



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : ***BOUTERFAYA Imad-eddine***

BEN CHETTOUH Brahim

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hydrocarbures

OPTION : Génie Gazier

Thème

***Etude techno économique pour la sélection des outils
de forage***

Application sur la phase 12''^{1/4}

dans le champ de Hassi Tarfa

Jury de soutenance :

| Nom et Prénom | Grade | qualité |
|-------------------------------|--------------|----------------|
| <i>Ahmed ABLEMOUIZ</i> | <i>MAA</i> | Président |
| <i>Khaled GHALEM</i> | <i>MAA</i> | Examineur |
| <i>Mohammed Bachir Taouti</i> | <i>MAA</i> | Rapporteur |

Promotion : JUIN 2021

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnés le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Mr Mohammed Bachir Taouti** d'avoir proposé le sujet sur lequel j'ai travaillé, et qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.*

Je tiens tout d'abord à exprimer mes reconnaissances envers les membres du jury, dont la renommée et la qualité scientifique honore grandement ce travail :

***Mr Ahmed ABLEMOUIZ**, qui a bien accepté de présider le Jury de ce mémoire, **Mr Khaled GHALEM** pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateurs de ce travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à **Mr Abdelmouiz Ahmed**, pour leur aide et soutien morale.*

Enfin, je tiens a remercier vivement mes amis pour leur disponibilité, leurs encouragements durant toutes les phases de l'étude et leurs conseils qui m'avons beaucoup soutenus tout au long de ce travail pratique, qu'il prouve ici notre plus grande reconnaissance.

DEDICACES

A mes très chers parents

A mes frères et mes sœurs

A tous ceux qui m'ont aidé dans mes études

A tous mes proches, mes amis.

| | |
|--|----|
| Abréviations | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les outils de forage | |
| I-1. outils de forage | 2 |
| I-2. différents types des outils de forage. | 2 |
| I.2-1. outils à molette..... | 2 |
| I-2.2. outils à diamants | 2 |
| I.2.2.1. outils a diamants naturel | 2 |
| I.2.2.2. outils à diamants synthétique | 2 |
| II-1.Mode de travail des outils | 4 |
| II-1.1. outils tricônes | 4 |
| II-1.2 outils PDC | 4 |
| II- 1.2.1 Mode de travail des outils PDC..... | 5 |
| II- 1.2.2 Principe de fonctionnement | 6 |
| III-Choix des outils de forage | 9 |
| III-1.Choix économique des outils | 10 |

Chapitre II : Etude Technique

| | |
|--|----|
| I.1-Présentation de champ de Hassi Tarfa | 11 |
| I.2- Cadre géographique du champ de HTF..... | 11 |
| I.3- Description lithologique et Coupe Stratigraphique | 12 |
| II.1-Avancement commercial. | 13 |

| | |
|--|----|
| II.2- Prix de mètre fore | 13 |
| II.2. Choix de l'outil par la méthode de break even..... | 14 |
| III. Etude de performance des outils PDC.... | 16 |
| III.1 -Courbe d'avancement..... | 19 |
| III.2 Calcul de prix de mètre fore..... | 20 |
| III.3. -Méthode de break even..... | 22 |
| Conclusion..... | 25 |
| Références | |

Abréviations

HTF : Hassi Tarfa

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

PDC : Polycristalline diamand compact

TSP : Thermally Stable Polycrystalline

Pm : Le prix de mètre foré (\$/m)

Po : Le prix de l'outil (\$)

Ph : Le prix de l'heure de l'appareil (\$/h)

Tm : Le temps de manœuvre nécessaire pour descendre et remonter l'outil (h)

Tf : Le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage M (h).

Depth IN : Profondeur de l'entrée de l'outil dans chaque formation géologique en mètre)

Depth OUT : Profondeur de sortie de l'outil dans chaque formation géologique en mètre)

ROP : Vitesse d'avancement de l'outil (en mètre/heure)

TD : Total Depth, c'est la profondeur totale forée ($TD = \text{Depth OUT} - \text{Depth IN}$)

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Fig.1 : Outils tricônes | 2 |
| Fig.2: Outils PDC..... | 3 |
| Fig.3 : Outils TSP..... | 3 |
| Fig.4: Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche..... | 4 |
| Fig.5: offset inclinaison des cones..... | 4 |
| Fig 6: Outils PDC..... | 5 |
| Fig 7: outil PDC Steel body..... | 5 |
| Fig 8: outil PDC Matrix body..... | 6 |
| Fig 9: Principe de fonctionnement d'un outil PDC..... | 7 |
| Fig 10: Angles caractéristiques d'un PDC..... | 9 |
| Fig11: Longueur utile | 9 |
| Fig.12: Situation du champs de Hassi Tarfa..... | 11 |
| Fig.13: Colonne stratigraphique type de la région Hassi TARFA | 12 |

Chapitre II :

| | |
|---|----|
| Fig.14: Les courbes d'avancement..... | 13 |
| Fig.15: les courbes de rentabilité par la méthode de Break even..... | 15 |
| Fig.16: Courbe d'avancement des outils de forage..... | 18 |
| Fig.17: variation des profondeurs totales forées entre les outils PDC et les ROPmoy Correspondantes..... | 18 |
| Fig.18: variation des ROPmoy et Pm | 19 |
| Fig.19: Les courbes d'avancement des outils de forage..... | 21 |
| Fig.20 : la courbe de rentabilité par la méthode de Break even..... | 23 |
| Fig.21 : les courbes de rentabilité par la méthode de Break even..... | 24 |

Chapitre II

| | |
|---|----|
| <i>Tableau .1 : la performance des outils PDC..</i> | 16 |
| <i>Tableau .2 : les paramètres des outils PDC.....</i> | 17 |
| <i>Tableau .3: Prix de mètre foré.....</i> | 20 |
| <i>Tableau .4: les données de la pente Bm.....</i> | 22 |
| <i>Tableau .5: Méthode de Break-Even</i> | 23 |

Introduction

Le forage est une opération délicate et plus coûteuse du processus d'exploitation de cette énergie. Le but d'un forage est d'atteindre un objectif avec un prix de revient le plus bas possible avec le respect strict de l'aspect sécuritaire.

La réduction du coût de forage exige l'optimisation de toutes les activités de forage qui nécessite un travail intégral qui commence à partir de la planification des puits et inclut le choix de tubage, de la garniture de forage, de la boue de forage, de l'outil de forage et de l'hydraulique, ainsi que l'utilisation optimale des équipements et la planification des opérations de forage.

Les sociétés pétrolières essaient toujours d'améliorer les méthodes de travail, les techniques de forage et les produits utilisés dans le but de réduire les coûts d'un forage. Pour la réalisation de ce but, il faut choisir l'outil le mieux adapté au type de la formation à forer afin d'obtenir une vitesse optimale d'approfondissement de l'outil.

La destruction de la roche et la vitesse d'avancement dépendent essentiellement du type d'outil et des paramètres de forage qui lui sont appliqués, la rentabilité d'un outil dépend de tous les facteurs qui contribuent à l'augmentation de la ROP, elle s'exprime par un aspect économique défini par le prix de revient du mètre foré.

Il peut exister, pour une formation donnée, plusieurs types d'outils capables d'assurer un bon service. Une étude comparative effectuée au cours des premiers forages permettra d'effectuer les autres forages d'exploitation dans de meilleures conditions. L'outil le plus fiable est celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré le plus bas et dans de bonnes conditions techniques.

Ce travail sera présenté en deux chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les outils utilisés dans le forage.
- L'étude de la performance des outils PDC sera présentée dans le deuxième chapitre.
- En fin une conclusion.

*Chapitre I : généralités sur les outils de
forage*

I.1. les Outils de forage

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits pétrolier. C'est le premier élément en contact avec les formations traversés aux sous l'action d'une charge axiale et d'un couple moteur.

Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser [1].

I.2. Les différents types des outils de forage

Les outils se classent en deux catégories :

1.2.1. Les outils à molettes

Les outils tricônes sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil, Ces outils travaillent principalement en compression. [3].

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

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



Fig.1. Outils tricônes

I.2.2. Les outils diamants :

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

II.2.2.1. Les outils à diamant naturel: 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) [8]. La taille, le type et la quantité de diamants pour un outil donné dépendent de la vitesse d'avancement prévue, de la taille des déblais et de l'homogénéité de la formation à forer.

II.2.2.2. 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 [5].

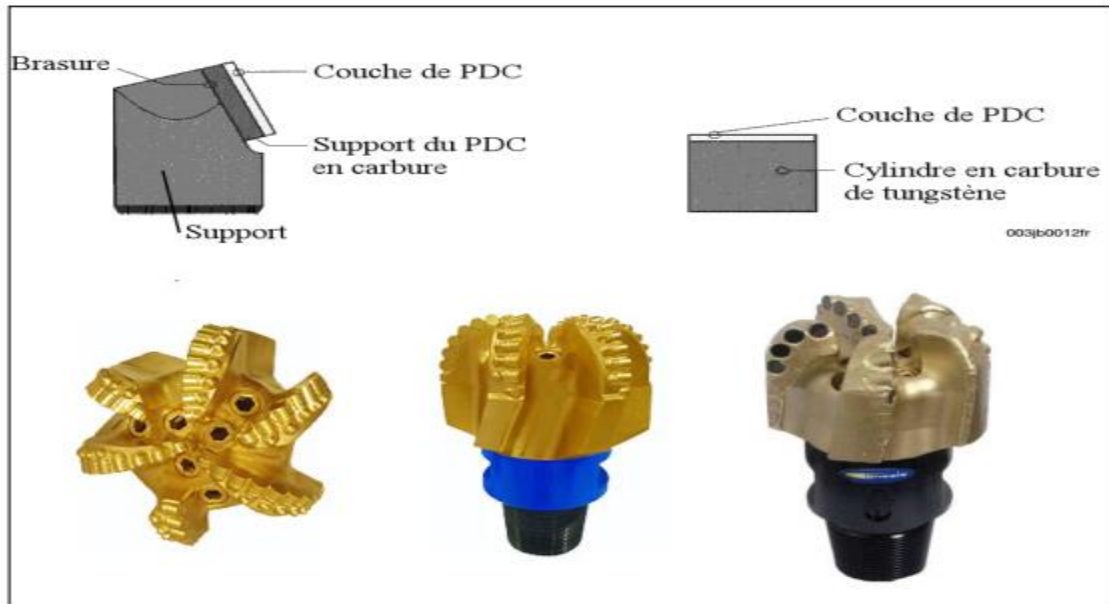


Fig.2. Outils PDC

✓ **Les outils TSP (Polycristallins diamants thermostables)**

Contrairement au PDC les TSP ont subi un traitement pour éliminer les éléments incompatibles d'un point de vue dilatation thermique ils pourront donc supporter 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



Fig.3. Outils TSP

I.3 Mode de travail des outils

I.3.1. Outils tricônes

Un tricône travaille par :

- Percussion et pénétration de la dent dans la formation, pour avoir un meilleur avancement il est donc logique plus le terrain est tendre, plus la dent devra être grande ;
- Arrachage des "copeaux" de terrain par glissement de la molette sur elle-même. Il faut un décalage des rangées de dents sur chaque molette.

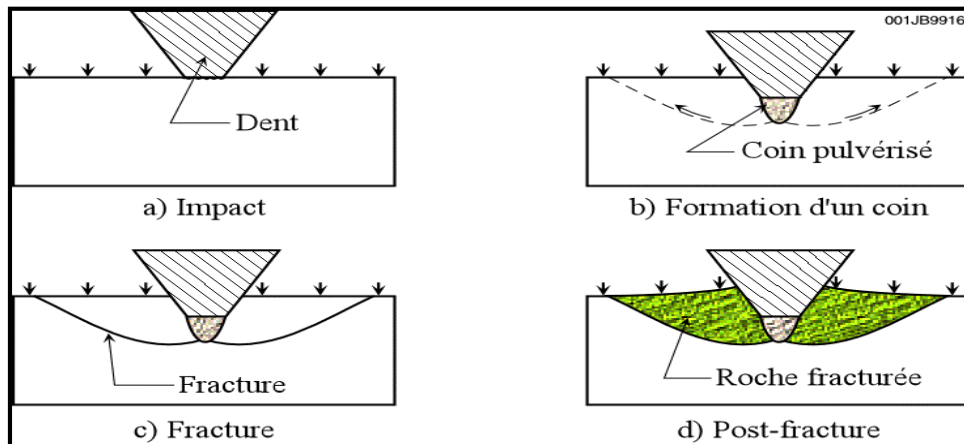


Fig. 4 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche

Pour obtenir l'effet de glissement ou "ripage" qui permet d'arracher les copeaux de terrain, l'axe de chaque molette est décalé et ne passe pas par l'axe de rotation de l'outil. C'est ce qu'on appelle "l'offset". Il est d'autant plus grand que l'outil destiné aux terrains tendres, pour devenir nul pour les outils destinés aux terrains durs. Dans les terrains durs, l'arrachage de copeaux n'est plus possible et l'effet de glissement serait nuisible aux dents de l'outil [7].

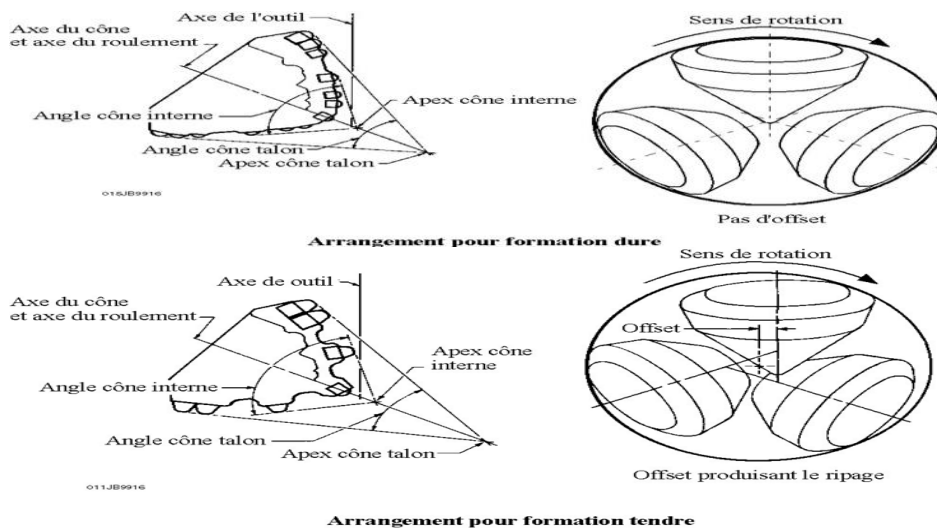


Fig. 5 : offset et inclinaison des cônes

I.3.2. Les outils PDC :

Les outils à pastilles de diamants polycristallins existent soit avec corps acier, soit avec matrice.

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

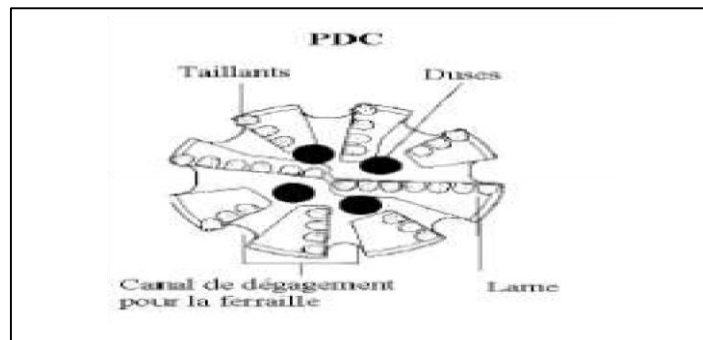


Fig 6: Outils PDC

I.3.2.1 -corps en acier (Steel body):

Le corps est en acier monobloc obtenu par usinage. Ces outils ont des taillants PDC sertis directement dans le corps sans brasage. Le diamètre est protégé par des barres en carbure de tungstène sur toute la hauteur de la jupe extérieure. Pour réduire le phénomène d'érosion du corps, la surface d'attaque de l'outil est protégée par une métallisation dure. Ce type d'outils offre la possibilité d'utiliser toute la surface du taillant, étant donné qu'il est entièrement exposé, et de remplacer les taillants après utilisation s'il n'y a pas eu érosion du corps. Par contre, les taillants ne peuvent pas supporter un torque important et se cassent à la base du corps. (Fig.7)

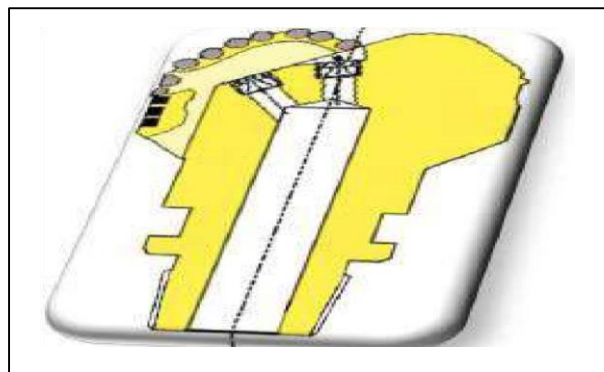


Fig 7: outil PDC Steel body

I.3.2.2 corps en carbure de tungstène (Matrix body) :

Le corps, en deux parties soudées, a une âme en acier et une matrice en carbure de tungstène, ces outils ont des taillants cylindriques brasés directement dans un évidage dans le corps, qui en plus, les protège contre les chocs. Ainsi, ils peuvent travailler avec des torques très importants.

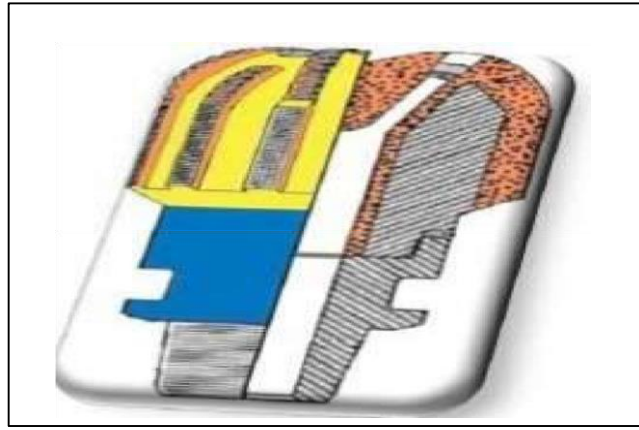


Fig 8: outil PDC Matrix body

II.1 Mode de travail d'un outil PDC :

Les efforts appliqués sur le cutter :

- La force de coupe F_c (horizontal force)
- La force normale F_n (poids sur l'outil)
- La force latérale F_L .

Lorsque un cutter PDC coupe une roche à une profondeur de passe h , elle est soumise à un effort résultant R , dont la composante normale à la face de la pastille appelée effort de coupe F_c est responsable de la rupture de la roche par cisaillement. Cet effort résultant présente également une composante latérale F_L .

II.2. Principe de fonctionnement :

Le balayage du fond du trou est obtenu par le mouvement de rotation de l'outil autour de l'axe de forage.

Tous les points de l'outil PDC décrivent dans son mouvement des cercles concentriques, en particulier chacun des éléments de l'outil, qui est maintenu enfoncé dans la roche sous l'effet de la charge verticale, repousse dans ce mouvement de rotation un élément de roche, dont l'épaisseur est égale à la profondeur dont il s'est enfoncé, et à chaque instant il écrase un élément nouveau de roche vierge.

Si la vitesse de rotation de l'outil et la résistance de la roche sont uniformes, chaque élément d'outil, en contact avec le fond du trou, aura une trajectoire hélicoïdale dont le pas sera égal à l'avancement de l'outil par tour.

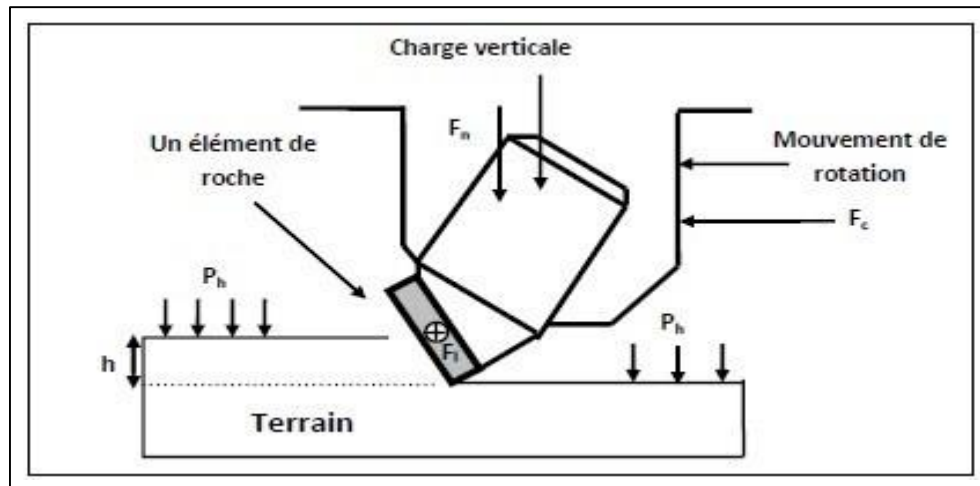


Fig 9: Principe de fonctionnement d'un outil PDC

II.3. Désignation d'un outil PDC :

On désigne un outil par :

1. Le corps de l'outil
2. Le profil
3. Densité des cutters
4. Angles caractéristiques de parties
5. Longueur utile (Ledge)

II.3.1 Le corps de l'outil :

Actuellement, il existe deux types de corps d'outils :

1. Corps en acier (steel body)
2. Corps en carbure de tungstène (Matrix body)

A- Steel body:

➤ Les avantages :

- possibilité de remplacer les cutters périscope après utilisation de l'outil si toute fois il n'y a pas eu érosion du corps.
- possibilité de pouvoir utiliser toute la surface du cutter étant donné que ce type de cutter est entièrement exposé.

➤ Les inconvénients :

Une usure par "Wash out" très rapide du corps acier ce qui limite considérablement sa durée de vie. Cette durée de vie est directement proportionnelle à la quantité de solides contenus dans la boue, toutefois cette usure par "Wash out" peut être réduite en apportant une métallisation dure sur la surface d'attaque de l'outil.

B-Matrix body :

➤ **Les avantages :**

- La très haute résistance à l'abrasion du corps qui est en carbure de tungstène, ce qui donne une durée de vie toujours supérieure à la durée de vie cutter lui-même
- L'évidage aménagé dans le corps de l'outil pour recevoir le cutter donné.

➤ **Les inconvénients :**

- son prix qui est sensiblement plus élevé que le steel body.
- une fois utilisé, cet outil ne peut pas être réparé.
- toute la surface de cutter ne peut pas être utilisée du fait de sa position dans la matrice.

II.3.2.Le profil:

Il existe principalement trois types de profils :

- a) profil plat ou avec un faible cône intérieur
- b) profil double cône (cône intérieur très prononcé)
- c) profil parabolique.

a) Le profil plat : A utiliser en formation tendre (actuellement ces outils sont généralement des outils à lames qui ont un nombre de cutter limités).

b) Le profil double cône : Ce type de profil étudié généralement pour les formations plus dures, en effet ce a l'avantage d'augmenter le cutter. De plus l'usure des cutters est plus homogène pour les profils en pointe de cône que dans les autres types de profils.

c) Le profil parabolique : Ce profil a les mêmes caractéristiques que les profils double cône mais en plus il est plus facile de diriger avec un moteur de fond dans un puits dévié. Ce profil donne une grande surface sur laquelle un nombre important d'élément peut être fixé.

II.3.3.Densité des cutters:

Il est possible d'effectuer des mesurés qualitative de la performance d'un outil sur les différentes densités de distribution des cutters. En général, lorsque la densité des cutters augmente, la vitesse de pénétration diminue. Si on augmente la densité des cutters d'un outil PDC, on réduit la charge effective par cutter.

II.3.4.Angles caractéristiques des pastilles PDC :

On définit trois angles caractéristiques sur les pastilles PDC :

1. L'angle de coupe W_c (back rake angle).
2. L'angle de dépouille W_d (clearance angle).
3. L'angle lateral W_s (Side rake angle).

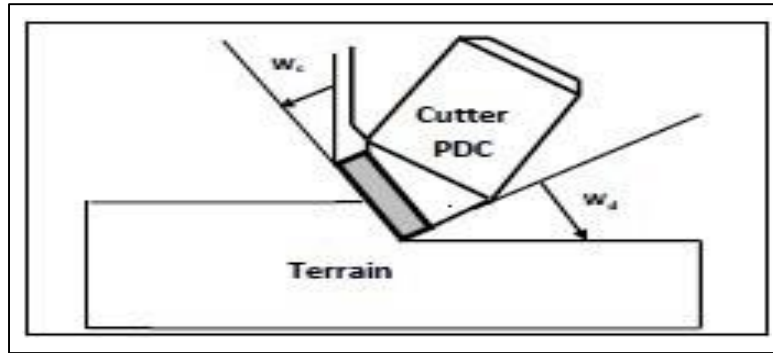


Fig 10: Angles caractéristiques d'un PDC

II.3.5. Longueur utile L_d :

La distance entre la matrice du trépan et le fond de la saignée creusée par le PDC est appelé "Longueur utile" (exposure). Si L_d est la distance mesurée suivant la verticale entre la matrice du trépan et le centre de la pastille de diamètre D . Alors le rapport L_d/D est appelé L_{edge} .

Ces deux paramètres sont d'une importance capitale dans le système d'évacuation des copeaux et du nettoyage du puits et sur les efforts latéraux.

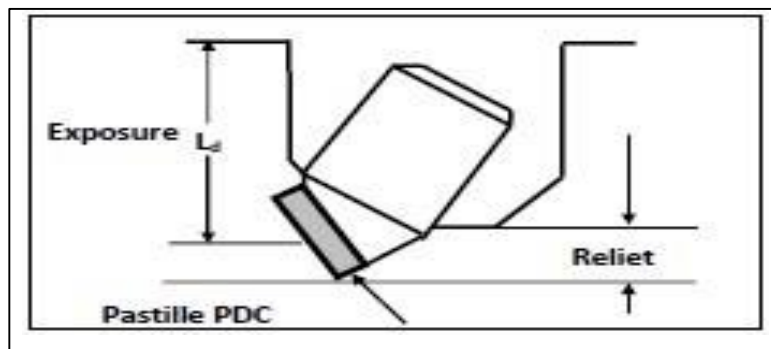


Fig 11: Longueur utile L

III- choix des outils de forage :

Il existe un vaste choix d'outils de forage. Cependant ces outils dans leur grande majorité ont été conçus pour forer des puits verticaux. Or il existe des différences majeures entre le travail demandé à un outil dans un puits vertical et celui dans un puits horizontal.

Avant de commencer un puits, un programme doit être fait. Ce programme ne devra être modifié lors de l'approfondissement du puits que si les conditions rencontrées ne correspondent pas.

III.1. Choix économique des outils

Choisir le bon outil est un problème qui se répète mainte fois au cours de forage d'un puits. Ce caractère répétitif ne doit pas faire sous-estimer l'importance du choix de chaque outil. Le prix de l'outil lui-même et la maintenance nécessaire pour l'amener en position de travail engagent déjà plusieurs milliers de dinars. Puis, la performance de l'outil elle-même va augmenter considérablement la valeur de la décision prise lors du choix de l'outil [2].

Chapitre II : Etude technique

I - PRESENTATION DU CHAMP DE HASSI TARFA

I-1 cadre géographique du champ de Hassi Tarfa

Le champ de Hassi TARFA est un champ périphérique de Hassi Messaoud. Il correspond à une structure satellite qui s'étend vers le sud, se trouvant dans le bloc N° 427 et occupant globalement la partie de transition du permis de Hassi-Dzabat et le champ de Hassi Messaoud. Il est limité par :

- Les parallèles 31° et 32° Nord.
- Les méridiens 6° et 7° Est.

La structure de Hassi TARFA est située dans la province triasique, au sud du gisement de Hassi Messaoud sur la bordure de trend El Gassi- El Agreb-Hassi Messaoud, (Fig .1).

Le champ de Hassi TARFA est limité par:

- Le champ de Hassi Messaoud vers le Nord et le Nord-Est.
- Structure anticlinale de Hassi D'zabat, vers l'Ouest
- A l'Est est situé le champ de Mesdar.
- Au Sud on a le champ d'El Gassi.

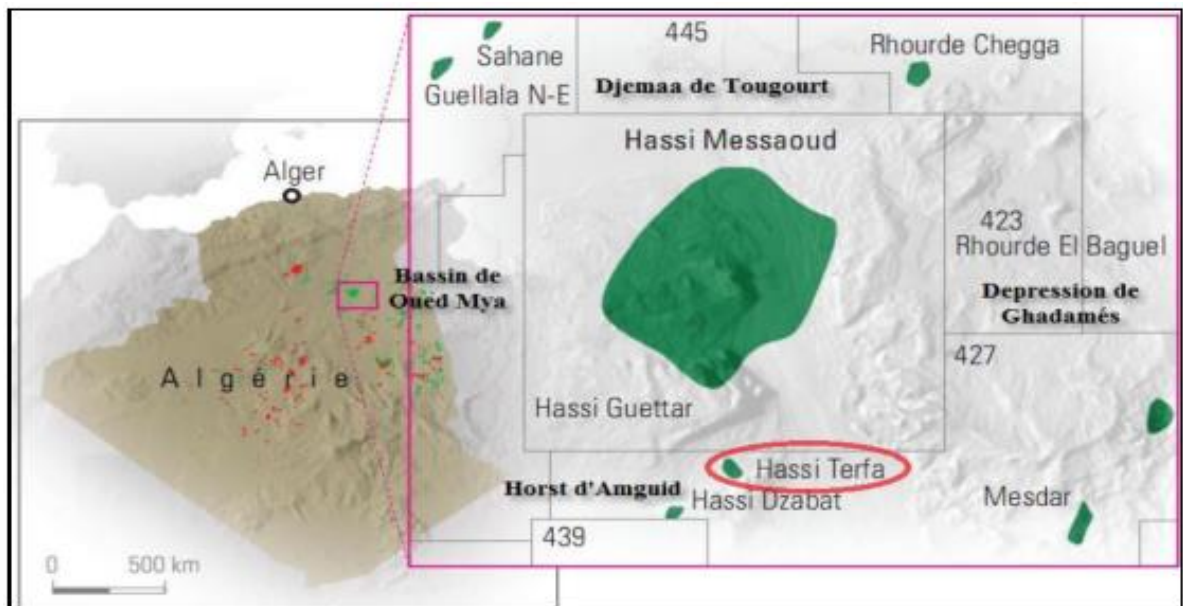


Fig.12: Situation du champ de Hassi TERFA (Dép.PRO/SONATRACH 2007).

I.2.Description lithologique et Coupe Stratigraphique :

La coupe litho-stratigraphique, est comme suit: [5]

| AGES | | Lithologie | Ep. | Description lithologique | |
|--------------|----------------------|--------------|------|--|---|
| MIO-PLIOCENE | | | | Sable silico-carbonaté | |
| EOCENE | | | | Calcaire dolomitique | |
| CRETACE | SENONIEN | Carbonaté | 180 | Calcaire dolomitique, passées d'anhydrites | |
| | | Anhydritique | 200 | Dolomie, anhydrite et calcaire blanc | |
| | | Salifère | 134 | Sel massif avec des passées d'argiles dolomitiques | |
| | TURONIEN | | | 116 | Calcaire avec des passées d'argiles à la base |
| | CENOMANIEN | | | 179 | Anhydrite, dolomie parfois argileuse |
| | ALBIEN | | | 300 | Grès argileux à silico-argileux |
| | APTIEN | | | 24 | Dolomie calcaire avec des passées de marne |
| | BARREMIEN | | | 260 | Grès, argile silto-sableuse et dolomie |
| | NEOCOMIEN | | | 208 | Argile carbonatée avec des passées de grès |
| | MALM | | | 205 | Argile silteuse, grès argileux et anhydrite |
| JURASSIQUE | DOGGER | Argileux | 220 | Argile dolomitique, grès argileux et anhydrite | |
| | | Lagunaire | 79 | Anhydrite, passées d'argile et dolomie | |
| | LIAS | LD1 | 38 | Anhydrite, passées d'argile dolomitique | |
| | | LS1 | 110 | Sel massif, anhydrite et passées d'argile | |
| | | LD2 | 55 | Anhydrite, argile carbonatée, dolomie et marne | |
| | | LS2 | 58 | Sel massif avec des passées d'argile | |
| | | Horizon B | 27 | Calcaire argileux, argile et anhydrite | |
| | | TS1 | | | 100 |
| | TS2 | | | 140 | Sel massif, anhydrite et argile |
| | TS3 | | | 175 | Sel massif avec passées d'argile |
| Argileux | | | 50 | Argile silteuse à des passées de sel | |
| Eruptif | | | 0-90 | Roches éruptives à passées d'argile | |
| TRIAS | Grès de Ouargla | | 50 | Argile silteuse avec des passées de grès | |
| | Quartzites Hamra | | 90 | Grès silico-argileux à quartzite | |
| | Grès d'El Atchane | | 18 | Grès glauconieux, passées d'argile | |
| | Argiles d'El Gassi | | 85 | Argile à passées de grès | |
| | Zone des alternances | | 22 | Alternance d'argiles et de grès | |
| ORDOVICIEN | Ri | | 40 | Grès isométriques avec pyrite et lignite | |
| | Ra | | 120 | Grès anisométrique avec joints d'argiles | |
| | R2 | | 100 | Grès microconglomératique | |
| | R3 | | 370 | Grès grossier, conglomératique | |
| | INFRA-CAMBRIEN | | 45 | Grès argileux rouge | |
| CAMBRIEN | | | | | |
| SOCLE | | | | Granite porphyroïde rose | |

Fig.13: Colonne stratigraphique type de la région Hassi TARFA (PED/sonatrach).

II.1. Prix du mètre foré :

Le seul critère permettant de comparer les performances de deux outils est le prix du mètre réalisé qui se définit ainsi :

$$P_m = \frac{P_o + P_h(T_f + T_m)}{M}$$

P_m : le prix de mètre foré (\$/m)

P_o : le prix de l'outil (\$)

P_h : le prix de l'heure de l'appareil de forage (\$/h)

T_m : le temps de manœuvre (h)

T_f : le temps forage (h)

M : profondeur forée

II.2. Avancement commercial

Considérons l'inverse du prix du mètre, tel qu'il vient d'être défini :

$$\frac{1}{P_m} = \frac{M}{P_o + P_h(T_m + T_f)}$$

Chaque terme de cette égalité par le prix de l'heure de sonde P_h qui est constant, il vient :

$$\frac{P_h}{P_m} = \frac{M}{\frac{P_o}{P_h} + (T_m + T_f)}$$

Cette valeur est inversement proportionnelle au prix du mètre, qui sera minimal lorsque l'avancement commercial sera maximal.

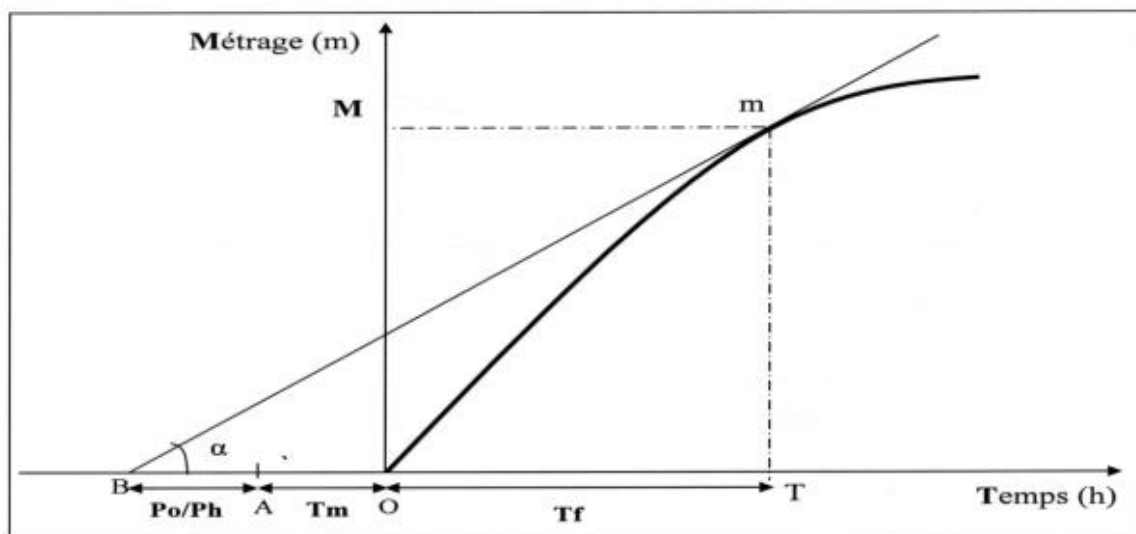


Fig14: Courbe d'avancement commercial

II. 3.Choix de l'outil par la méthode de Break Even

Avant de décider de l'usage d'un nouvel outil de forage, il est nécessaire de faire une étude économique pour déterminer la performance qu'il faut atteindre, en vue d'améliorer le prix de revient au mètre foré, par rapport à l'outil que l'on connaît.

Le Break Even est une méthode qui permet d'évaluer la rentabilité d'un ou plusieurs outils par rapport à un ou plusieurs autres outils dont la performance est connue. Elle est particulièrement intéressante sur site, en cours de forage, où il est possible à chaque instant d'avoir une idée de la rentabilité de l'outil qui fore [10].

Principe

La formule couramment employée pour calculer le prix d'un mètre foré par un outil est la suivante :

$$P_m = \frac{P_o + P_h(T_m + T_f)}{M}$$

Le premier outil A à effectuer une performance, dont tous les éléments sont connus. Quelle devra être celle d'un second outil B pour que celui-ci soit plus économique ?

L'outil B sera plus rentable que l'outil A dès lors que $P_{mB} < P_{mA}$.

Pour B, le seuil de rentabilité sera atteint lorsque $P_{mB} = P_{mA}$, donc :

$$P_{mA} = \frac{P_{oB} + P_h(T_{mB} + T_{fB})}{M_B} \Leftrightarrow M_B = \frac{P_{oB} + P_h(T_{mB} + T_{fB})}{P_{mA}} \Rightarrow M_B = \frac{P_h}{P_{mA}} T_{fB} + \frac{(P_{oB} + P_h T_{mB})}{P_{mA}}$$

Il s'agit ici d'une équation du type $y = ax + b$

Avec : $Y = MB$: longueur forée par l'outil B au seuil de rentabilité.

$X = Tf$: temps du forage de l'outil B au seuil de rentabilité.

$$\mathbf{b} = \frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_{mA}} \quad \text{et} \quad \mathbf{a} = \frac{P_h}{P_{mA}}$$

Dans un repère cartésien où figurent en ordonnée la longueur forée (M) et en abscisse le temps de forage (Tf), le seuil de rentabilité d'un outil par rapport à un autre est donc une droite.

Pour définir une droite, deux points suffisent :

$$\text{Point } x : y = 0 \Rightarrow x = -b/a = - \frac{PoB + Ph TmB}{Ph}$$

$$\text{Point } y : x = 0 \Rightarrow y = b = \frac{PoB + Ph TmB}{PmA}$$

Dans le cas de l'étude de plus de 02 outils, il faut comparer les performances 02 par 02 et éliminer l'outil le moins rentable afin de sélectionner l'outil qui donne les meilleures performances avec un cout minimum.

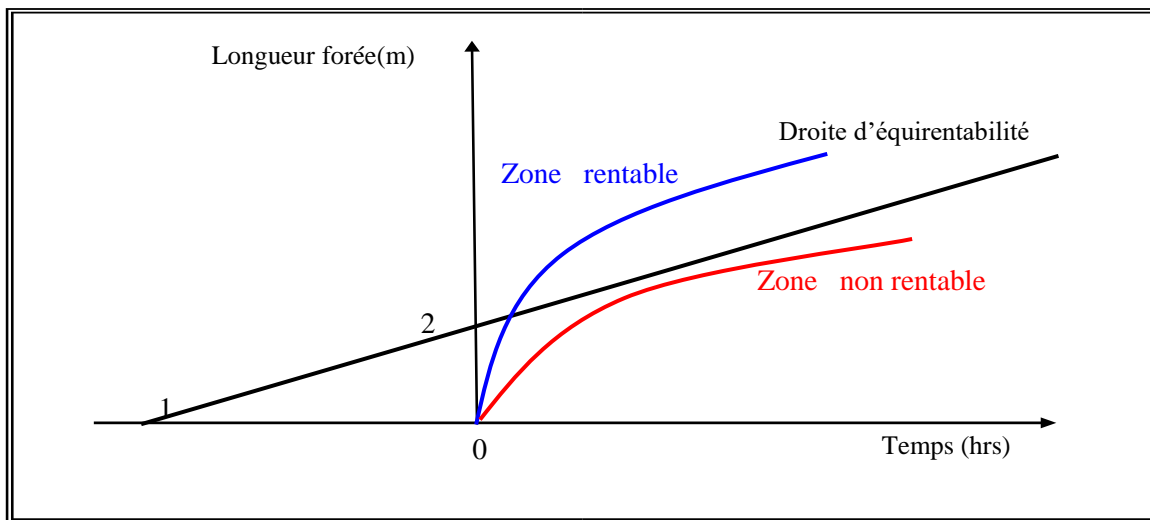


Fig.15 : la courbe de rentabilité par la méthode de Break even

III. ETUDE DE PERFORMANCE DES OUTILS « PDC »

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les performances de 04 outils de forage (MGR381VP, FX84R, FMH3855ZR, MKS58DG) utilisés dans la phase de 12''1/4 le champ de HTF, afin de choisir l'outil le plus fiable, celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré le plus bas.

Tableau .1 : la performance des outils PDC

| Formations | Bit-1 MGR381VP HTF-10 | | | Bit-2 FX84R HTF-13 | | | Bit-3 FMH3855ZR HTF-11 | | | Bit-4 MKS58DG HTF-15 | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------|---------------|--------------------------|--------------|---------------|------------------------------|--------------|---------------|----------------------------|--------------|------------|
| | Depth IN | Depth OUT | ROP (m/hr) | Depth IN | Depth OUT | ROP (m/hr) | Depth IN | Depth OUT | ROP (m/hr) | Depth IN | Depth OUT | ROP (m/hr) |
| Senonian Anhydrite | 495 | 667 | 34,8178138 | 489 | 674 | 33,6363636 | 478 | 643 | 35,637149 | 507 | 668 | 38,151659 |
| Senonian Salifere | 667 | 789 | 47,1042471 | 674 | 789 | 55,8252427 | 643 | 773 | 34,946237 | 668 | 790 | 60,39604 |
| Turonian | 789 | 911 | 41,9243986 | 789 | 913 | 41,1960133 | 773 | 898 | 36,764706 | 790 | 911 | 46,360153 |
| Cenomanian | 911 | 1084 | 37,0449679 | 913 | 1100 | 41,0087719 | 898 | 1077 | 37,447699 | 911 | 1061 | 44,91018 |
| Albian | 1084 | 1432 | 64,0883978 | 1100 | 1423 | 77,6442308 | 1077 | 1430 | 77,924945 | 1061 | 1432 | 79,273504 |
| Aptian | 1432 | 1457 | 17,1232877 | 1423 | 1448 | 21,3675214 | 1430 | 1453 | 12,041885 | 1432 | 1455 | 13,529412 |
| Barremian | 1457 | 1753 | 54,5119705 | 1448 | 1769 | 50 | 1453 | 1722 | 58,099352 | 1455 | 1688 | 70,180723 |
| Neocomian | 1753 | 1977 | 34,5146379 | 1769 | 1973 | 35,4782609 | 1722 | 1951 | 23,201621 | 1688 | 1943 | 24,951076 |
| Malm | 1977 | 2206 | 29,973822 | 1973 | 2196 | 26,2352941 | 1951 | 2139 | 14,932486 | 1943 | 2168 | 17,482517 |
| Dogger Argileux | 2206 | 2420 | 17,05 | 2196 | 2404 | 20,8416834 | 2139 | 2336 | 14,348143 | 2168 | 2393 | 11,917373 |
| Dogger Lagunaire | 2420 | 2470 | 5,38793103 | 2404 | 2456 | 9,42028986 | 2336 | 2391 | 4,8118985 | 2393 | 2444 | 5,0049068 |

Tableau 12 Etude technique des outils PDC

| | MGR381VP | | | | FX84R | | | | FMH3855ZR | | | | MKS58DG | | | |
|--------------------|----------------------|---------------|---------|----------------|--------|---------------|---------|---------------|-----------|---------------|---------|----------------|---------|---------------|---------|----------------|
| | TD (m) | TD cumulé (m) | Tf (hr) | Tf cumulé (hr) | TD (m) | TD cumulé (m) | Tf (hr) | Tfcumulé (hr) | TD (m) | TD cumulé (m) | Tf (hr) | Tf cumulé (hr) | TD (m) | TD cumulé (m) | Tf (hr) | Tf cumulé (hr) |
| | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 |
| Senonian Anhydrite | 172 | 172 | 4,94 | 4,94 | 185 | 185 | 5,5 | 5,5 | 165 | 165 | 4,63 | 4,63 | 161 | 161 | 4,22 | 4,22 |
| Senonian Salifere | 122 | 294 | 2,59 | 7,53 | 115 | 300 | 2,06 | 7,56 | 130 | 295 | 3,72 | 8,35 | 122 | 283 | 2,02 | 6,24 |
| Turonian | 122 | 416 | 2,91 | 10,44 | 124 | 424 | 3,01 | 10,57 | 125 | 420 | 3,4 | 11,75 | 121 | 404 | 2,61 | 8,85 |
| Cenom-anian | 173 | 589 | 4,67 | 15,11 | 187 | 611 | 4,56 | 15,13 | 179 | 599 | 4,78 | 16,53 | 150 | 554 | 3,34 | 12,19 |
| Albian | 348 | 937 | 5,43 | 20,54 | 323 | 934 | 4,16 | 19,29 | 353 | 952 | 4,53 | 21,06 | 371 | 925 | 4,68 | 16,87 |
| Aptian | 25 | 962 | 1,46 | 22 | 25 | 959 | 1,17 | 20,46 | 23 | 975 | 1,91 | 22,97 | 23 | 948 | 1,7 | 18,57 |
| Barremian | 296 | 1258 | 5,43 | 27,43 | 321 | 1280 | 6,42 | 26,88 | 269 | 1244 | 4,63 | 27,6 | 233 | 1181 | 3,32 | 21,89 |
| Neocomian | 224 | 1482 | 6,49 | 33,92 | 204 | 1484 | 5,75 | 32,63 | 229 | 1473 | 9,87 | 37,47 | 255 | 1436 | 10,22 | 32,11 |
| Malm | 229 | 1711 | 7,64 | 41,56 | 223 | 1707 | 8,5 | 41,13 | 188 | 1661 | 12,59 | 50,06 | 225 | 1661 | 12,87 | 44,98 |
| Dogger Argileux | 214 | 1925 | 12,551 | 54,111 | 208 | 1915 | 9,98 | 51,11 | 197 | 1858 | 13,73 | 63,79 | 225 | 1886 | 18,88 | 63,86 |
| Dogger Lagunaire | 50 | 1975 | 9,28 | 63,391 | 52 | 1967 | 5,52 | 56,63 | 55 | 1913 | 11,43 | 75,22 | 51 | 1937 | 10,19 | 74,05 |
| | ROPmoy (m/hr) | | | 31,156 | | | | 34,734 | | | | 25,432 | | | | 26,158 |
| | Pm (\$/m) | | | 74,812 | | | | 70,580 | | | | 85,172 | | | | 83,464 |

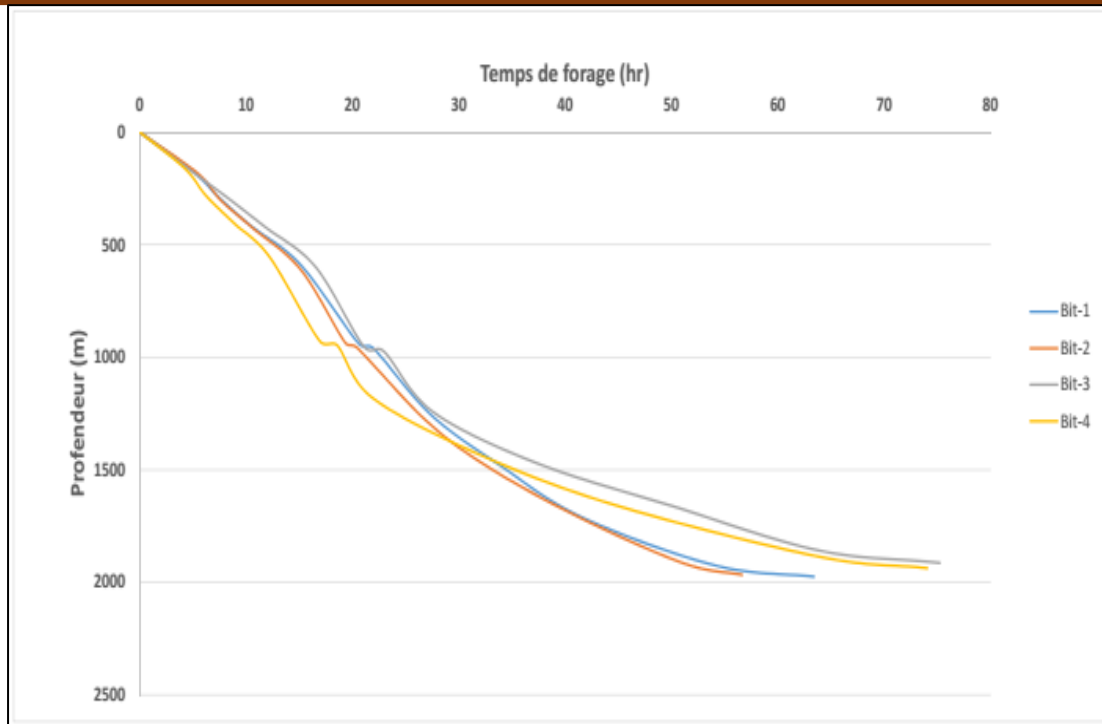


Figure.16: Courbe d'avancement des outils de forage

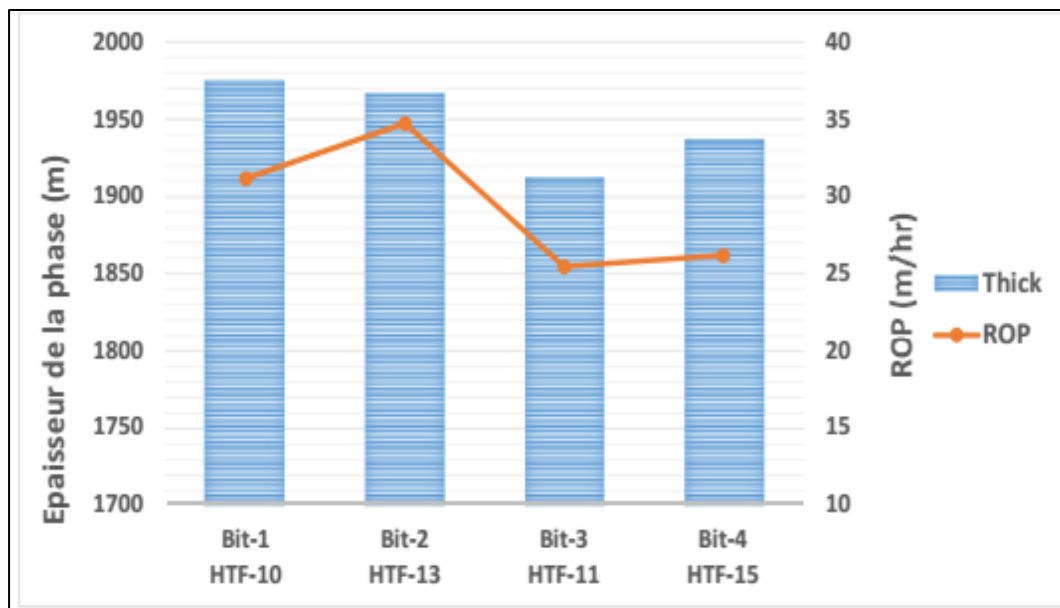


Figure.17: variation des profondeurs totales forées entre les outils PDC et les ROPmoy correspondantes

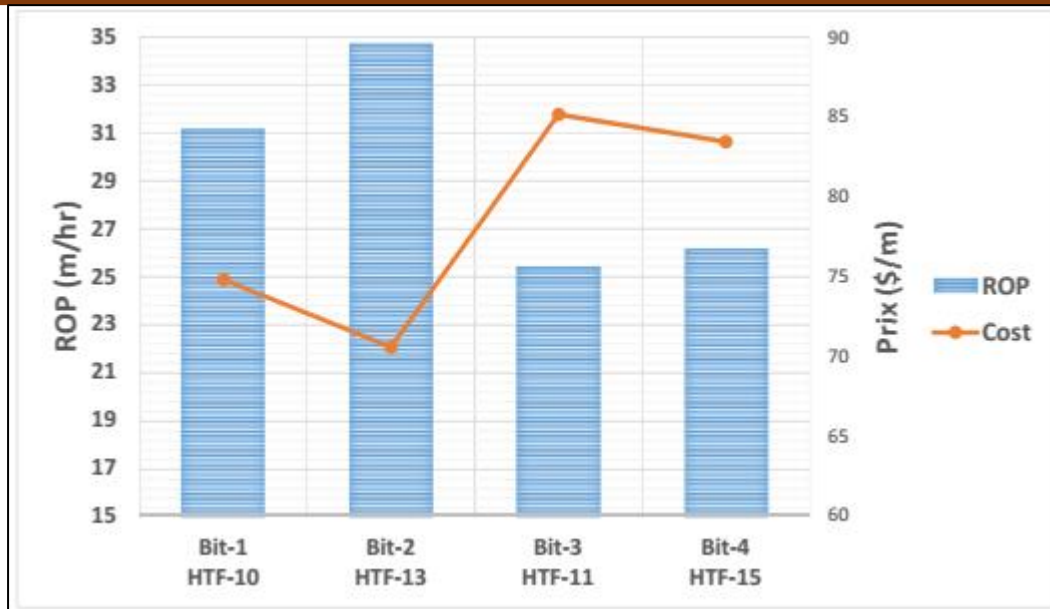


Figure.18: variation des ROPmoy et Pm

Résultats et commentaires :

A travers des analyses effectuées sur les 4 puits forés dans la région de Hassi Tarfa nous avons pu remarquer que les vitesses d'avancement moyennes enregistrées et les prix moyen de mètre foré calculés pour les différents types d'outils, sont comme suit :

➤ **L'Outil MGR381VP :**

Elle a **ROP moy =31,156 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **74,8 \$/m**.

➤ **L'Outil FX84R:**

Elle a **ROP moy =34,734 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **70,5\$/m**.

➤ **L'Outil FMH3855ZR:**

Elle a **ROP moy =25,432 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **85,1 \$/m**.

➤ **L'Outil MKS58DG:**

Elle a **ROP moy =26,158 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **83,4\$/m**.

III.2. Calcul de prix de mètre foré : Le but de cette méthode choisir l'outil qui donnera le prix de revient du mètre foré le plus faible et économiques :

$$P_m = \frac{P_0 + P_h(T_f + T_m)}{M} \rightarrow M = \frac{P_h}{P_m} T_f + \left(\frac{P_0}{P_m} + \frac{P_h}{P_m} T_m \right)$$

C'est une équation de la forme : $y = A x + B$ qui représente une droite ne passant pas par l'origine, avec :

$$A = \frac{P_h}{P_m} \quad \text{et} \quad B = \frac{P_0}{P_m} + \frac{P_h}{P_m} T_m$$

Calcul des abscisses et des ordonnées

- a- L'abscisse : $y=0 \Rightarrow x = -\frac{B}{A}$ D'où $x = -T_m - \frac{P_0}{P_h} x$
- b- Les ordonnées : $x=0 \Rightarrow y = B$ D'où $y = \frac{P_0 + P_h \times T_m}{P_m}$

Les données sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau .3: Prix de mètre foré

| L'outil | Ph | P ₀ | T _m | T _f | M | P _m |
|------------------|------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|
| MGR381VP | 1310 | 55000 | 7,412 | 63,39 | 1975 | 74,811 |
| FX84R | 1310 | 55000 | 7,362 | 56,63 | 1967 | 70,57 |
| FMH3855ZR | 1310 | 55000 | 7,172 | 75,22 | 1913 | 85,17 |
| MKS58DG | 1310 | 55000 | 7,377 | 74,05 | 1937 | 83,46 |

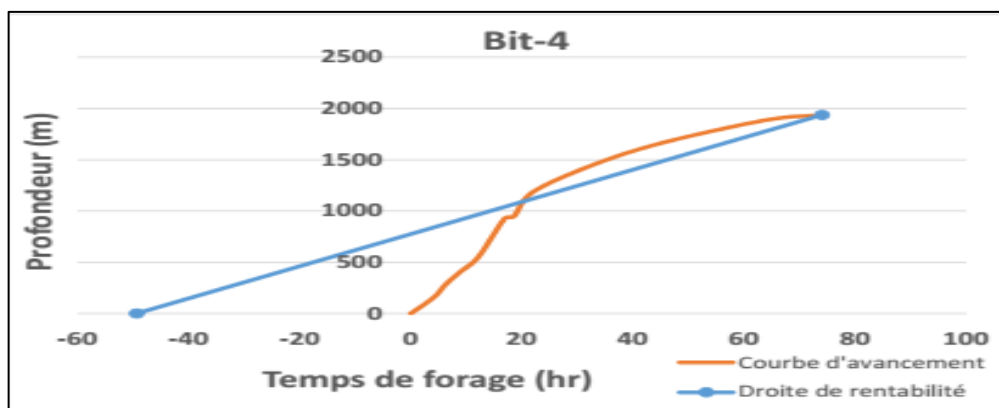
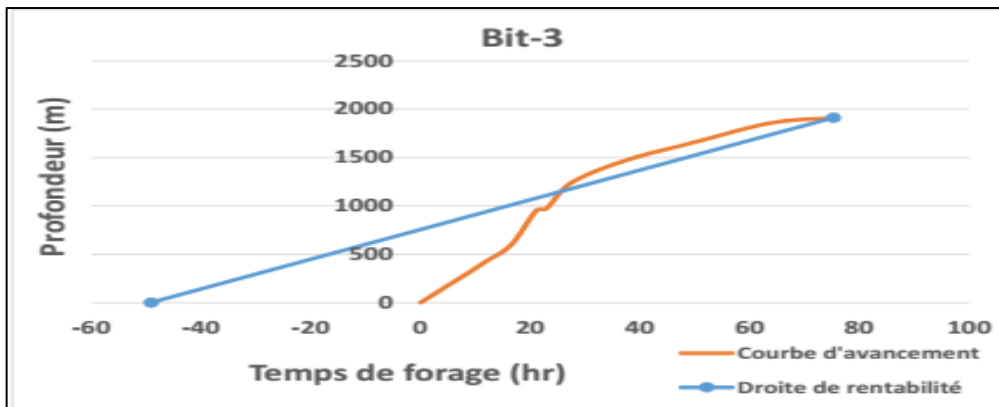
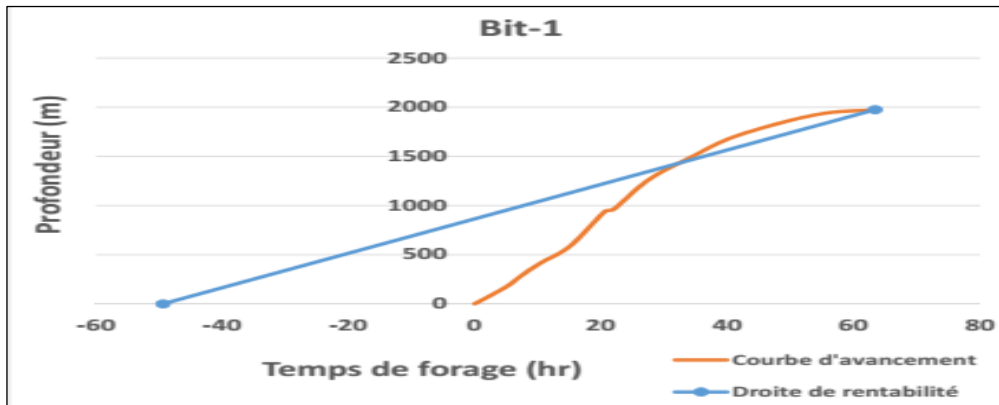
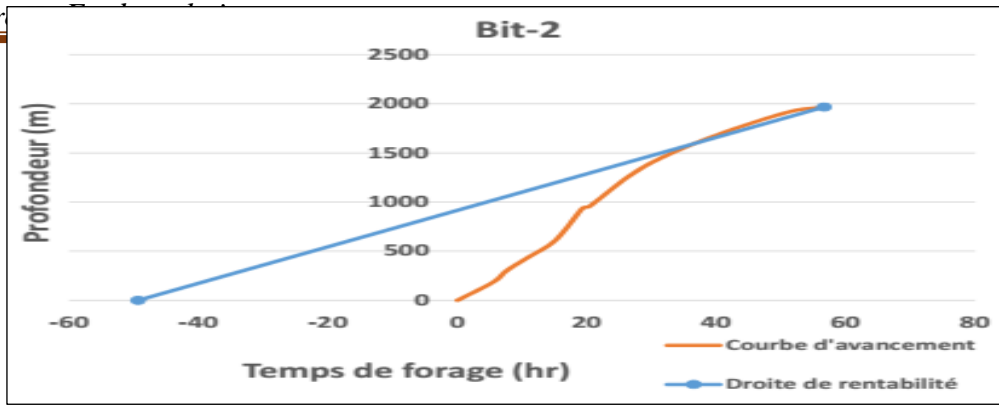


Figure.19: Les courbes d'avancement des outils de forage

$$Bm = \frac{M}{\frac{P_0}{P_h} + T_m + T_f}$$

Le prix du mètre sera minimal ou l'avancement commerciale maximale, lorsque la pente de la droite **Bm** sera maximale ($\text{tga} = \mathbf{Bm}$), c'est-à-dire lorsque cette droite sera tangente à la courbe d'avancement.

Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau .4: les données de la pente Bm

| | MGR381VP | | FX84R | | FMH3855ZR | | MKS58DG | |
|---------------|-----------------|--------|--------------|-------|------------------|-------|----------------|-------|
| x | -49,397 | 63,391 | -49,34 | 56,63 | -49,157 | 75,22 | -49,362 | 74,05 |
| y | 0 | 1975 | 0 | 1967 | 0 | 1913 | 0 | 1937 |
| PenteB | 17,511 | | 18,561 | | 15,381 | | 15,695 | |

Interprétation

Après les études de la courbe d'avancement pour les quatre outils on trouve:

Pour l'outil **MGR381VP** son $P_m = 74,81$ (\$/m) et sa pente **Bm=17,51**

Pour l'outil **FX84R** son $P_m = 70,57$ (\$/m) et sa pente **Bm=18,56**

Pour l'outil **FMH3855ZR** son $P_m = 85,17$ (\$/m) et sa pente **Bm=15,38**

Pour l'outil **MKS58DG** son $P_m = 83,46$ (\$/m) et sa pente **Bm=15,69**

D'après les graphes précédents et les résultats mentionnés sur les tableaux on voit que l'outil PDC (**FX84R**) est plus performant de point de vue avancement ce qui engendre une réduction du prix du métrage foré par rapport aux autres d'outils.

III.3. Méthode de Break Even

Nous voulons comparer la rentabilité des outils PDC, les données sont mentionnées dans le tableau précédent (**Tab.n°03**)

L'outil B sera plus rentable que l'outil A dès lors que $P_{mB} < P_{mA}$

Pour B, le seuil de rentabilité sera atteint lorsque $P_{mB} = P_{mA}$, donc :

$$P_{mA} = \frac{P_0 + P_h(T_{fB} + T_{mB})}{M_A} \Rightarrow M_B = \frac{P_0 + P_h(T_{fB} + T_{mB})}{P_{mA}}$$

Ce qui donne :

$$M_B = \frac{P_h}{P_{mA}} T_{fB} + \left(\frac{P_0 + P_h}{P_{mA}} T_{mB} \right)$$

EX : L'équation de la droite de rentabilité de l'outil (**MGR381VP**) s'écrit :

~~$$AN: M_B = \frac{55000 + 1310 (7,1725)}{70,5796518} T_{JB} + \left(\frac{55000 + 1310 (7,1725)}{70,5796518} \right) \rightarrow M_B = 18,56 T_{JB} + 916,842$$~~

Les conditions initiales :

$$T_f = 0 \Rightarrow M = 916,842$$

$$T_f = -49,397 \Rightarrow M = 0$$

Les données des courbes de rentabilité des outils sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau .5: Méthode de Break-Even

| Outils | Méthode de Break-Even | | | |
|--------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Coordonnées | Point (2) | Point (1) | Point (3) |
| 02.01 | x (hr) | 0 | -49,397 | 80 |
| | y (m) | 916,842 | 0 | 2401,69 |
| 02.03 | x (hr) | 0 | -49,157 | 80 |
| | y (m) | 912,387 | 0 | 2397,23 |
| 02.04 | x (hr) | 0 | -49,362 | 80 |
| | y (m) | 916,192 | 0 | 2401,04 |

Droite d'équi-rentabilité est un Bit-2

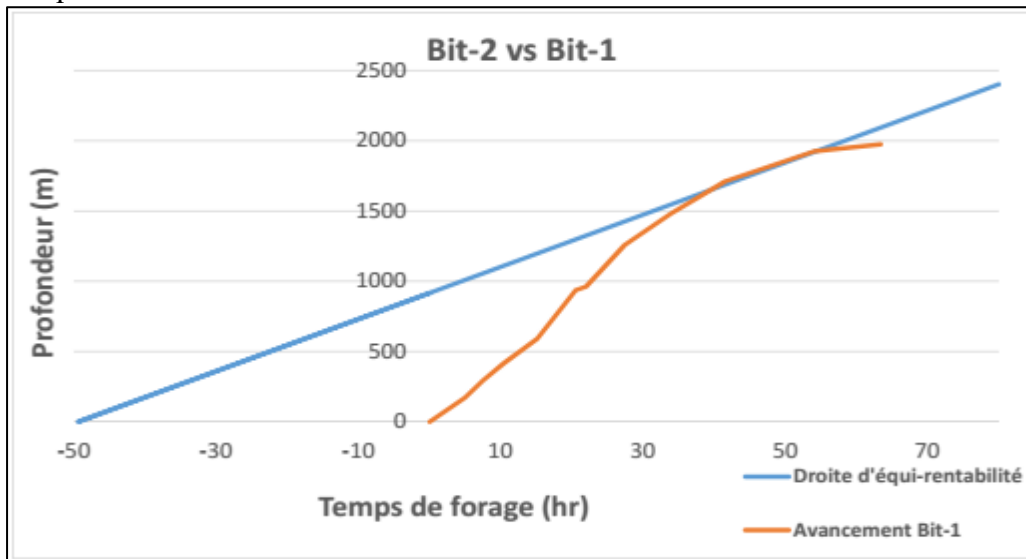


Fig.20 : la courbe de rentabilité par la méthode de Break even

Le point d'intersection entre la droite (XY) et la courbe d'avancement représente une performance à réaliser par l'outil (**MGR381VP**) pour que son coût au mètre foré soit égal au coût du mètre foré par l'outil (**FX84R**) (**PmB = PmA**).

Chapitre II : Etude technique
des performances pour lesquelles l'outil (MGR381VP) ne sera pas rentable par rapport à l'outil de référence.

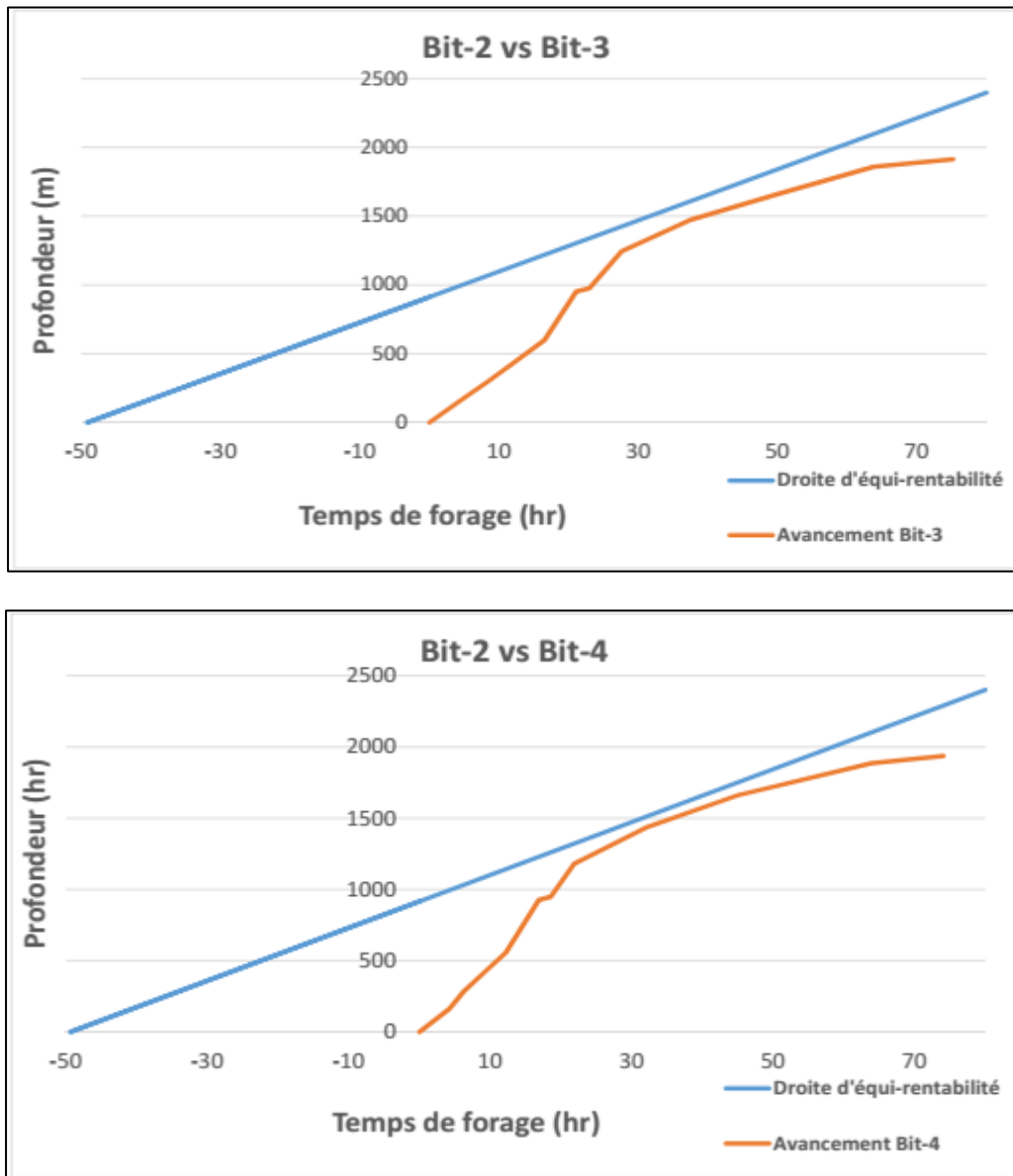


Fig.21 : les courbes de rentabilité par la méthode de Break even

Après le traçage des courbes de Break Even, la courbe d'avancement des outils (MKS58DG) et (FMH3855ZR) sont situées au-dessous de la droite de rentabilité, donc ils sont non rentables.

Conclusion

A travers des revues bibliographiques, nous avons pu remarquer que la 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.

Une gamme très variées des outils disponibles sur le marché, donc Il est nécessaire de faire un choix judicieux des outils pour optimiser la vitesse d'avancement.

La meilleure procédure pour sélectionner l'outil le mieux adapté à une formation ou à une phase de forage est d'établir des corrélations entre les outils utilisés, les paramètres appliqués, l'usure des outils et les caractéristiques des roches.

L'étude liée au choix des outils de forage dans la phase 12''1/4 sur champ de HASSI TARFA nous a permis de tirer les résultats obtenus relatifs à la vitesse d'avancement (ROP) (**34,734 m/h**) et le prix de mètre foré (**70,57 (\$/m)**) montrent que l'outil PDC de la **Halliburton FX84R** est le plus performant.

Références

- [1] Cours de forage - Paramètres et contrôle du forage -
- A .CHOQUIN Publication IFP Edition Octobre 1975
- [2] Cours de Forage –Section Ingénieur d'état-
- Dr ABDERRAMANE MELLAK Année 2006/2007
- [3] Document <<SONATRACH>> -Module M1 Formation JDF
- A.SLIMANI
- [4] Formulaire du foreur Editions TECHNIP 1974,1989.
- [5] Les outils de forage SONATRACH Division de Forage DF
- F.GRONDIN Edition Janvier 2004
- [6] Les outils de forage ENSPM Formation Industrie
- Forage –Production -Gisement Edition 1999
- [7] Techniques d'exploitation pétrolière -Le Forage -
- J.P GUYEN Editions TECHNIP 1993.