

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Ammar Telidji Laghouat
Faculté de sciences et technologies
Département génie des procédés
Filière: hydrocarbures



جامعة عمران تليجي الأغواط
Université Amar Telidji - Laghouat

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Réalisé par:

BENGHECHOUA HOUSSAM EDDINE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en hydrocarbures

Spécialité: Génie Gazier

Thème

*Etude technique pour la sélection d'un outil de forage.
Application sur la phase 12''^{1/4}
(Champs HassiTarfa)*

Membres de Jury :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>Mechraoui Omar</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>
<i>Merigui Khaled</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>
<i>Abdelmouiz Ahmed</i>	<i>MCB</i>	<i>Rapporteur</i>

Promotion: Septembre 2024

DEDICACES

A mes très chers parents

A ma femme et ma fille

A mes frères et mes sœurs

A tous ceux qui m'ont aidé dans mes études

A tous mes proches, mes amis.

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné 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 Abdelmouiz Ahmed** 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**, qui a bien accepter de présider le Jury de ce mémoire, **Mr** pour m'avoir fait l'honneur d'être examinateurs de ce travail.*

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

Enfin, je tiens à remercier vivement mes amis pour leur disponibilité, leurs encouragements durant toutes

Les phases de l'étude et leurs conseils qui m'ont beaucoup soutenus tout au long de ce travail pratique,

Qu'il prouve ici notre plus grande reconnaissance

ChapitreI:

<i>Fig. I.1 :Outils tricônes</i>	2
<i>Fig. I.2: Outils PDC</i>	3
<i>Fig. I.3 : Outils TSP</i>	3
<i>Fig .I.4: Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche</i>	4
<i>Fig. I.5: Offset inclinaison des cones</i>	4
<i>Fig .I.6: Outils PDC</i>	5
<i>Fig I7: Outil PDC Steel body</i>	5
<i>Fig I.8: Outil PDC Matrix body</i>	6
<i>Fig I.9: Principe de fonctionnement d'un outil PDC</i>	7
<i>Fig I.10: Angles caractéristiques d'un PDC</i>	9
<i>Fig I.11: Langueur utile</i>	9
<i>Fig I.12: Situation du champs de HassiTarfa</i>	11
<i>Fig I.13: Colonne stratigraphique type de la région Hassi TARFA</i>	12

ChapitreII :

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

Chapitre II

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

HTF : HassiTarfa

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

PDC : Poly cristalline diamand compact

TSP : Thermally Stable Poly crystalline

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 ($TD = \text{Depth OUT} - \text{Depth IN}$)

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Liste des figure

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale..... 1

Chapitre I: Généralités sur les outils de forage

I-1.1. Outils de forage 2

I-1.2. Différents types des outils de forage. 2

I-1.2-1. Outils à molette 2

I-1.2.2. Outils à diamants 2

I.2.2.1. Outils a diamants naturel 2

I.2.2.2.Outils à diamants synthétique 2

I-2-1.Mode de travail des outils 4

I-2.1.1. Outils tricônes 4

I-2.1.2 Outils PDC 4

I-2.1.2.1 Mode de travail des outils PDC 5

I-2.1.2.2 Principe de fonctionnement 6

I-3-Choix des outils de forage 9

I-3.1.Choix économique des outils 10

Chapitre II : Etude Technique

II-1.1-Présentation de champ de Hassi Tarfa.....	11
II-1.2-Cadre géographique du champ de HTF	11
II-1.3-Description lithologique et Coupe Stratigraphique.....	12
II-2.1-Avancement commercial.....	13
II-2.2-1.Prix de mètre fore	13
II-2.2.2Choix de l’outil par la méthode de break even	14
II-3.Etude de performance des outils PDC.....	16
II-3.1-Courbe d’avancement	19
II-3.2Calcul de prix de mètre fore.....	20
II-3.3.-Méthode de break even.....	22
Conclusion.....	25
Références	

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.1.1.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.1.2. Différents types des outils de forage

Les outils se classent en deux catégories :

I.1.2.1.Outils à molettes

Les outils tricônes sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil, 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.



FigI.1.Outils tricônes

I.1.2.2. outils diamants:

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

I.1.2.2.1. 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.

I.1.2.2.2. outils à diamant synthétique : On distingue deux types :

✓ **Outils PDC (Poly cristalline Diamond 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].

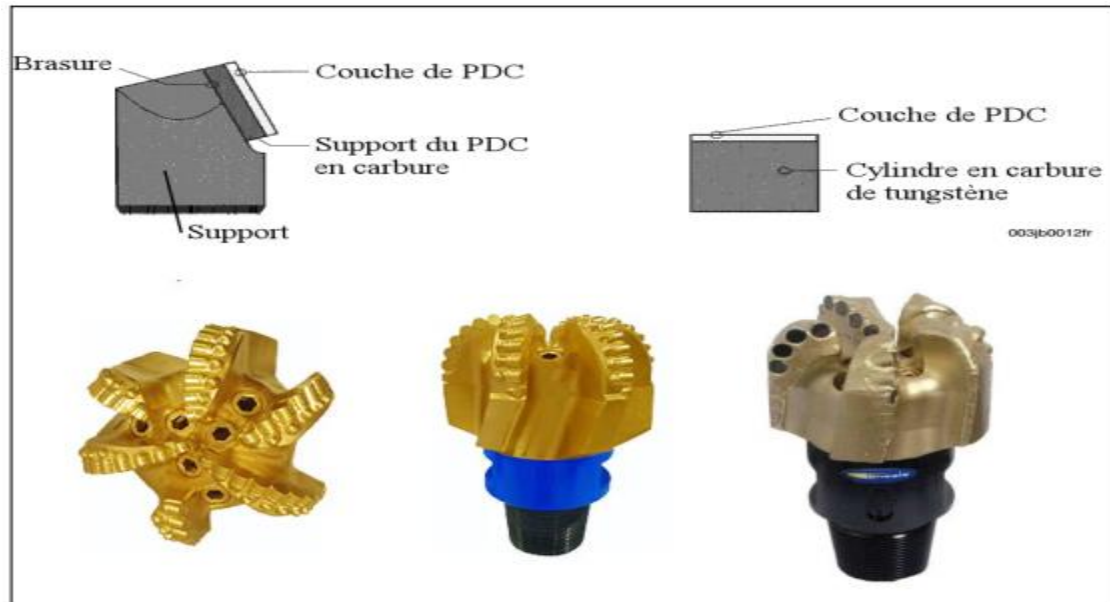


Fig.I.2.Outils PDC

✓ **Outils TSP (Poly cristallins 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 [10].



Fig.I.3.Outils TSP

I.1.3 Mode de travail des outils

I.1.3.1. 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.

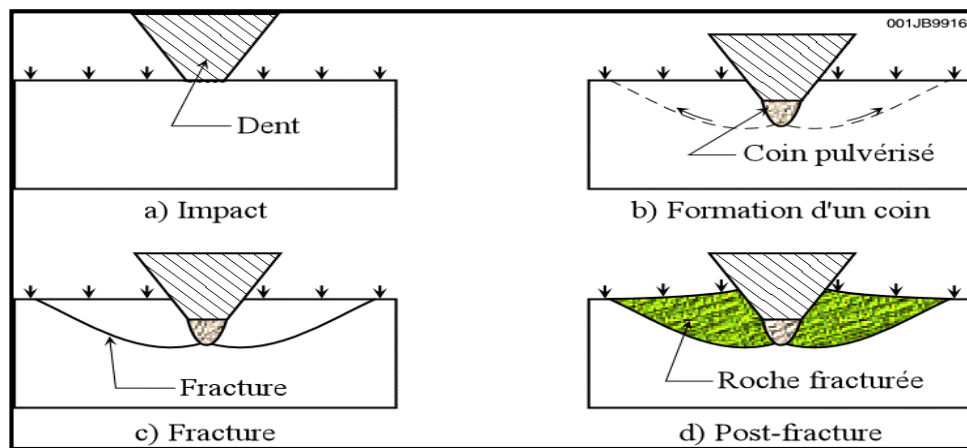


Fig.I. 4 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche

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 aux nuisible aux dents de l'outil [7].

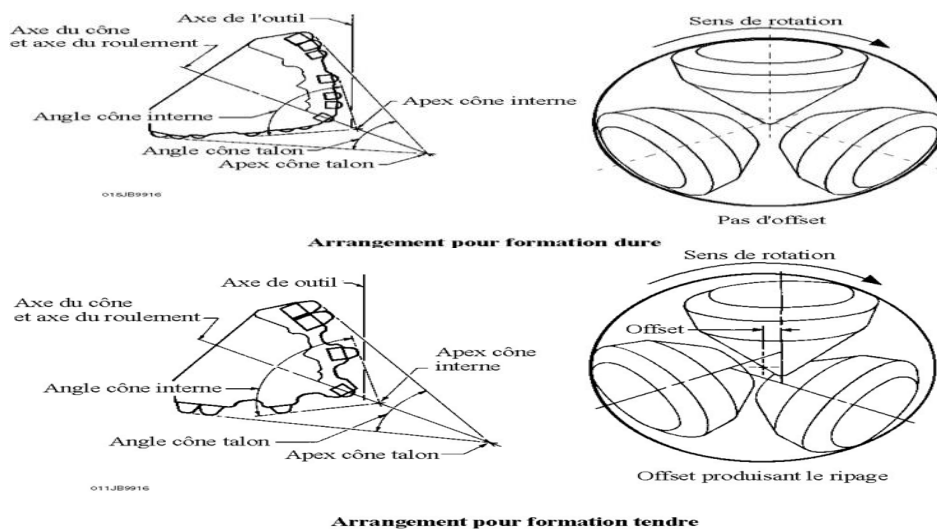


Fig I.5 : offset et inclinaison des cônes

I.1.3.2. Outils PDC :

Les outils à pastilles de diamants poly cristallins 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.

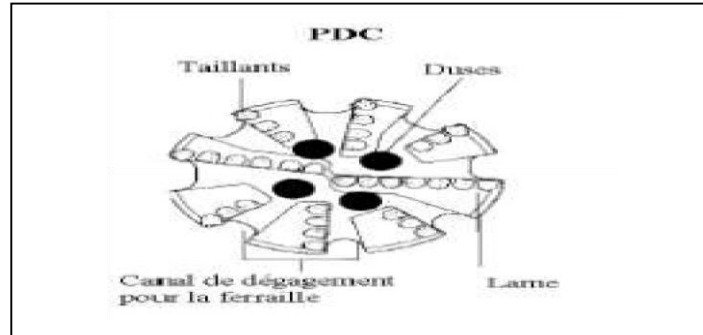


Fig.I. 6: Outils PDC

I.1.3.2.1 -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)

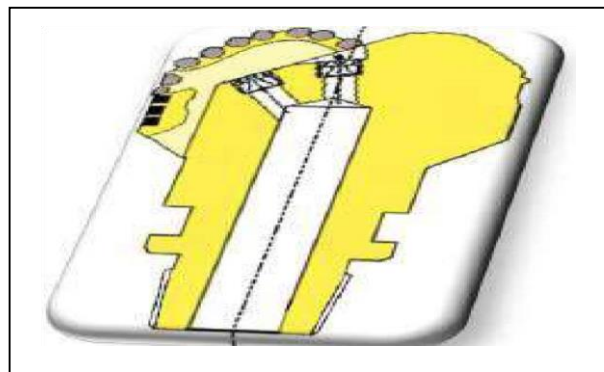


Fig.I. 7: outil PDC Steel body

I.1.3.2.2 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 I.8: outil PDC Matrix body

I.2.1 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 .

Lorsqu'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 .

I.2.2. 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.

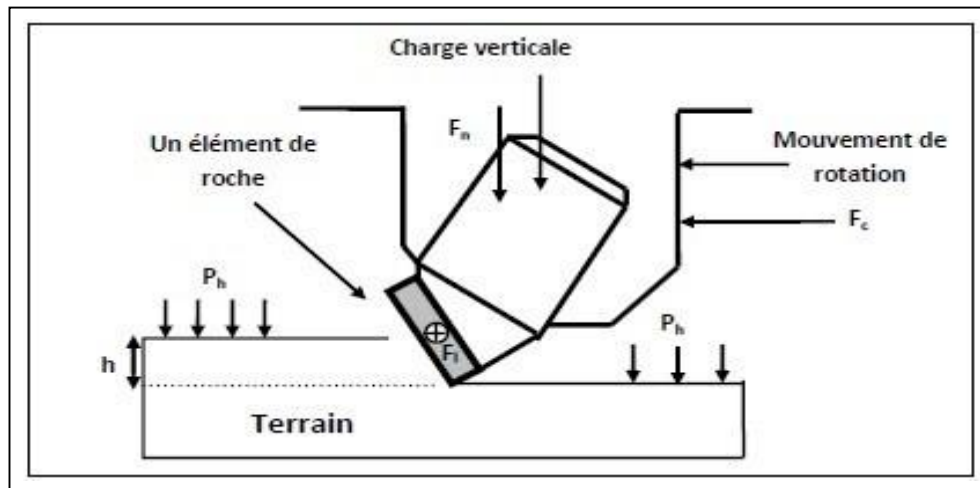


Fig I.9: Principe de fonctionnement d'un outil PDC

I.2.3. 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)

I.2.3.1 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.

I.2.3.2. 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) Profil plat : A utiliser en formation tendre (actuellement ces outils sont généralement des outils à lames qui ont un nombre de cutter limités).

b) 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) 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.

I.2.3.3.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.

I.2.4.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).

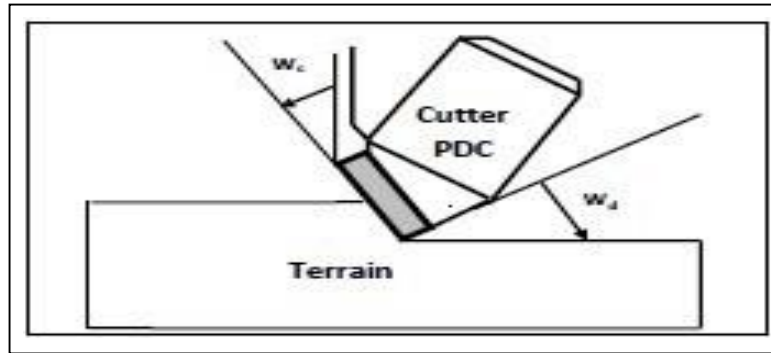


Fig I. 10: Angles caractéristiques d'un PDC

I.2.3.5. 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.

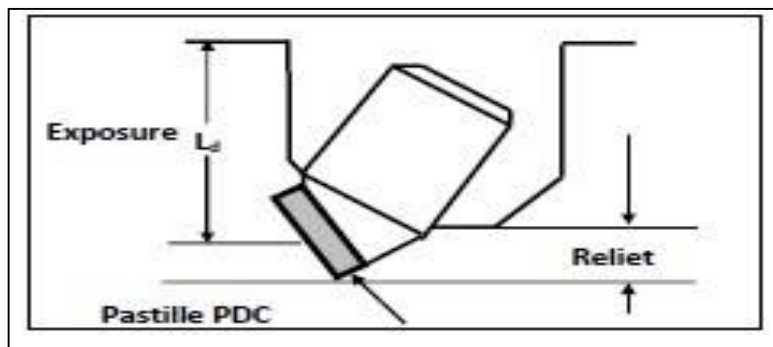


Fig I.11: Longueur utile L

I.3- 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.

I.3.1. Choix économique des outils

Choisir le bon outil est un problème qui se répète maintes 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

II.1- PRESENTATION DU CHAMP DE HASSI TARFA

II.1-1 cadre géographique du champ de HassiTarfa

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.

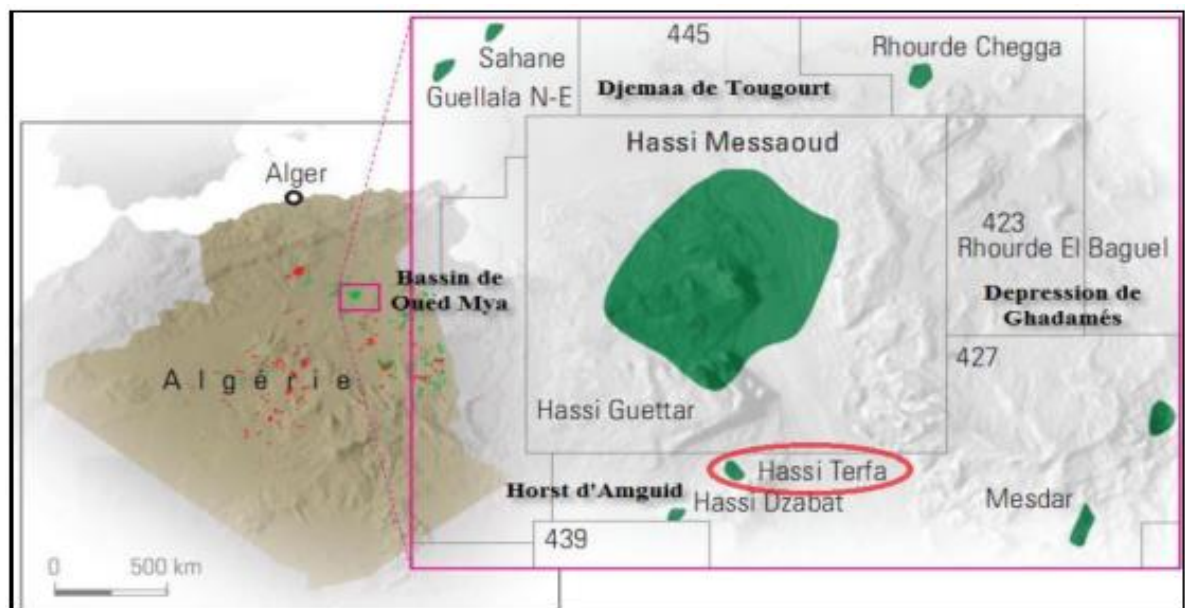


Fig.II.12: Situation du champ de Hassi TERFA (Dép.PRO/SONATRACH 2007).

II.1.2. 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	
		TRIAS			100
				140	Sel massif, anhydrite et argile
				175	Sel massif avec passées d'argile
			50	Argile silteuse à des passées de sel	
			0-90	Roches éruptives à passées d'argile	
ORDOVICIEN	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	
CAMBRIEN	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	
SOCLE				Granite porphyroïde rose	

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

II.2.1. 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 :

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

P_m : le prix de mètre foré (\$/m)

P₀ : 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:profondeurforée

II.2.2. Avancement commercial

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

$$\frac{1}{P_m} = \frac{M}{P_0 + P_h(T_m + T_f)}$$

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

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

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

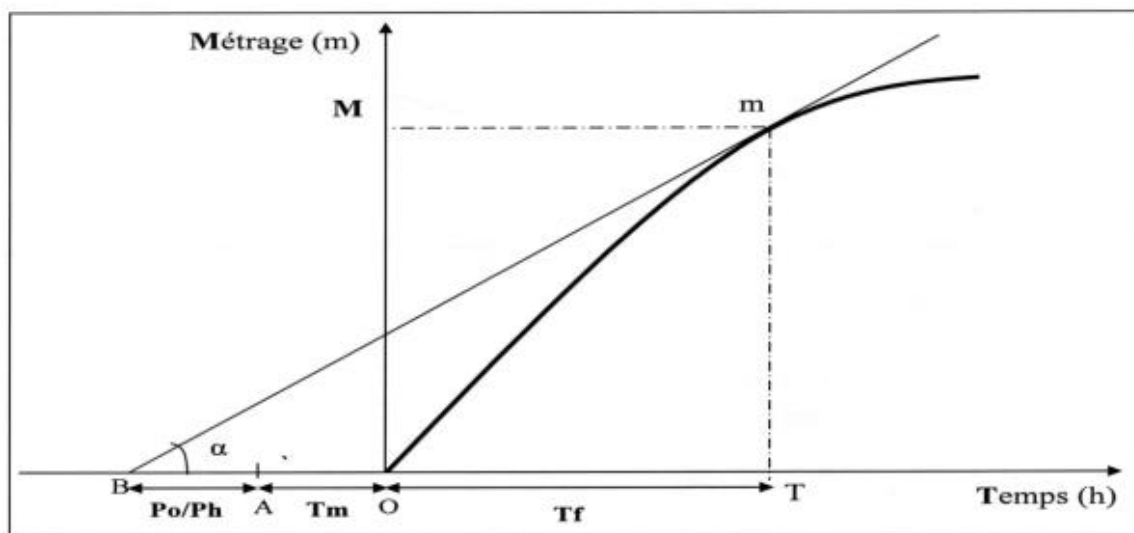


Fig.II.14: Courbe d'avancement commercial

II.2. 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.

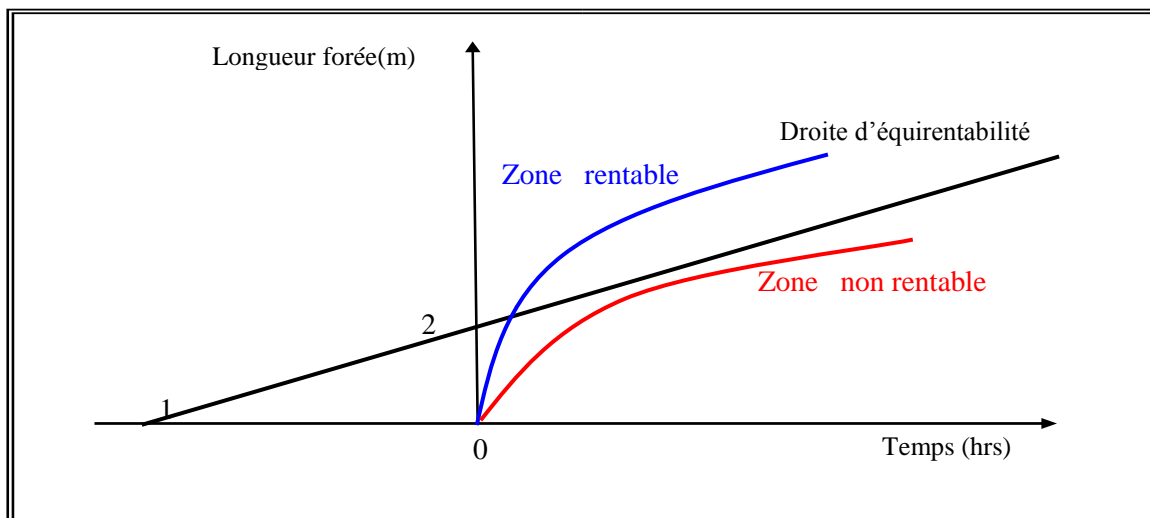


Fig.II.15 : la courbe de rentabilité par la méthode de Break even

II.2.3. ETUDE DE PERFORMANCE DES OUTILS « PDC »

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les performances de 04 outils de forage (Bit-1, Bit-2, Bit-3, Bit-4) 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 II.1 :la performance des outils PDC

Formations	Bit-1 HTF-10			Bit-2 HTF-13			Bit-3 HTF-11			Bit-4 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 II.2 : Paramètres des outils PDC

	Bit-1				Bit-2				Bit-3				Bit-4			
	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
Cenomanian	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

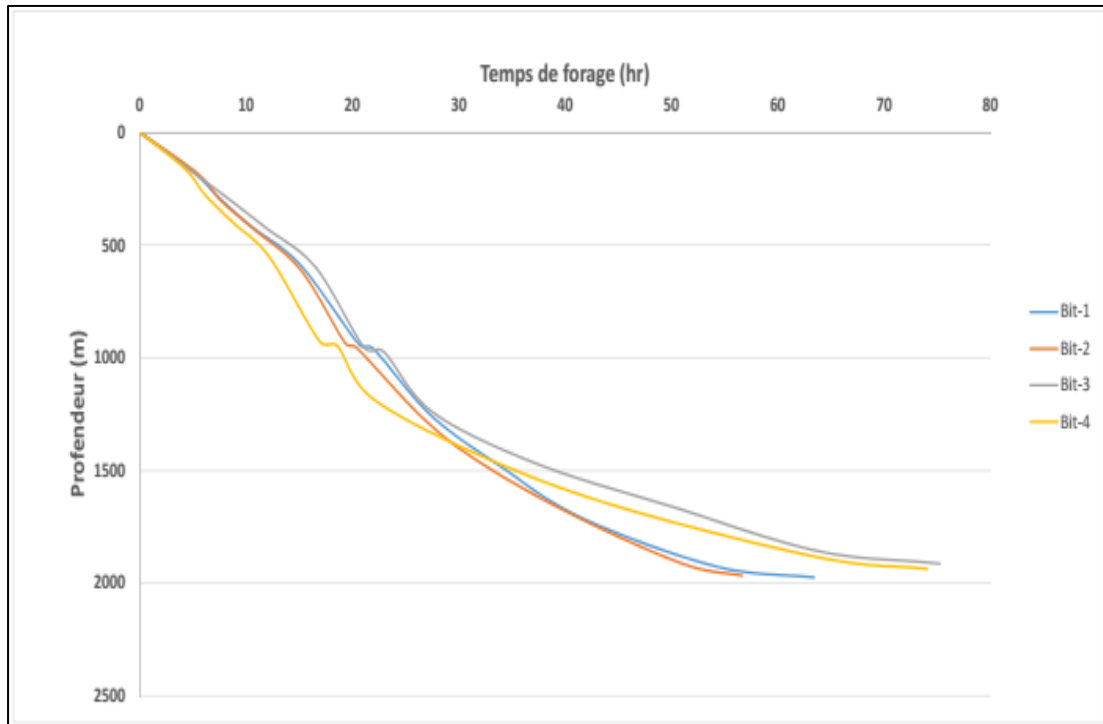


Figure.II.16: Courbe d'avancement des outils de forage

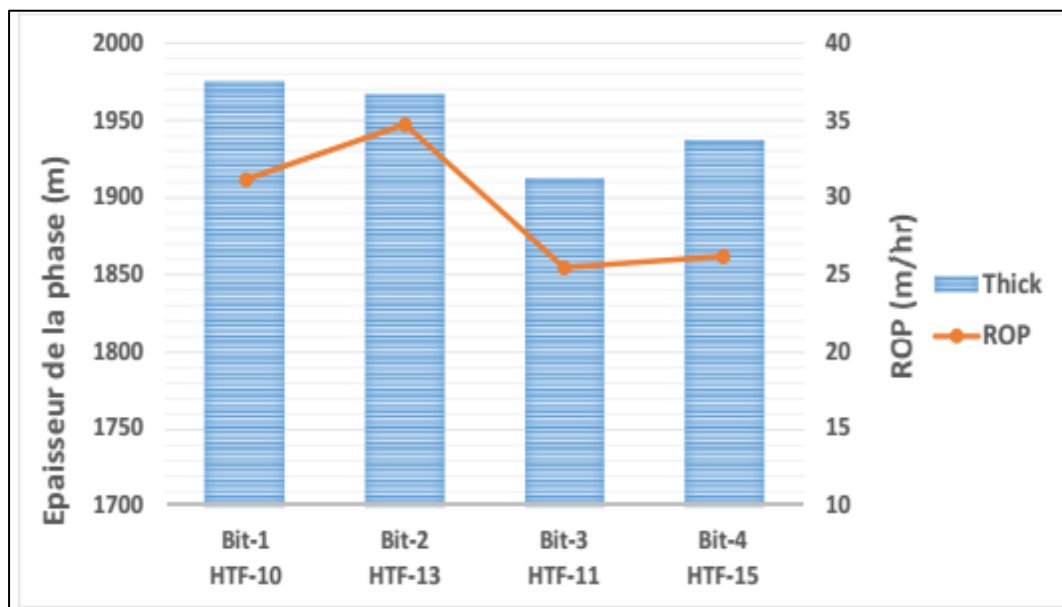


Figure.II.17: variation des profondeurs totales forées entre les outils PDC et les ROPmoy correspondantes

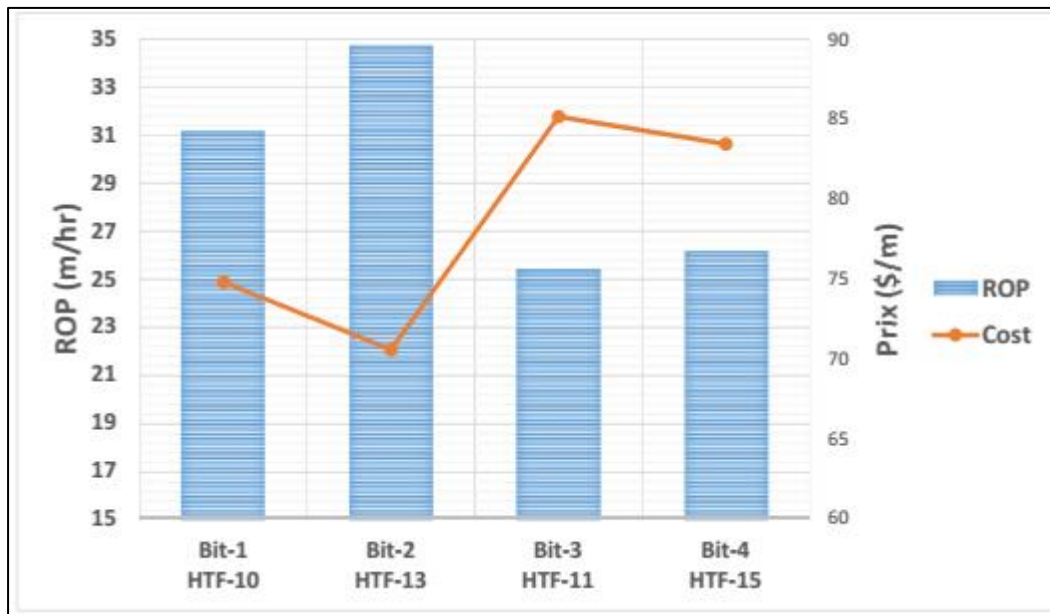


Figure.II.18: variation des ROPmoy et Pm

Résultats et commentaires :

A travers des analyses effectuées sur les 4 puits forés dans la région de HassiTarfa 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:

➤ **Outils Bit-1 :**

Elle a **ROP moy = 31,15568521 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **74,81164746 \$/m**.

➤ **Outils Bit-2 :**

Elle a **ROP moy =34,7342398 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **70,5796518\$/m**.

➤ **Outils Bit-3 :**

Elle a **ROP moy =25,43206594 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **85,1720727 \$/m**.

➤ **Outils Bit-4 :**

Elle a **ROP moy =26,15800135m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **83,4641327\$/m**.

II.3.1 Courbe d'avancement :

II.3.2. 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 :

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

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 .II.3: Prix de mètre foré

L'outil	Ph	P ₀	T _m	T _f	M	P _m
Bit-1	1310	55000	7,4125	63,3913196	1975	74,81164746
Bit-2	1310	55000	7,3625	56,63	1967	70,5796518
Bit-3	1310	55000	7,1725	75,22	1913	85,1720727
Bit-4	1310	55000	7,3775	74,05	1937	83,4641327

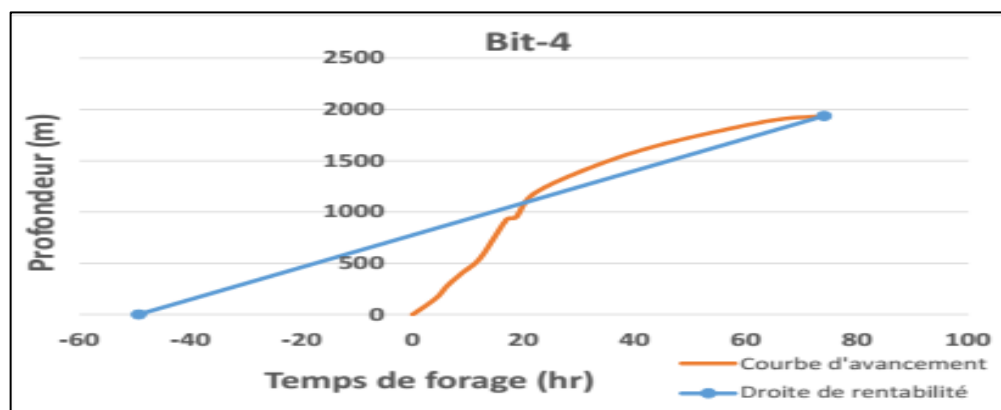
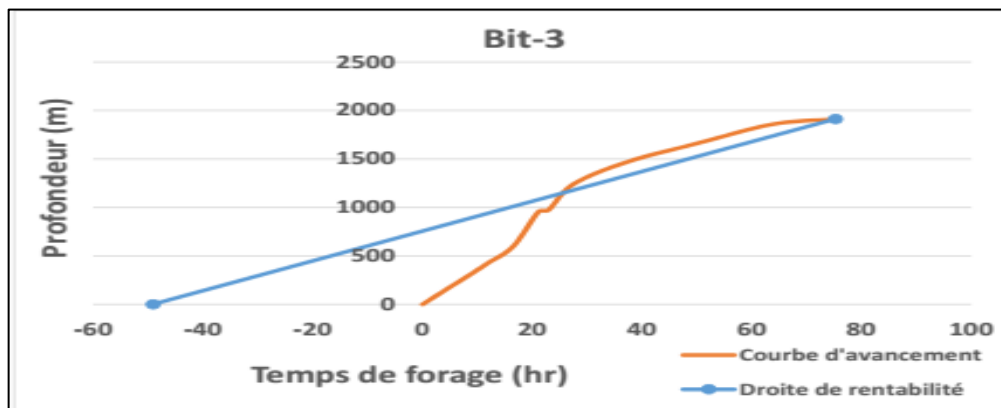
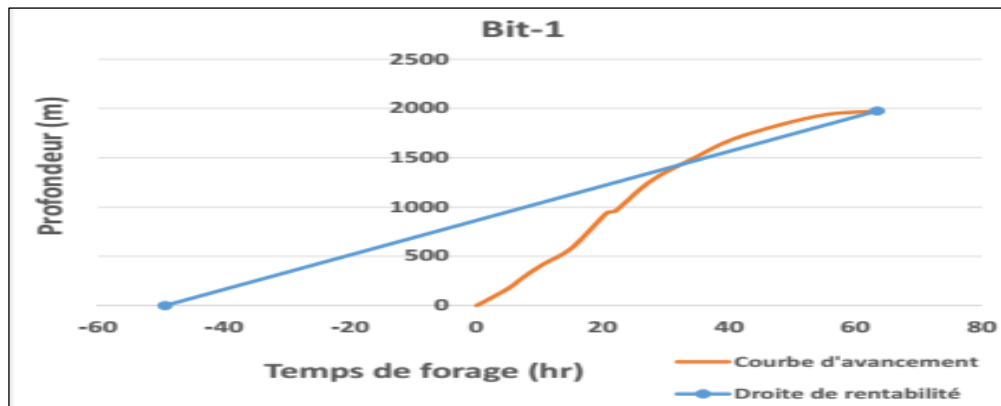
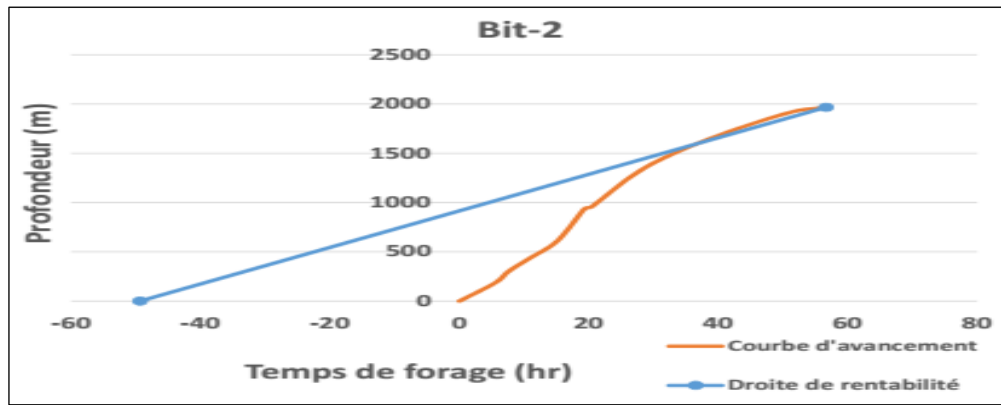


Figure.II.19: Les courbes d'avancement des outils de forage

La pente de la droite **Bm** représente l'avancement commercial de l'outil. En effet, nous avons
 Pente de la droite

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

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

	Bit-1		Bit-2		Bit-3		Bit-4	
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 **Bit-1** son $P_m = 74,81$ (\$/m) et sa pente **Bm=17,51**

Pour l'outil **Bit-2** son $P_m = 70,57$ (\$/m) et sa pente **Bm=18,56**

Pour l'outil **Bit-3** son $P_m = 85,17$ (\$/m) et sa pente **Bm=15,38**

Pour l'outil **Bit-4** 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 (Bit-2) est plus performant de point de vue avancement ce qui engendre une réduction du prix du métrage foré par rapport aux autres d'outils.

II.3.3.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 (**bit- 01**) s'écrit :

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

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

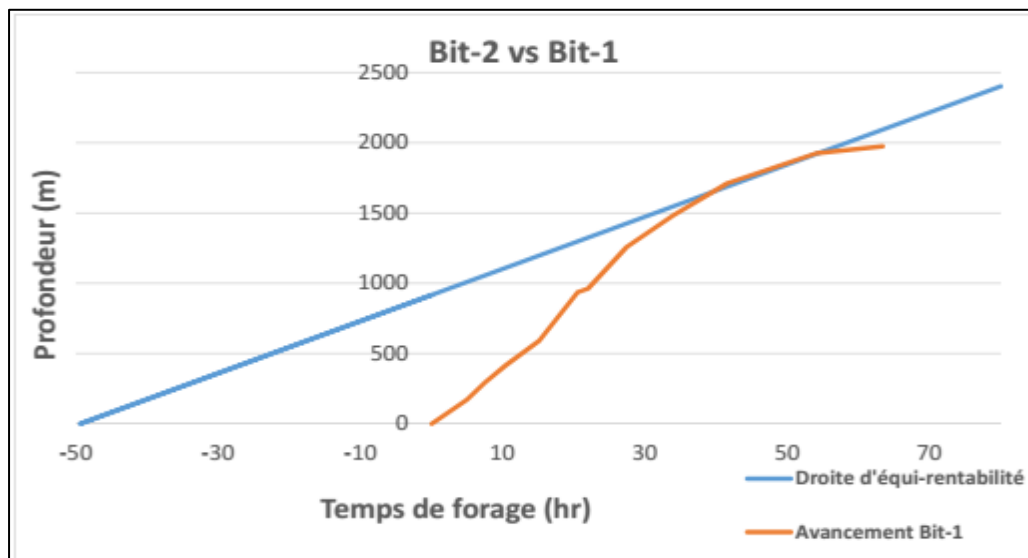


Fig.20 : la courbe de rentabilité par la méthode de Break even

Le point d'intersection entre la droite (XY) et la courbe d'avancement représente une performance à réaliser par l'outil (**bit -1**) pour que son coût au mètre foré soit égal au coût du

mètre foré par l'outil (**bit-1**) ($PmB = PmA$).

L'ensemble des points du graphe, situés sous le point d'intersection représentent l'ensemble des performances pour lesquelles l'outil (**bit-1**) ne sera pas rentable par rapport à l'outil de référence.

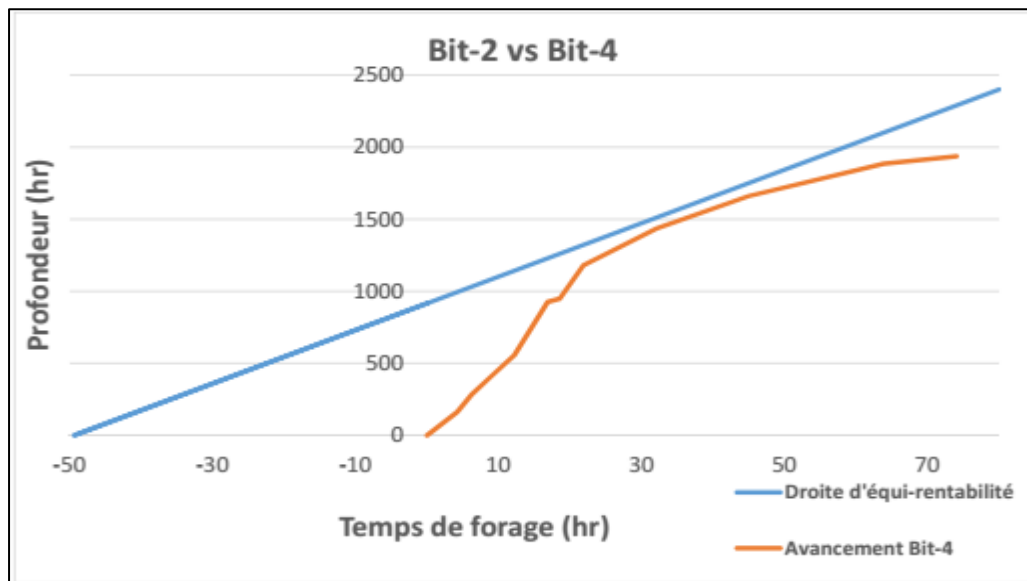
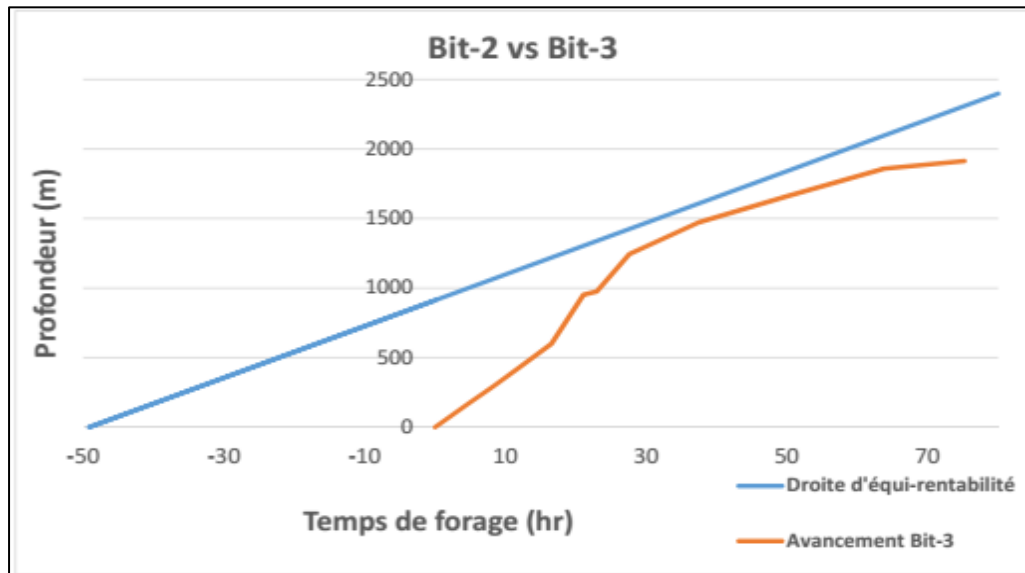


Fig.II.21 : les courbes de rentabilité par la méthode de Break even

Après le traçage des courbes de Break Even, la courbe d'avancement des outils (**bit-4**) et (**bit-3**) 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 variée 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)(**34,7342398 m/h**) et le prix de mètre foré (**70,57 (\$/m)**) montrent que l'outil PDC (bit-2) 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.