du diamètre du circuit
- de la densité et la rhéologie du fluide

Elles sont données par la formule approchée

$$P_c = K \times (d \times L \times Q^2) / D^5$$

- K : Constante
- d : densité du fluide
- L : longueur du circuit
- Q : débit dans le circuit
- D : diamètre du circuit

2.2 Notion de pression

a) Pression hydrostatique

$$P_h = h \times d / 10.2 \text{ (bar)}$$

- h est la hauteur de fluide (m)
- d est la densité (kg/l)

b) Pression exercée sur le fond d'un puits

$P_{\text{fond}} = P_h + P_c \text{ annulaire}$

Ou :

- P_h est la pression hydrostatique
- $P_c \text{ annulaire}$ = pertes de charge annulaire

c) A l'état statique: (pas de circulation)

$P_{\text{fond}} = P_h$ ($p_c \text{ annulaires} = 0$)

- En circulation:

$P_{\text{fond}} = P_h + P_c \text{ annulaires} > P_h$

d) Pression de pore et de fracturation (P_{pore}) / (P_{frac})

Chaque formation est caractérisée par

1/ La pression de pore

2/ la pression de fracturation

La pression de pore d'une formation est la pression de l'effluent qu'elle contient, la pression de fracturation est déterminée par un leak off test L.O.T, c'est la pression à exercer sur la formation jusqu'à initier l'injection du fluide dans la formation cette pression est la pression admissible qu'on ne doit pas atteindre

e) Densité équivalente

C'est la densité correspondant à la pression exercée sur le fond du puits

En statique (pas de circulation): $d_{eq} = d$ (densité de la boue)

En dynamique (avec circulation) $d_{eq} = ECD$ (densité équivalente en circulation)

f) La dépression et la surpression

Elles dépendent de :

- la profondeur
- la taille de l'espace annulaire BHA / trou
- la rhéologie de la boue
- la vitesse de remontée ou descente

La boue doit être alourdie afin d'avoir une marge de sécurité $h = P_{\text{pore}} + S$ (ou S est la marge de sécurité)

La pression de la boue est mesurée à l'aide de capteurs sur le manifold de plancher pour obtenir la valeur d'entrée (Stand Pipe Pressure) et sur choke manifold p) pour obtenir la valeur de sortie (CASING PRESSURE).

Le capteur à l'injection doit être compatible avec la pression maximum de fonctionnement du système de refoulement (400 bars).

Le capteur annulaire doit être aussi compatible avec la série de la tête de puits pour permettre des mesures correctes.

Les jauges utilisées transforment la pression en signal électrique.

Les capteurs de pression nous permettent de savoir :

- perte ou bouchage d'une Duse
- sifflage ou rupture
- surveillance de déplacement des bouchons de densité différente
- manœuvre hydraulique d'équipements de fond
- contrôle de kick
- déroulement des opérations lorsque le puits est mis sous pression (étanchéité d'un packer)

4. Etudes des paramétré de forage

On doit agir sur les paramètres de forage pour optimiser le ROP.

Selon les résultats obtenus durant le forage des quatre puits d'études on a constaté que :

4.1 Pour THN 1

a) Flow

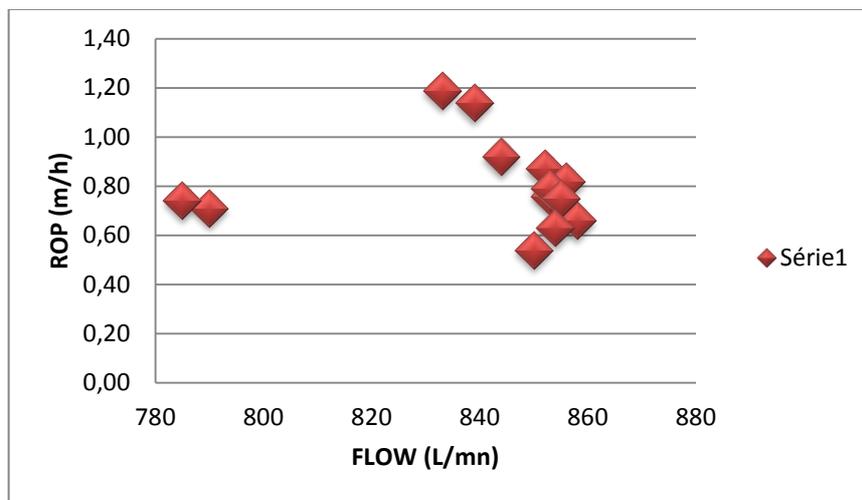


Fig. IV.1- La courbe de variation de ROP en fonction du FLOW(THN1)

- la courbe variation de ROP en fonction du flow dans le puis THN-1 nous indique que le flow est un facteur influent sur le ROP

b) RPM

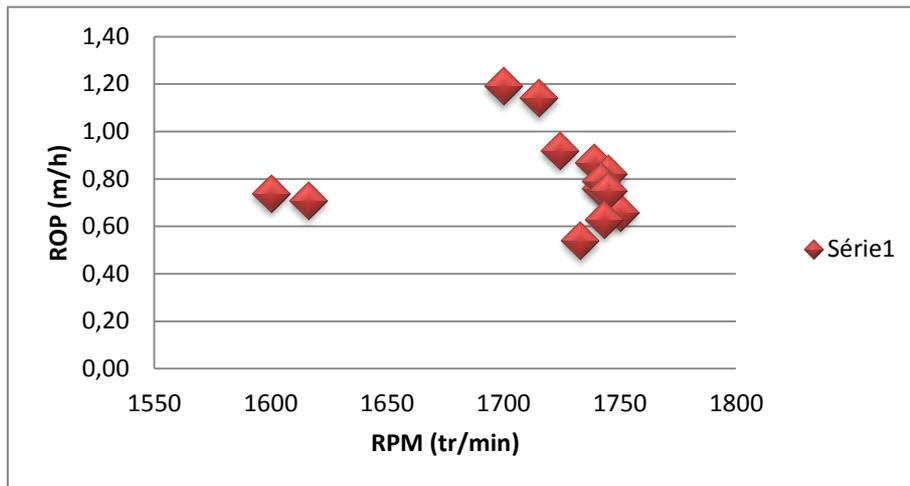


Fig. IV.2- La courbe de variation de ROP en fonction du RPM(THN1)

- la courbe d'évolution de ROP en fonction du RPM dans le puis THN-1 se manifeste en deux étapes :

A partir du Flow 1600lpm jusqu'au 1700 : une relation proportionnel.

A partir du 1700lpm la corrélation devienne négative.

c) WOB

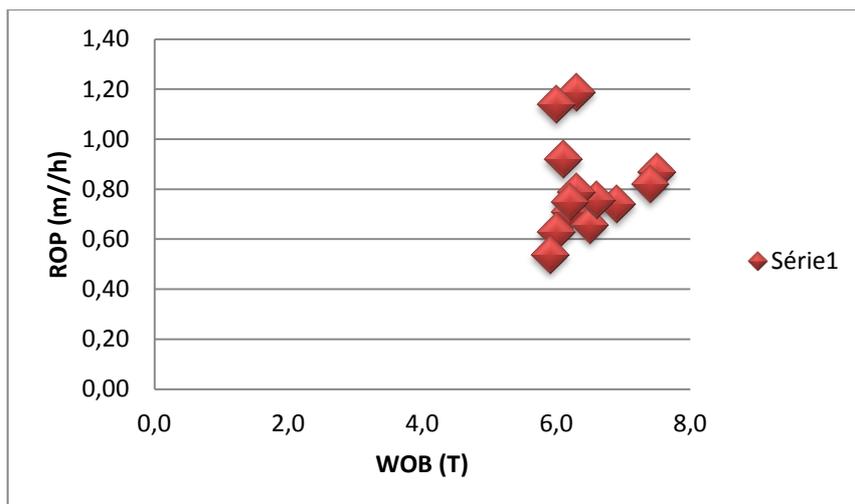


Fig. IV.3- La courbe de variation de ROP en fonction du WOB (THN1)

- D'après les data enregistré du WOB, on a constaté une relation proportionnel entre WOB et ROP, se qui nous a mené de conclure que une augmentation du WOB implique automatiquement un meilleur avancement dans le puis THN1.

d) SPP

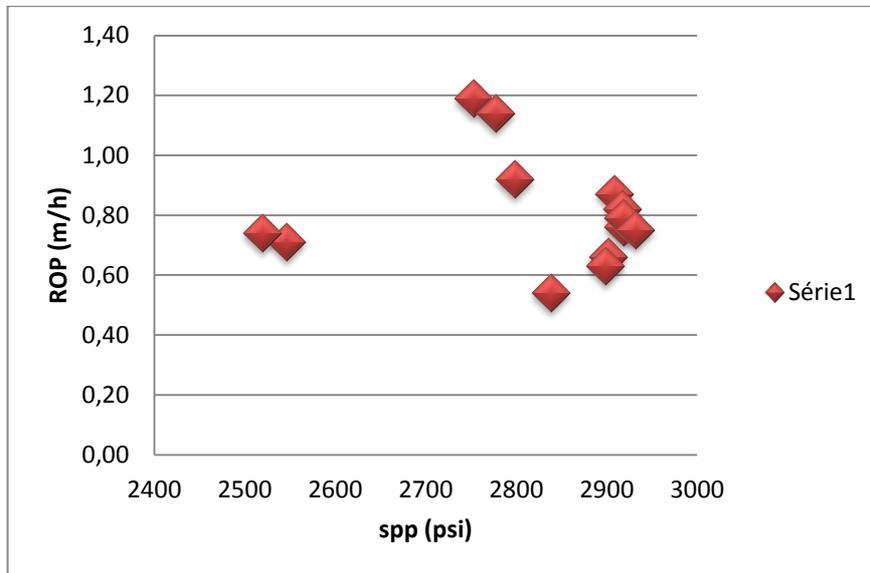


Fig. IV.4- La courbe de variation de ROP en fonction du SPP (THN1)

- la courbe variation de ROP en fonction du flow dans le puis THN-1 on a montré une corrélation négative, se qui nous a menés a conclure que l'avancement il est indépendant du SPP.

e) TORQUE

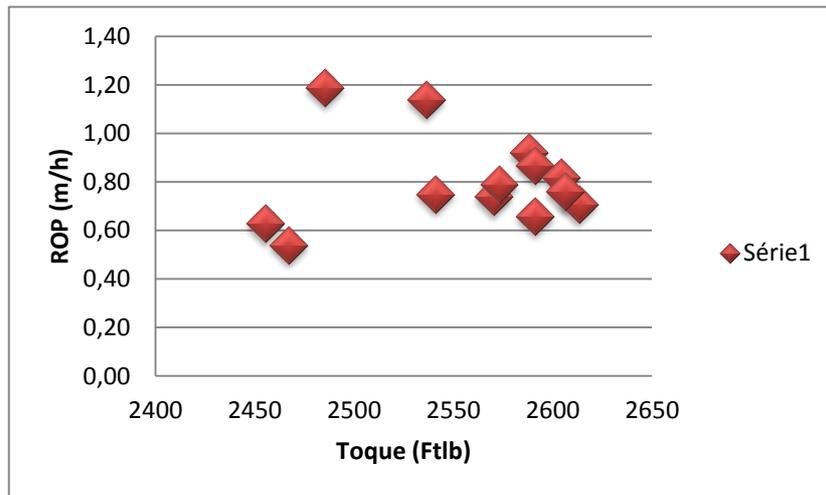


Fig. IV.5- La courbe de variation de ROP en fonction du Torque(THN1)

- D'après les data enregistré du TORque, on a constaté une relation proportionnel entre Torque et ROP, se qui nous a mené de conclure que une augmentation du Torque implique un meilleur avancement dans le puis THN1.

2. Pour THW1

a) Flow

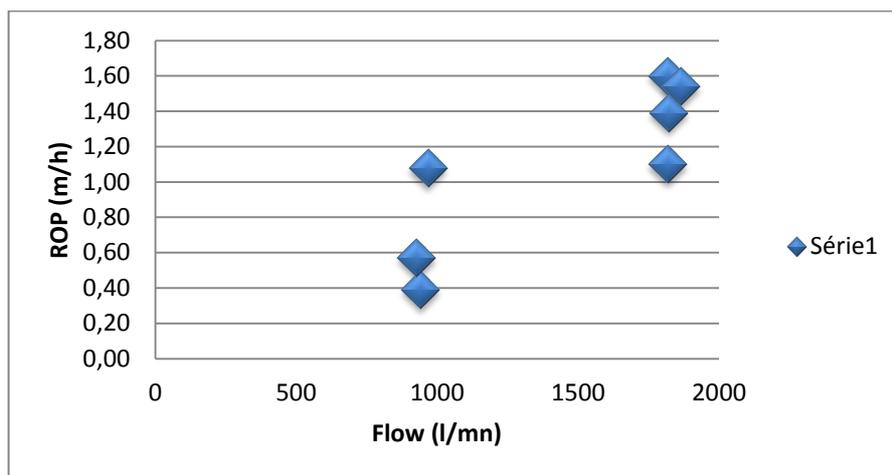


Fig. IV.6- La courbe de variation de ROP en fonction du FLOW(THW1)

-D'après la courbe d'évolution de ROP en fonction du flow dans le puits THW-1 on peut dire que il y a une corrélation entre les deux paramètres, se qui nous a menés a Synthétisé que l'avancement elle est dépendante du FLOW.

b) RPM

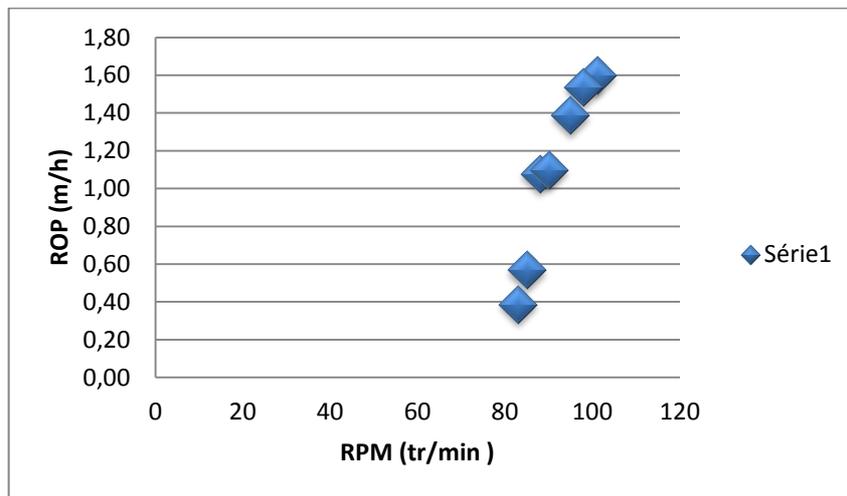


Fig. IV.7- La courbe de variation de ROP en fonction du RPM (THW1)

-D'après la courbe d'évolution de ROP en fonction du RPM dans le puits THW-1 on a le teneur maximale du RPM, implique l'augmentation de ROP.

c) WOB

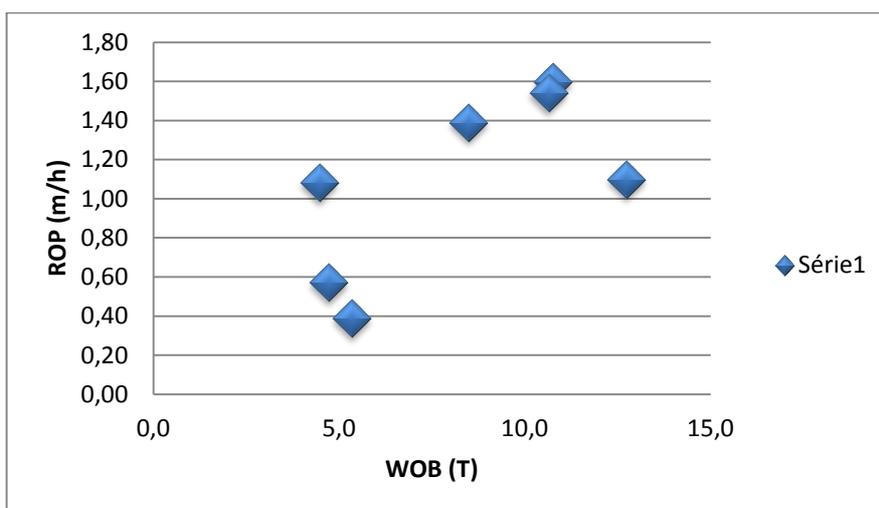


Fig. V.8- La courbe de variation de ROP en fonction du WOB(THW1)

-La courbe de l'évolution de ROP en fonction du WOB caractérisé par une corrélation positive ou on a constaté que une augmentation du WOB cause une augmentation dans l'avancement.

d) SPP

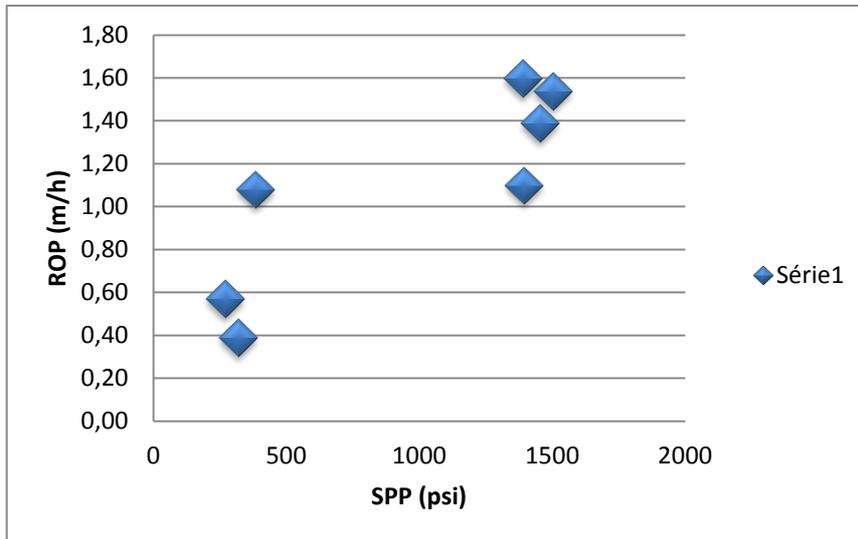


Fig. V.9- La courbe de variation de ROP en fonction du SPP(THW1)

-La courbe de l'évolution de ROP en fonction du SPP, on a constaté que une augmentation du SPP cause une augmentation dans la ROP.

e) Torque

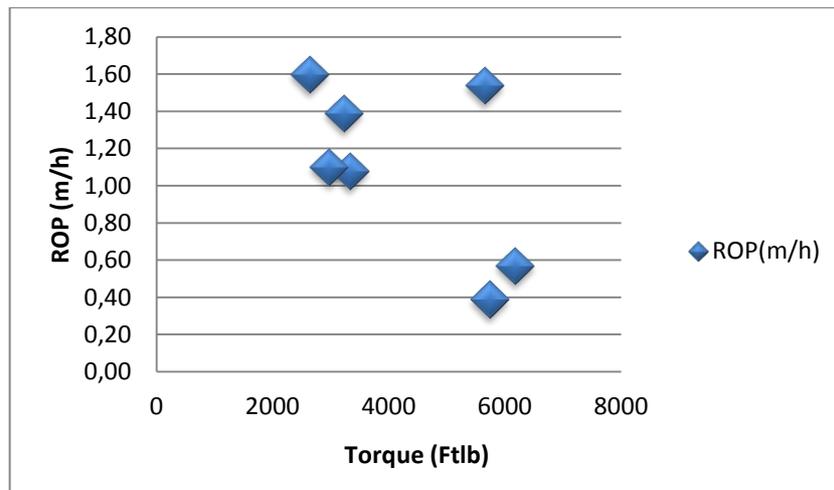


Fig. IV.10- La courbe de variation de ROP en fonction du Torque(THW1)

- la courbe variation de ROP en fonction du flow dans le puis TWN-1 on a montré une corrélation négative, se qui nous a menés a conclure que l'avancement il est indépendant du Torque.

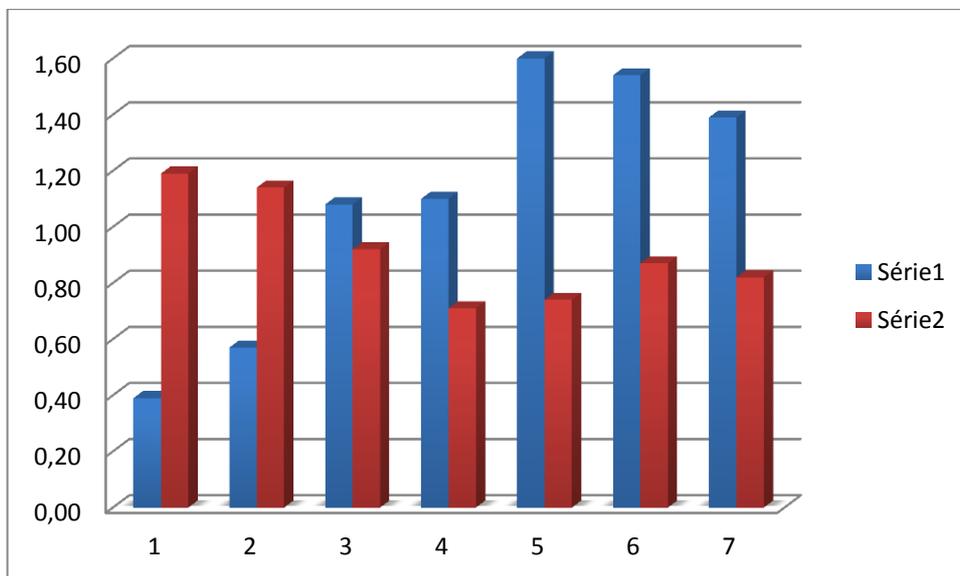


Fig. IV.11. L'histogramme des valeurs de ROP d'une THN-1 et THW-1

L'histogramme des variations d'avancement des puits montre que les quartzites de hamra du cambro ordovicien ne présentent aucune contrainte à leur traversée en utilisant un système de forage simple sans moteur.

CONCLUSION

La région de In Salah fait partie des grands champs pétroliers d'Algérie, les travaux d'exploration prennent une allure progressive ces dernières années, ce qui a obligé les entreprises à augmenter la cadence des forages dans la région,

Les principaux réservoirs dans la région se localisent dans l'ordovicien, caractérisé par des grès durs à très durs, quartzitique, alors les foreurs se retrouvent face à un grand problème pour traverser ces formations, ce qui rend l'utilisation des moteurs de fond indispensable

D'après les data enregistrés durant la réalisation des forages(THN1_THW1) dans la région on constaté que ROP dépend essentiellement de quelques paramètres comme (WOB, RPM) avec des allures identiques dans un forage rotary ou bien avec turbine.

Mais se qui est important de noter c'est que le forage rotary est beaucoup plus performant qu'avec la turbine.

Recommandations

Pour forer cet intervalle dans les meilleurs délais avec un avancement rapide, on a proposé les recommandations suivantes :

Rotary

- **Type d'outils** : imprégnés
- **WOB**: entre (8_10) T
- **FLOW**: supérieur a 1810 l/m
- **RPM** : entre (90_100) tr/min

Turbine

- **Type d'outils** : imprégnés
- **WOB**: entre (5_6) T
- **FLOW**: supérieur a 800 l/m
- **RPM** : entre (1650_1750) tr/min

Bibliographie

- Bill Wamsley : « Turbo drill Basics Manual », Smith International Inc, Neyrfor, juin 2004.
- William c. Lyons : « Standard Handbook Petroleum Natural Gas Engineering 1 » william c. 1996.
- Baker Hughes: « Navi-Drill Motor Handbook », Baker Hughes Incorporated, 1998.
- « les outils de forage » F. grondin, sonatrach - division forage département formation, édition janvier 2004.
- «formation JDF module M1» Sonatrach (division forage) réalisé par : A. SLIMANI-M. DADDOU édition mars 2004.
- «formation JDF module M2» Sonatrach (division forage) réalisé par : A.SLIMANI édition juin 2006.
- «les rapports des outils "bit record" » de la société Sonatrach (division forage direction régionale des opérations).