

Université KASDI Merbah Ouargla



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

**Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers**

## **MEMOIRE**

**Pour obtenir le Diplôme de Master**

**Option :Forage**

Présenté Par :

**HOUILI Mokhtar, HAMOUDI Mohammed**

-THEME-

---

**Etude de performance des outils de forage dans le  
drain horizontal de la phase 6'' : Champs de HMD**

---

Soutenu le 29 /05/ 2014devant le Jury composé de :

**Président** : Mr. KHELIFA Cherif (Univ. K M Ouargla)  
**Examineurs** : Mr. ALI ZERROUKI Ahmed (Univ. K M Ouargla)  
**Rapporteur** : Mr. DOBBI Abdelmadjid (Univ. K M Ouargla)

**Année universitaire : 2013/2014**



# REMERCIEMENTS

*Toute la gratitude et le merci à Dieu notre créateur qui nous a donné  
la force pour effectuer et achever ce travail.*

*Ainsi nos parents qui nous aident.*

*Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement*

*notre promoteur **Mr. DOBBI Abd Elmadjid,***

*pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux  
conseils, pour leurs esprit d'ouverture et leurs disponibilité. Grâce  
à lui, notre travail s'est déroulé.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury qui nous  
font l'honneur de juger notre travail.*

*Nous remercions aussi :*

*Tous les travailleurs de SONATRACH, notamment  
les cadres de la direction des opérations de forage*

*Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de  
loin à la finalisation de ce travail, nous tenons à leur exprimer notre  
vive gratitude.*





# Dédicace

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

*Je dédie ce travail à la mémoire de ma MÈRE  
que Dieu est pitié de son âme et l'accueil  
dans son vaste paradis et cher PÈRE.*

*A mes frères (NOUREDDINE, AMAR,  
KHALED, DJAMEL. AISSA et ZOUBIR  
et sa petite AFFAF) et toute la famille HOULI et NOUARI.*

*A mes amis : SOUFIANE, BARRABEH,  
ZOUHIR, MAHMOUD AZOUZ, ADEL et AMAR  
AISSAM et SAFA.*

*A mon binôme MOHAMMED et toute sa famille.*

*A tous ceux que j'aime.*

*mokhtar*

# DEDICACES



*Je dédie ce mémoire à :*

- *☉ A mes chers parents qui mon toujours poussé vers le meilleur de moi et qui ont tout sacrifié pour assuré ma réussite, mon confort et satisfaire à mes besoins.*
- *☉ Mes sœurs et mes frères, auxquels je souhaite beaucoup de bonheurs dans la vie.*
- *☉ Toute ma famille.*
- *☉ Mon binôme MOKHTAR et sa famille*
- *☉ Touts mes amis.*



# *T*able des matières

Résumé

Introduction générale ..... 1

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE FORAGE HORIZONTAL

I.I Introduction ..... 2

I.II. Avantages et inconvénients du forage horizontal ..... 2

I.II-1 -Avantages du forage horizontal ..... 2

a-Reservoirs fracturés..... 2

b- Reservoirs multi-couches ..... 3

c- Réservoirs à faible épaisseur ..... 3

d-reservoirs à basse perméabilité ..... 3

e-Formation non consolidées – Contrôle des sables..... 4

f-Conning de gaz et d'eau..... 4

g- Reservoirs d'huile lourde..... 4

I. II.2. Inconvénients du forage horizontal ..... 5

a- Coûts additionels..... 5

b-Risques opératoires..... 5

I.III.Les types des puits horizontaux..... 5

I. III.1.Puits à long déplacement (Long reach ou Extended reach wells)..... 6

I. III.2. Puits inclinés (tilt ou slant wells)..... 7

I III.3. puits multilatéraux..... 7

I. III.4. puits en re-entrée (Re-entry wells)..... 7

## CHAPITRE II : GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE DES OUTILS DE FORAGE

II.I. Les outils de forage..... 8

II.I.1.Les différents types des outils de forage ..... 8

II.I.1.1.Les outils à molettes ..... 8

II.I.1.2.Les outils diamant ..... 8

II.I.1.3.Les outils à diamant naturel ..... 9

II.I.1.4.Les outils à diamant synthétique.....	9
II.II. Principe de fonctionnement des outils .....	10
II.II.1.Outils tricônes .....	10
II.II.2.Outil PDC .....	11
II.II.3.Outil Imprégné.....	12

### **CHAPITRE.III : CHOIX DES OUTILS DE FORAGE**

III.I. Introduction.....	13
III.I.Importance du choix .....	13
III.III.Choix économique des outils .....	13
A. Prix du mètre foré.....	13
B. Avancement commercial .....	14
C. Choix de l’outil par la méthode de Break Even .....	15
D. Critères de remontée de l’outil .....	17

### **CHAPITRE.IV : ETUDE DE PERFORMANCE DES OUTILS DE FORAGE**

IV.I. Principe de base .....	18
IV.I.1.Le prix du mètre foré (le plus faible).....	18
IV.I.2.La meilleure vitesse d’avancement (ROP) .....	18
IV.II.Résultats pratiques .....	18
IV.III..Étude de performance des outils.....	24
IV.III.1. Comportement des outils dans la cambrien (Ra et R2) .....	24
IV.III.2.Étude comparative entre les outils de même type .....	24
IV.III.3.Résultats et commentaires.....	29
IV.IV.Courbe d’avancement d’un outil .....	30
IV.V.Méthode de Break Even .....	33
Conclusion et Recommandations .....	35
Références bibliographique	

# Liste des figures

Figures	Titre de figures	Page
I.01	Réservoirs fracturés.	3
I.02	Réservoirs multi-couches.	3
I.03	Water Conning.	4
I.04	Les différents profils des puits horizontaux.	6
I.05	Puits à long déplacement.	6
I.06	Puits inclinés.	7
I.07	Puits multilatéraux.	7
I.08	Puits re-entrée.	7
II.1	Outils tricônes	8
II.2	Outils PDC	9
II.3	.Outils TSP	10
II.4	Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche	10
II.5	Offset et inclinaison des cônes	11
II.6	Principe de fonctionnement d'un outil PDC	12
II.7	Outil imprégné	12
III.1	Courbe d'avancement de l'outil	14
III.2	la courbe de rentabilité par la méthode de Brik even	16
IV.01	Variation des ROP moy (m/h) des outils tricône et imprégné dans la cambrien Ra	24
IV.02	Variation de Pm moy (\$/m) entre les outils tricône et imprégné	24
IV.03	Variation de ROPmoy entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien R <sub>2</sub>	25
IV.04	Variation de Pm moy entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien R <sub>2</sub>	25
IV.05	Variation de ROP moy entre les outils imprégnés dans la cambrien Ra	26
IV.06	Variation de Pm moy entre les outils imprégnés dans la cambrien Ra	27
IV.07	Variation de ROP moy entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R <sub>2</sub>	27
IV.08	Variation de Pm moy entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R <sub>2</sub>	28
IV.09	Variation de ROP moy entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra	28
IV.10	Variation Pm moy entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra	29
IV.11	Courbe d'avancement d'un outil PDC FM2941	31
IV.12	Courbe d'avancement d'un outil imprégné 472GFDT	32
.IV.13	la courbe de rentabilité par la méthode de Brik even	34



# *L*iste des tableaux

Tableaux	Titre de tableau	Page
Tab.IV.01	Prix / mètre des outils tricônes dans la phase 6" (Cambrien Ri+Ra)	19
Tab.IV.02	Prix / mètre des outils tricônes dans la phase 6" Cambrien R2 des puits horizontaux	20
Tab IV.03	Prix / mètre des outils PDC dans la phase 6" (Cambrien Ra + R2) des puits horizontaux	21
Tab.IV.04	Prix / mètre des outils imprégnés dans la phase (Cambrien R2+ Ra) des puits horizontaux	22
Tab.IV.05	Prix / mètre des outils imprégnés dans la phase (Cambrien Ri+ Ra) des puits horizontaux	23
Tab.IV.06	Comparaison entre les outils (Tricône et Imprégné) dans la cambrien Ra	24
Tab.IV.07	Comparaison entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien R2	25
Tab.IV.08	comparaison entre les outils imprégnés utilisé dans la cambrien Ra	26
Tab.IV.09	Comparaison entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R2	27
Tab.IV.10	comparaison entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra	28

## Monoclature

- HMD** : Hassi Messaoud ;
- API** : American Petroleum Institute ;
- F.F** : Formulaire de foreur ;
- RPM** : Révolution Per Minute (Vitesse de rotation de l'outil de forage);
- ROP** : Rate Of Pénétration (La vitesse d'avancement de l'outil de forage);
- WOB** : Weight On Bit (poids appliqué sur l'outil) ;
- BHA** : Bottom Hole Assembly;
- 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).

# *RESUME*

**Thème : Etude de performance des outils de forage dans le drain horizontal  
de phase 6" : Champ de HASSI Messaoud**

**Résumé**

Le présent travail porte sur la recherche de performance des outils de forage dans le drain horizontal de champ du HASSI Messaoud, et ceci dans le souci de réduire au maximum le cout de forage, à cet effet, nous avons réalisé une étude comparative de performance entre des outils de différents type sur la base d'une banque de donnée de 35 puits forés dans la région de HASSI Messaoud.

Il y a lieu de noter que la position du drain dans le réservoir doit être respectée scrupuleusement, la complexité du réservoir exige des mesures exceptionnelles car la phase d'atterrissage est très délicate, et la réussite d'une opération de forage horizontal doit se faire avec un rapport qualité/prix le plus élevé possible (meilleur positionnement du drain sa place optimale et un bon atterrissage).

L'étude consiste de prendre comme référence la vitesse d'avancement (ROP) et le prix de mètre foré afin de déterminer la performance des outils de forage et par conséquent, proposer une approche économique pour forer la phase 6 " .

**Mots clés : forage, outil, drain horizontal, temps de forage, coût, vitesse d'avancement.**

## **Performance Study of drilling bit in the field of horizontal drain 6" Hassi Messaoud**

### **Abstract**

The present work focuses on research performance drilling tools in the horizontal drain field Hassi Messaoud, and this in order to minimize the cost of drilling, to this end, we conducted a comparative study of performance between tools of different types on the basis of a database of 35 wells drilled in the field of Hassi Messaoud.

It should be noted that the position of the drain in the reservoir must be scrupulously respected, the complexity of the reservoir requires exceptional measures because the landing phase is very delicate, and the success of horizontal drilling operation must be with a quality / price possible (better positioning drain its optimal place and a good landing) money.

The study consists of taking as reference the forward speed (ROP) and the price of meter drilled to determine the performance of drilling tools and thus offer an economic approach to drilling phase 6. "

**Key words:** drilling parameters, horizontal drain, drilling time, cost, speed of advance.

*INTRODUCTION  
GENERALE*

## **Introduction générale**

Depuis le début de l'ère industrielle, le premier souci des pays développés est d'assurer l'approvisionnement de leurs industries en énergies. Actuellement les hydrocarbures (notamment le pétrole) tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique mondiale, cette forte demande des hydrocarbures à l'échelle mondiale pousse les entreprises pétrolières à des concurrences dans la découverte, le développement de nouvelles réserves de pétrole pour satisfaire la demande croissante de l'énergie.

Cependant les recherches, et l'exploitation des gisements engendrent des coûts énormes que les compagnies pétrolières cherchent à diminuer les coûts à travers des différents leviers dont l'une d'entre elle est l'investissement destiné à la réalisation du puits (forage).

On peut définir la technique de forage comme étant l'action de percer ou creuser un trou de forme presque cylindrique à partir de la surface de la terre jusqu'à la cible souhaitée avec un moindre coût tout en respectant l'aspect sécuritaire, parmi tous organes d'un appareil de forage ,le trépan reste le élément indispensable pour réaliser un puits pétrolier ,c'est la première pièce à s'attaquer aux terrains.

A cet effet, des nombreux types d'outils disponible sur le marché, il est relativement difficile de choisir l'outil le mieux adapté.

Dans cet esprit, notre présent travail consiste à mener une étude de performance des outils de forage dans le drain horizontal la phase 6"au champ de HMD.

# *Chapitre I*

## *GENERALITE SUR LE FORAGE HORIZONTAL*



## **I.I.Introduction**

Le forage horizontal est un ensemble des ingénieries et opérations qui consiste à percer une section d'un puits inclinée ou sub-inclinée par rapport à la verticale jusqu'à atteindre une cible souhaitée.

Ce type de forage est employé pour améliorer la productivité du réservoir c'est-à-dire d'augmenter considérablement la surface de contact entre le réservoir et la colonne de production. Il est aussi un bon candidat pour les réservoirs à fracture verticale ou les réservoirs multicouches puisqu'un seul puits horizontal peut remplacer plusieurs puits verticaux. Autre que ces avantages sur la productivité du réservoir il permet la résolution d'un certain problème comme l'inaccessibilité de cite (montagne), forage auprès des dômes salés, présence de faille etc....

Le forage horizontal est aussi parmi les techniques les plus développées dans le domaine du forage pétrolier à HMD, c'est en 1993 qu'a été foré le premier puits horizontal MDZ1, depuis cette date l'application du forage horizontal en Algérie est bien développée et beaucoup des puits ont été forés [4].

## **I.II.Avantages et inconvénients du forage horizontal [7]**

### **I.II.1.Avantages du forage horizontal**

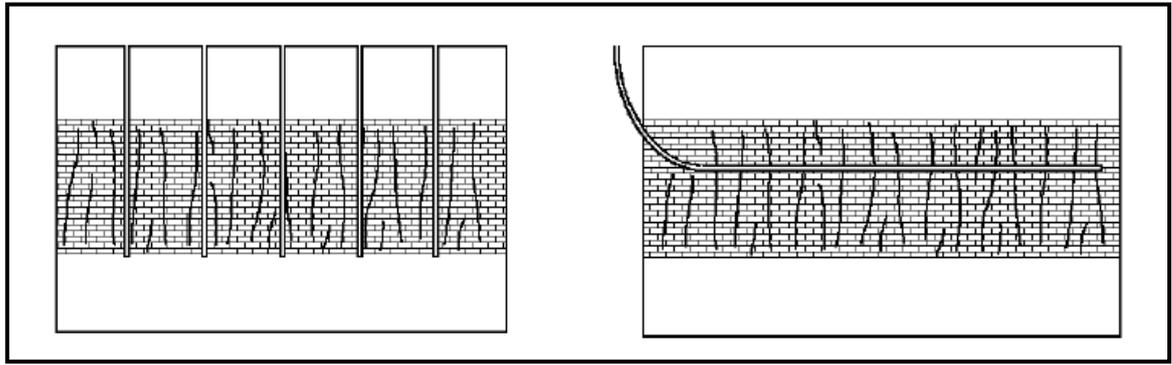
Les avantages du forage horizontal sont nombreux et nous pouvons citer :

- le forage horizontal permet le développement de champs qui n'auraient pu être exploités commercialement autrement ;
- dans beaucoup de réservoirs, le forage horizontal permet d'augmenter la production mais aussi d'améliorer le taux de récupération, ceci par un meilleur drainage et en retardant l'arrivée d'eau.

On privilégie la réalisation d'un forage horizontal dans les cas suivants :

#### **a-Réservoirs fracturés**

Les réservoirs fracturés sont parmi les meilleurs candidats au développement par forage horizontal. Les fractures de ces réservoirs étant sub-verticales, une conséquence directe est que le meilleur moyen d'en intercepter le plus grand nombre est de forer un puits horizontal perpendiculairement à leur direction principale.

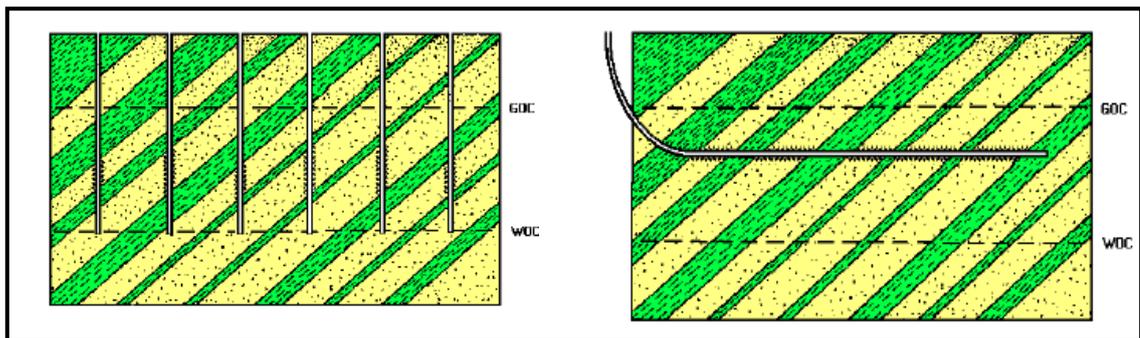


*Fig. I.01 : Réservoirs fracturés.*

### **b-Réservoirs multi-couches**

Dans la plupart des réservoirs multi-couches un puits horizontal peut remplacer plusieurs puits verticaux ou déviés.

La figure ci-dessous illustre un tel cas de réservoir compartimenté ou un seul puits horizontal remplace six puits verticaux et de plus améliore la production en retardant le *conning*.



*Fig. I.02 : Réservoirs multi-couches.*

### **c-Réservoirs à faible épaisseur**

Dans un tel réservoir, un puits vertical ne peut avoir qu'une faible pénétration dans le drain, et le but de forage horizontal est d'avoir une pénétration plus importante afin de réduire le nombre de puits.

### **d-Réservoirs à basse perméabilité**

Le forage horizontal dans un réservoir à basse perméabilité est une alternative à la fracturation de ce réservoir.

Le drain horizontal se comporte comme une fracture, avec plusieurs avantages :

- il est plus facile et plus économique de forer un long drain plutôt que d'essayer de créer une fracture équivalente ;
- la direction est parfaitement contrôlée, ce qui n'est pas possible avec la fracturation.

### e-Formations non consolidées - Contrôle des sables

La production de sables non consolidés présente de sérieux problèmes pour limiter la quantité de sable entrant dans le puits.

Cette production de sable dépend des forces de viscosité à la paroi du puits, elle même proportionnelle au débit de production.

Un drain horizontal foré dans un tel réservoir permet de réduire la vitesse à la paroi et en conséquence la production de sable, qui peut aller jusqu'à être totalement éliminée.

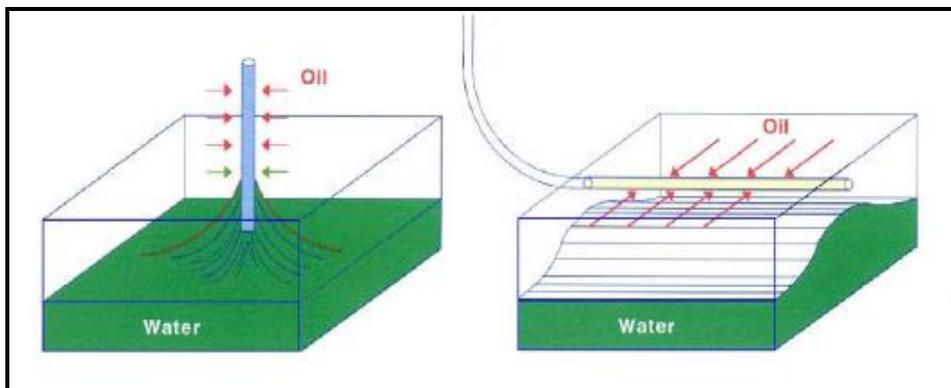
### f-Conning de gaz et d'eau

Beaucoup de réservoirs sont produits grâce à un aquifère actif ou par injection artificielle. La production déclinera très rapidement si le niveau d'eau remonte trop vite dans le puits.

Le forage horizontal aide énormément la production de tels réservoirs :

- en augmentant la distance entre le drain et le contact huile/eau ;
- en améliorant la productivité en dispersant le soutirage et donc en diminuant la succion sur le plan d'eau.

Des considérations similaires peuvent être faites concernant l'arrivée de gaz.



*Fig. I.03 : Water Conning.*

### g-Réservoirs d'huile lourde

Les réservoirs d'huiles lourdes sont une application directe des considérations ci-dessus. Comme l'eau est beaucoup plus mobile que l'huile, la quantité d'eau augmente très rapidement dès la percée du plan d'eau. La durée de la période libre d'eau augmente à l'aide du forage horizontal.

## I.II.2.Inconvénients du forage horizontal

### a-Coûts additionnels

Il est évident qu'un forage horizontal a un coût plus élevé qu'un forage vertical ou peu dévié. Les coûts additionnels sont dus à deux facteurs principaux :

- les puits horizontaux sont plus longs, donc nécessitent plus de temps pour les forer, plus d'outils, plus de fluide, etc .....;
- le coût des services de forage dirigé n'est pas négligeable en particulier par l'obligation d'utiliser en permanence un moteur de fond et un MWD.

### b-Risques opératoires

Par rapport aux puits verticaux ou peu déviés, les puits horizontaux représentent, au cours de leur réalisation, un certain nombre de risques supplémentaires.

- atteindre la cible ;
- Le nettoyage du puits ;
- Le comportement des formations ;
- L'endommagement des formations ;
- L'évaluation du potentiel de production.

## I.III.Les types des puits horizontaux

Cette terminologie couvre les puits où le réservoir est percé par une section horizontale or sub-horizontale (80 à 100 degrés). [11].

Trois variantes peuvent être considérées selon le gradient de montée et donc le rayon de courbure :

- **Long rayon** (gradients de 1 à 2 deg/10m) ;
- **Moyen rayon** (gradients de 3 à 10 deg/10m) ;
- **Court rayon** (gradients < 10 deg/m).

Ils peuvent être :

- à montée unique ;
- à montées multiples, séparées par des sections rectilignes (dites tangentielles).

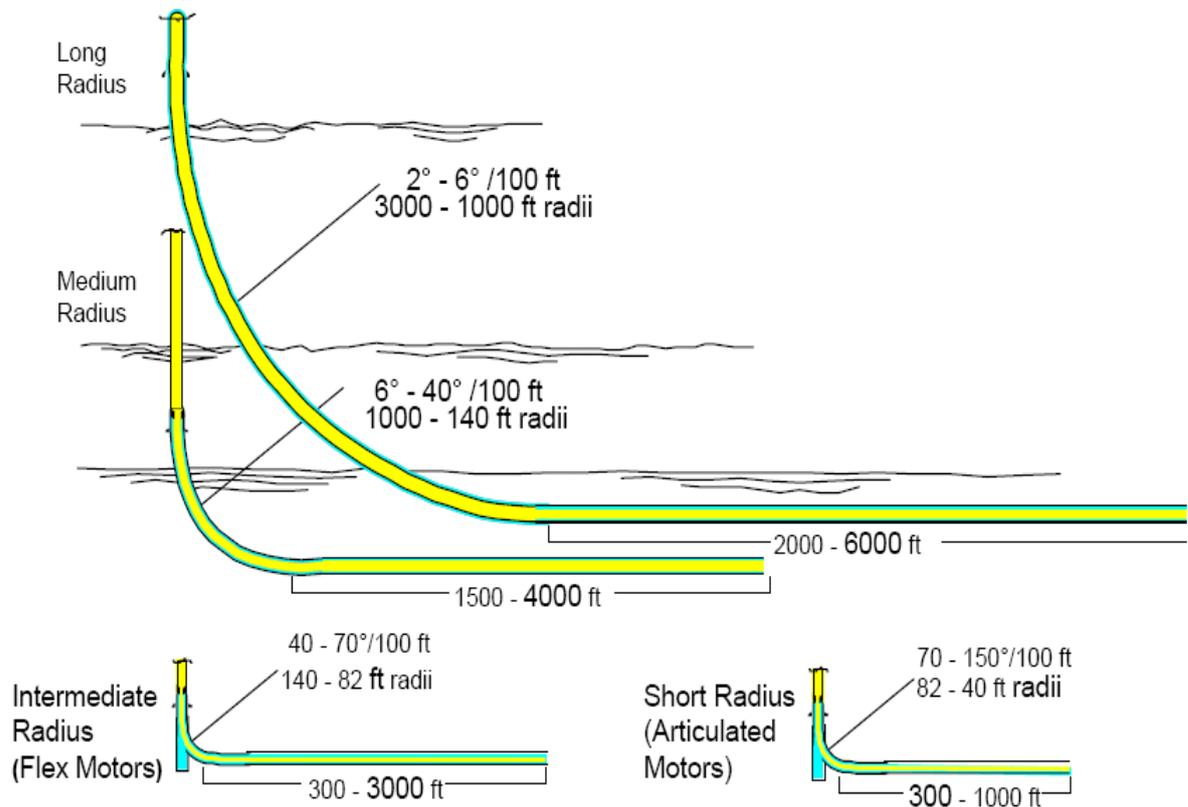


Fig.I.04 : les différents Profils des puits horizontaux.

**I.III.1.Puits à long déplacement (Long reach ou Extended Reach wells)**

Puits avec un déplacement horizontal de plusieurs kilomètres, foré à haute inclinaison et se terminant par un drain horizontal. [6]

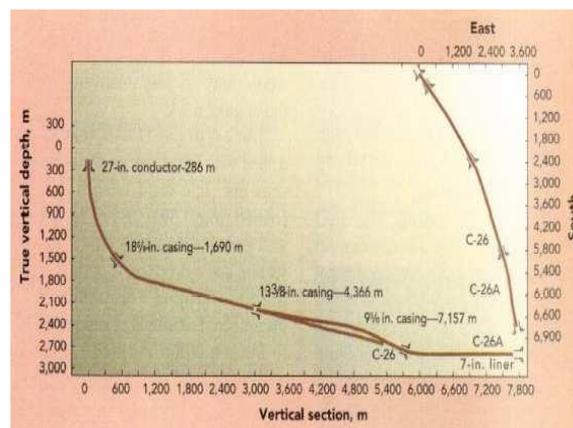
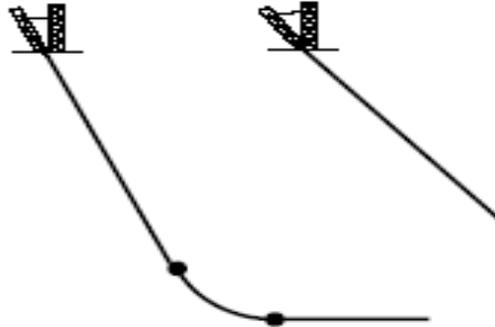


Fig. I.05 : Puits à long déplacement

### I.III.2.Puits inclinés (tilt ou slant wells)

Puits avec une inclinaison dès la surface, pouvant atteindre 45 degrés, et nécessitant un appareil de forage spécial (tilt ou slant rig) entre autres utilisations cette technique permet d'atteindre l'horizontale dans des réservoirs peu profonds. [7]



*Fig. I.06 : Puits incliné*

### I.III.3.Puits multilatéraux

Cette technique consiste à forer plusieurs "drains" à partir d'un puits principal et donc une seule tête de puits. [7]

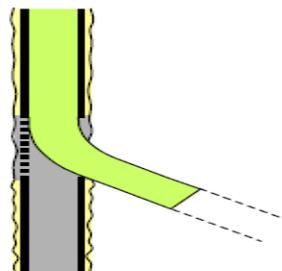


*Fig. I.07 : Puits multilatéraux*

### I.III.4.Puits en ré-entrée (Re-entry wells)

Cette technique utilisée intensivement depuis les années 80 consiste à abandonner le fond d'un puits existant (vertical ou dévié) pour forer latéralement un nouveau puits, celui-ci se terminant souvent par un drain horizontal. [7]

Cette technique permet de faire l'économie du forage et des équipements de la partie supérieure du puits.



*Fig.I.08: Puits ré-entrée*

# *Chapitre II*

## *GENERALITE SUR LA TECHNOLOGIE DES OUTILS DE FORAGE*



## II.I. 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].

### II.I.1. Les différents types des outils de forage

Les outils se classent en deux catégories :

#### II.I.1.1. Les outils à molettes [5].

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.

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

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



*Fig. II.1. Outils tricônes*

#### II.I.1.2. Les outils diamants

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, on les utilise souvent dans l'industrie pétrolière vu leur performances et efficacités de forer des centaines de mètres et des roches très dures en un seul run.

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

### II.1.1.3. 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.1.1.4. 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 [9].



*Fig. II.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 [10].



Fig.II.3. Outils TSP

## II.II.Principe de fonctionnement des outils

### II.II.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.

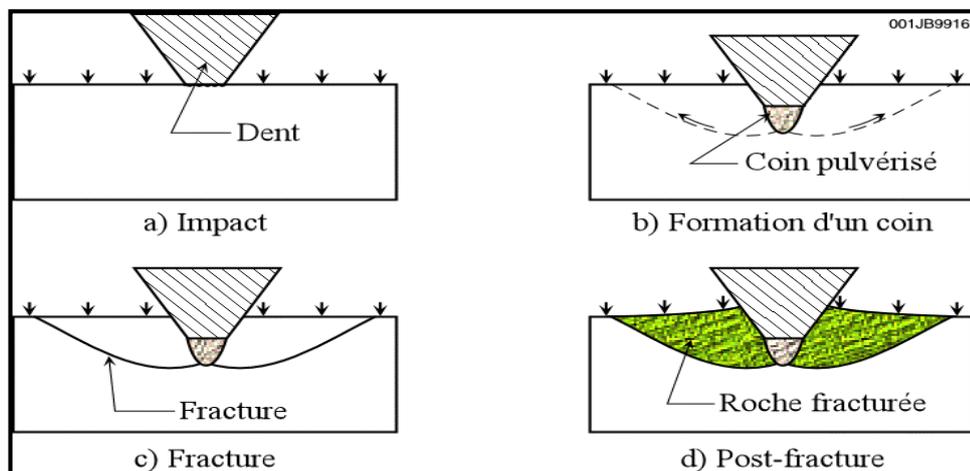
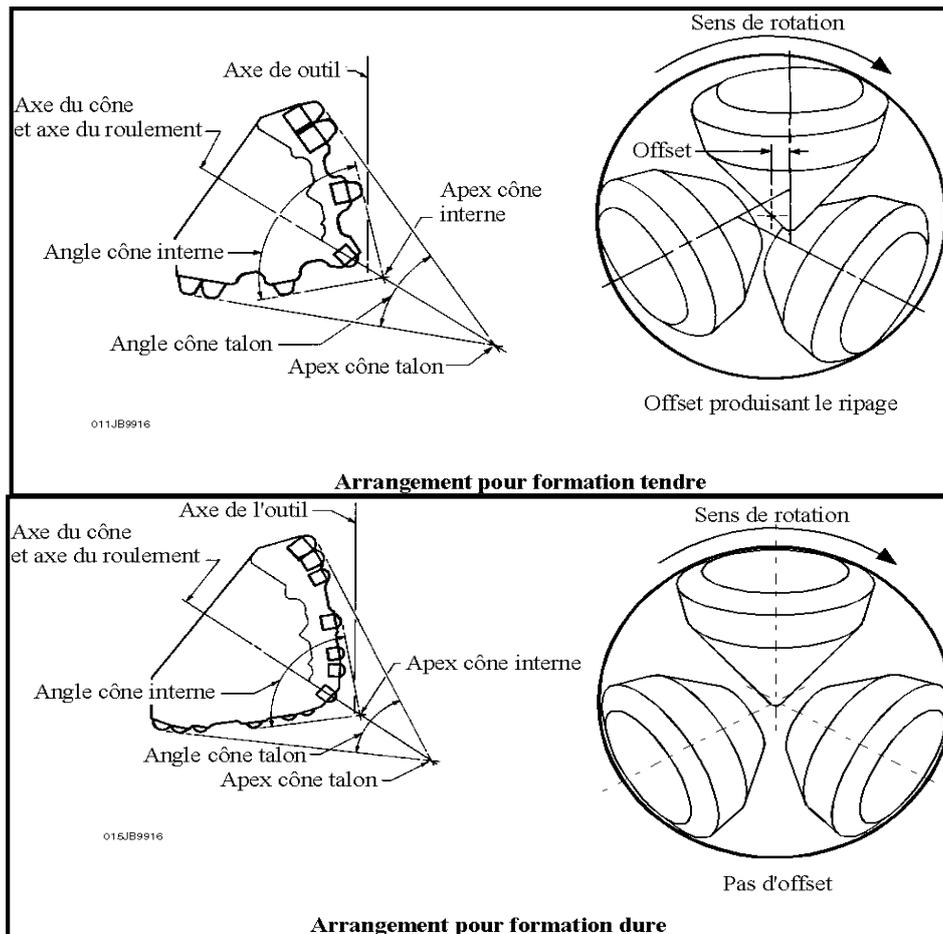


Fig.II.4 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche

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 [12].

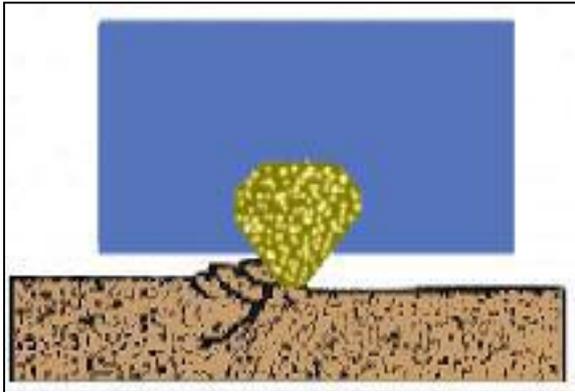


*Fig.II.5: Offset et inclinaison des cônes*

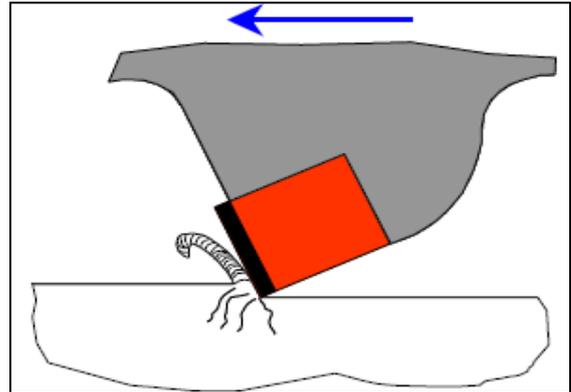
### II.II.2.Outil PDC

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 cutters 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.



Action d'un outil à diamant naturel



Action d'un PDC

**Fig. II.6.** Principe de fonctionnement d'un outil PDC

Comme les cutters sont les éléments responsables dans la destruction de la roche, la densité et la répartition de ces derniers influents considérablement sur la performance de l'outil.

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. donc une densité optimale est recherchée.

### II.II.3. Outil Imprégné

Ces outils sont destinés aux formations très dures et très abrasives, ils présentent l'outil le plus performant pour les formations quartzitiques et grès quartzitique. Leur principe de fonctionnement base sur l'alésage de la roche par les cutters (l'angle de coupe devient nul) ce qui produit des déblais de très petite taille.

**Fig. II.7.** Outil imprégné

# *Chapitre III*

## *CHOIX DES OUTILS DE FORAGE*



### III.I. Introduction

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.I.Importance du choix

La raison d'un programme est fondamentale. L'efficacité de l'ensemble des opérations de forage repose sur ce facteur de base : le type de l'outil utilisé. Quelle que soit la puissance disponible d'un appareil de forage (pour la rotation, l'énergie hydraulique, etc.), seul le type de l'outil choisi fera que cette puissance sera utilisée avec le maximum d'efficacité ou non.

### III.III.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 engageant 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].

#### A-Prix du mètre foré

Le seul critère permet de comparer les performances des outils est le prix du mètre foré, il

est représenté dans l'équation suivante : 
$$P_m = \frac{P_o + P_h (T_m + T_f)}{M}$$

**P<sub>m</sub>** : le prix de mètre foré (\$/m) ;

**P<sub>o</sub>** : le prix de l'outil (\$) ;

**P<sub>h</sub>** : le prix de l'heure de l'appareil (\$/h) ;

**T<sub>m</sub>** : le temps de manœuvre nécessaire pour descendre et remonter l'outil (h) ;

**T<sub>f</sub>** : le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage M, (h) ;

### B-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.

#### Application

Traçons sur un diagramme la courbe représentant l'avancement cumulé en fonction du temps de rotation (voir figure.III.1). Sur ce diagramme, en abscisse négative, portons un segment OA égal au temps de manœuvre et un segment AB égal au prix de l'outil divisé par le prix de l'heure de l'appareil de forage :  $\frac{P_o}{P_h}$  (prix de l'outil en heure de sonde). Après un

temps de rotation OT, l'outil a effectué un métrage M représenté par le point  $m$  sur la courbe. La pente de la droite  $Bm$  représente l'avancement commercial de l'outil. En effet, nous avons :

$$\text{Pente de } Bm = \frac{T_m}{BA + AO + OT}$$

Que l'on peut écrire :  $B_m = \frac{M}{\frac{P_o}{P_h} + T_m + T_f}$  ce qui est bien l'avancement commercial de l'outil.

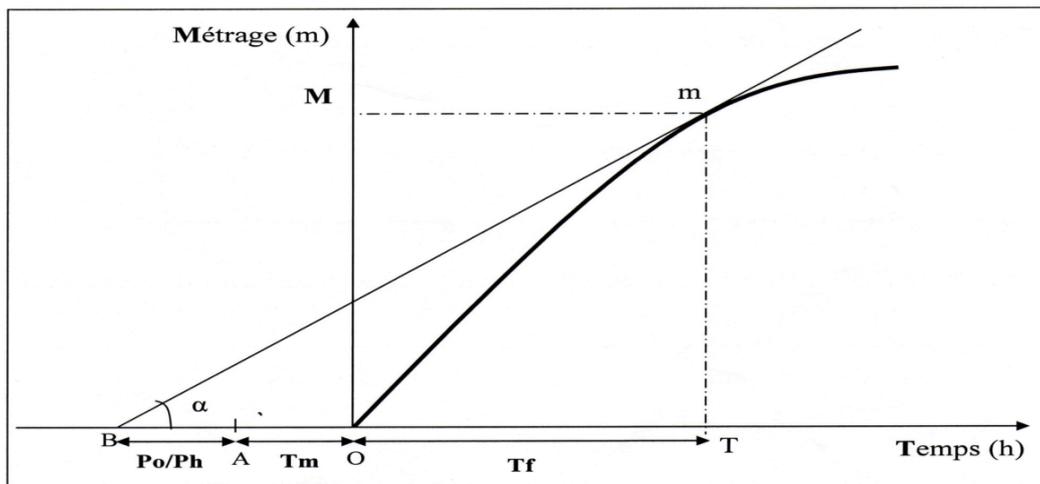


Fig.III.1 : Courbe d'avancement de l'outil

Par conséquent, le prix du mètre sera minimal ou l'avancement commercial maximal lorsque la pente de la droite  $Bm$  sera maximale, c'est-à-dire lorsque cette droite sera tangente à la courbe d'avancement.

### C-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

$$\text{la suivante : } P_m = \frac{P_o + P_h (T_m + T_f)}{M}$$

Avec :  $P_m$  = prix du mètre foré ;

$P_o$  = prix de l'outil ;

$P_h$  = prix horaire de l'appareil ;

$T_f$  = temps de forage ;

$T_m$  = temps de manœuvre (descente et remontée)

$M$  = longueur forée.

Cette formule ne tient pas compte de certains facteurs qui peuvent influencer sur le prix du mètre foré (traitement de la boue, modification de la BHA, etc...), néanmoins elle donne des chiffres très proches des valeurs exactes. Le cas le plus simple est de comparer deux outils, descendus à la même profondeur, dans des formations identiques, sur deux puits voisins.

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

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

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

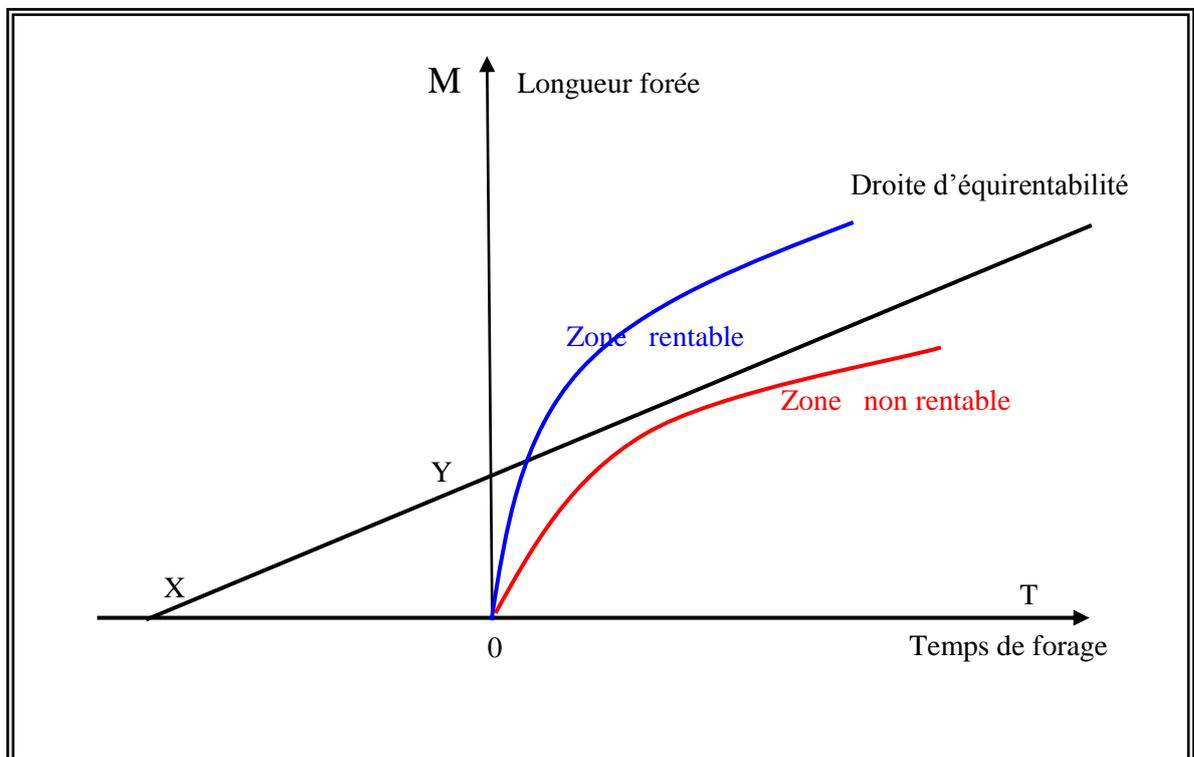
Dans un repère cartésien où figurent en ordonnée la longueur forée (M) et en abscisse le temps de forage ( $T_f$ ), le seuil de rentabilité d'un outil par rapport à un autre est donc une droite.

Pour définir une droite, deux points suffisent :

$$\text{Point X : } Y = 0 \Rightarrow X = -\mathbf{b}/\mathbf{a} = -\frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_h}$$

$$\text{Point Y : } X = 0 \Rightarrow Y = \mathbf{b} = \frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_{mA}}$$

### Droite de rentabilité



*Fig.III.2 : la courbe de rentabilité par la méthode de Brik even*

### Conclusion

Chaque point de la droite (XY) représente une performance à réaliser par l'outil B pour que son coût au mètre foré soit égal au coût du mètre foré par l'outil A.

L'ensemble des points du graphe, situés au-dessus de la droite (XY) représente les performances à réaliser par l'outil B pour que son coût du mètre soit inférieur à celui de l'outil A. Ceux situés sous la droite (XY) représentent l'ensemble des performances pour lesquelles l'outil B ne sera pas rentable par rapport à l'outil de référence.

### Résumé de la méthode

Dans un repère cartésien portant en abscisse le temps de forage et en ordonnée la longueur forée, il faut tracer la droite qui représente l'ensemble des performances que doivent réaliser le ou les outils à évaluer, pour être au minimum rentables par rapport à l'outil ou aux outils de référence. Cette droite sépare le plan en deux portions. La partie supérieure représente l'ensemble des performances économiques, et la partie inférieure l'ensemble des performances non-économiques. Elle coupe les axes en deux points X et Y.

### D-Critères de remontée de l'outil

La décision de remonter un outil ne doit pas être arbitraire ; les critères sont :

- la chute de la vitesse d'avancement qui peut être due à une usure des éléments de coupe ou à un bourrage de l'outil (la chute d'avancement peut s'accompagner d'une augmentation de la pression de refoulement lorsqu'il y a bourrage) ;
- l'augmentation du couple de rotation qui peut être progressive ou au contraire brutale (coup de torque) ;
- le nombre d'heures de rotation ;
- le prix de revient du mètre foré.

### Remarque

Avec ces différents critères, l'outil remonté ne sera pas nécessairement utilisé.

Le prix de revient du mètre foré est un critère utilisé pour déterminer à quel moment il est le plus économique de remonter l'outil, mais il permet également de comparer les performances de différents outils et de déterminer pour un type d'outil donné, les performances qu'il doit réaliser pour être compétitif.

# *Chapitre IV*

## *ETUDE DE PERFORMANCE DES OUTILS DE FORAGE*



### IV.I. Principe de base

Dans cette étude nous avons basé sur deux facteurs importants pour choisir l'outil de forage le plus rentable tel que :

#### IV.I.1. Le prix du mètre foré (le plus faible)

Qui est défini :

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

Avec :

$P_m$  : le prix de mètre foré (\$/m) .

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

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

$T_m$  : le temps de manœuvre nécessaire pour descendre et remonter l'outil (h) .

$T_f$  : le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage M, (h) .

#### IV .I.2. La meilleure vitesse d'avancement (ROP)

La vitesse d'avancement est étroitement liée aux paramètres de forage suivants :

Paramètres hydrauliques

- ♦ Débit ;
- ♦ Pression ;
- ♦ Densité ;
- ♦ Yield value.

Paramètres mécaniques

- ♦ La vitesse de rotation (RPM) ;
- ♦ Le poids sur l'outil (WOB) ;
- ♦ Nature de formation.

### IV.II. Résultats pratiques

Le but de cette sélection est de choisir l'outil qui donnera le prix de revient du mètre foré le plus faible et le meilleur ROP. Des critères techniques et économiques vont donc intervenir dans cette sélection, des résultats sont représentés dans les tableaux suivants :

Tab.IV.01 : Prix / mètre des outils tricônes dans la phase 6" (Cambrien Ri+Ra)

Outil	Fabricant	Puits	Intervalle foré		M (m)	Rop (m/h)	T <sub>r</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)	
			de	à								
XR40YDDPD	SMITH	MDZ608	3448	3469	21	<b>3,33</b>	6,3	17,29	1291,66	13000	<b>2070,01</b>	
		MDZ598	3334	3360	26	<b>3,07</b>	8,47	16,73	1291,66	13000	<b>1751,92</b>	
			3366	3415	49	<b>4,4</b>	11,14	16,95	1291,66	13000	<b>1005,77</b>	
EP4872	HUGHES	MDZ540	3526	3597	71	<b>3,05</b>	23,28	16,4	1291,66	13000	<b>904,97</b>	
		OMKZ121	3818	3871	53	<b>2,91</b>	18,22	19,22	1291,66	13000	<b>1157,73</b>	
			3898	3933	35	<b>1,72</b>	20,53	19,57	1291,66	13000	<b>1851,30</b>	
		MDZ534	3933	3983	50	<b>3,1</b>	16,13	18,83	1291,66	13000	<b>1163,13</b>	
			3581	3671	90	<b>4,96</b>	21,23	18,13	1291,66	13000	<b>709,33</b>	
		EP4732	MDZ532	3671	3711	40	<b>2,17</b>	11,08	18,46	1291,66	13000	<b>1278,89</b>
		EP5051	HUGHES		3711	3750	39	<b>2,09</b>	19,02	18,65	1291,66	13000
OMKZ121	3933			4000	67	<b>3,26</b>	20,55	19,86	1291,66	13000	<b>973,07</b>	
	4102			4149	47	<b>2,48</b>	18,95	20,62	1291,66	13000	<b>1364,06</b>	
EHP83DHLK	HYCALOG	MDZ533	3519	3600	81	<b>4,55</b>	10	17,8	1291,66	15000	<b>628,50</b>	
		OMMZ533	3499	3531	32	<b>1,82</b>	11,27	17,58	1291,66	15000	<b>1633,26</b>	
		MDZ534	3610	3645	35	<b>1,93</b>	7,61	18,14	1291,66	15000	<b>1378,86</b>	
XR50YODPD	SMITH	MDZ532	3539	3581	42	<b>2,36</b>	13,86	17,8	1291,66	13000	<b>1283,19</b>	
		OMMZ533	3531	3555	24	<b>1,35</b>	8,08	17,72	1291,66	13000	<b>1930,20</b>	
			4231	4263	32	<b>1,51</b>	17,88	21,24	1291,66	13000	<b>1985,30</b>	
		OMOZ801	3569	3607	38	<b>2,12</b>	7,35	17,94	1291,66	13000	<b>1201,74</b>	
ROP moy =2,74m/h Pm moy =1360,64 \$/m												

**Tab.IV.02 : Prix / mètre des outils tricônes dans la phase 6" Cambrien R2 des puits horizontaux**

Outil	Fabricant	Puits	Intervalle foré		M (m)	Rop (m/h)	T <sub>f</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)
			de	à							
EHP83DHLK	HYCALOG	OMPZ173	3460	3548	88	<b>5,6</b>	15,71	17,52	1291,66	15000	<b>658,20</b>
			4153	4177	24	<b>2,51</b>	9,56	20,83	1291,66	15000	<b>2260,56</b>
		OMLZ512	3469	3489	20	<b>1,83</b>	10,93	17,4	1291,66	15000	<b>2579,64</b>
EHP61DHLK		OMPZ34	3462	3572	110	<b>5,95</b>	18,49	17,59	1291,66	15000	<b>560,03</b>
EP4872	HUGHES	OMOZ632	3375	3411	36	<b>1,93</b>	18,65	16,97	1291,66	13000	<b>1639,14</b>
			3411	3452	41	<b>1,82</b>	22,53	17,16	1291,66	13000	<b>1567,46</b>
		OMOZ631	3398	3417	19	<b>5,19</b>	3,66	17,03	1291,66	13000	<b>2090,76</b>
			3417	3479	62	<b>3,04</b>	30,39	17,24	1293,66	13000	<b>1203,50</b>
			4022	4087	65	<b>5,19</b>	12,31	20,27	1291,66	13000	<b>847,42</b>
XR40YDDPD	SMITH	OMJZ742	3390	3407	17	<b>3,65</b>	4,66	16,99	1291,66	13000	<b>2409,67</b>
			3407	3459	52	<b>2,5</b>	20,81	17,16	1291,66	13000	<b>1193,16</b>
			3459	3521	62	<b>3,02</b>	20,54	17,47	1291,66	13000	<b>1001,55</b>
<b>ROP moy =3,05 m/h</b> <b>Pm moy =1414,94 \$/m</b>											

**Tab IV.03 : Prix / mètre des outils PDC dans la phase 6" (Cambrien Ra + R2) des puits horizontaux**

Outil	Fabricant	Puits	Intervalle foré		M (m)	Rop (m/h)	T <sub>r</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)
			de	à							
FM2941	DBS	OMOZ463	4130	4453	323	<b>7,1</b>	45,5	21,46	1291,66	22106	<b>336,21</b>
		OMOZ631	3937	4022	85	<b>6,66</b>	21,77	19,99	1291,66	22106	<b>894,66</b>
			4087	4261	174	<b>5,46</b>	31,86	20,87	1291,66	22106	<b>518,48</b>
		OMNZ842	4261	4314	53	<b>6,8</b>	7,79	21,43	1291,66	22106	<b>1129,21</b>
			3606,5	3803	196,5	<b>5,67</b>	34,66	18,52	1291,66	22106	<b>462,07</b>
		OMPZ34	4003	4200	197	<b>6,6</b>	29,85	20,51	1291,66	22106	<b>442,41</b>
			4147	4287	140	<b>6,75</b>	20,74	21,09	1291,66	22106	<b>543,83</b>
		OMLZ512	3858	4017	159	<b>5,04</b>	31,55	19,69	1291,66	22106	<b>555,29</b>
SE3833i	DBS	OMNZ842	4262	4333	71	<b>5,16</b>	13,76	21,49	1291,66	22106	<b>952,63</b>
			3803	3887	84	<b>3,19</b>	26,33	19,23	1291,66	36399	<b>1133,89</b>
DS143D	HYCALOG	OMNZ842	3887	4003	116	<b>4,87</b>	23,82	19,73	1291,66	36399	<b>798,71</b>
			4200	4423	223	<b>7,21</b>	30,93	21,56	1291,66	23090	<b>407,58</b>
		OMPZ34	4423	4449	26	<b>4,53</b>	5,74	22,18	1291,66	23090	<b>2275,12</b>
			3722	3858	136	<b>6,54</b>	20,3	18,95	1291,66	23090	<b>542,56</b>
M09PX	SMITH	OMLZ512	4017	4147	130	<b>6,05</b>	21,49	20,41	1291,66	23090	<b>593,93</b>
			4287	4438	151	<b>7,02</b>	21,51	21,81	1291,66	23000	<b>522,88</b>
		OMOZ632	4192	4262	70	<b>3,46</b>	20,23	21,14	1291,66	23000	<b>1091,94</b>
			4333	4395	62	<b>4,35</b>	14,25	21,82	1291,66	23000	<b>1122,42</b>
			3788	3943	155	<b>2,4</b>	64,58	19,33	1291,66	23000	<b>847,63</b>
<b>Rop moy =5,52 m/h</b> <b>Pm moy =798,50\$/m</b>											

**Tab.IV.04 : Prix / mètre des outils imprégnés dans la phase (Cambrien R2+ Ra) des puits horizontaux**

Outil	Fabricant	Puits	Intervalle foré		M (m)	Rop (m/h)	T <sub>r</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)
			de	à							
KGR50BEBX	SMITH	OMJZ622	3786	3997	211	<b>3,33</b>	63,28	19,45	1291,66	26500	<b>632,03</b>
			3997	4081	84	<b>4,29</b>	19,56	20,19	1291,66	26500	<b>926,71</b>
			4081	4119	38	<b>4,99</b>	7,61	20,5	1291,66	26500	<b>1652,86</b>
			4119	4134	15	<b>4,23</b>	3,55	20,63	1291,66	26500	<b>3848,82</b>
S280G8	HUGHES	OMOZ632	4019	4179	160	<b>3,5</b>	45,71	20,5	1291,66	31000	<b>728,26</b>
DPO585	HUGHES	OMPZ261	3490	3819	329	<b>3,49</b>	94,27	18,3	1291,66	31000	<b>536,18</b>
			4137	4408	271	<b>2,89</b>	93,77	21,4	1291,66	31000	<b>663,32</b>
472GFDT	HYCALOG	OMLZ512	3830	3928	98	<b>3,26</b>	30,06	19,4	1291,66	28000	<b>937,61</b>
			4076	4192	116	<b>2,97</b>	39,06	20,7	1291,66	28000	<b>906,81</b>
OMOZ466		3959	4130	171	<b>3,65</b>	46,8	20,2	1291,66	28000	<b>669,83</b>	
473GFDT		OMPZ34	3572	3722	150	<b>3,68</b>	40,8	18,2	1291,66	28000	<b>694,72</b>
		OMLZ512	3557	3737	180	<b>2,57</b>	70,04	18,2	1291,66	28000	<b>788,76</b>
			3737	3830	93	<b>3,15</b>	29,52	18,9	1291,66	28000	<b>973,57</b>
TiP2352	DBS	OMPZ173	3803	4067	264	<b>4,89</b>	53,99	19,7	1291,66	30000	<b>474,18</b>
Ti3184P		OMNZ842	3333	3469	136	<b>2,87</b>	47,39	17	1291,66	30000	<b>832,13</b>
			3469	3607	137,5	<b>5,84</b>	23,54	17,7	1291,66	30000	<b>605,59</b>
<b>ROP moy =3,73 m/h</b> <b>Pm moy =991,96 \$/m</b>											

**Tab.IV.05 : Prix / mètre des outils imprégnés dans la phase (Cambrien Ri+ Ra) des puits horizontaux**

Outil	Fabricant	Puits	Intervalle foré		M (m)	Rop (m/h)	T <sub>r</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)	
			de	A								
KGR50BCTPX	SMITH	MDZ595	3289	3409	120	<b>4,13</b>	29	16,74	1291,66	26500	<b>713,17</b>	
			3409	3683	273	<b>3,73</b>	73,2	17,73	1291,66	26500	<b>527,29</b>	
			3683	4192	509	<b>2,92</b>	174,48	19,68	1291,66	26500	<b>544,77</b>	
		OMKZ241	3361.5	3404	43,5	<b>3,2</b>	13,29	16,91	1291,66	26500	<b>1505,93</b>	
		OMLZ33	3457	3540	83	<b>3,45</b>	24,07	17,49	1291,66	26500	<b>966,04</b>	
		OMNZ142	3443	3404	61	<b>3,08</b>	19,8	17,36	1291,66	26500	<b>1221,28</b>	
		MDZ608	3487	3821	334	<b>3,18</b>	105,1	18,27	1291,66	26500	<b>556,44</b>	
		MDZ588	4092	4360	268	<b>4,12</b>	65,07	21,13	1291,66	26500	<b>514,33</b>	
		MDZ589	3445	3525	80	<b>3,62</b>	21,11	17,42	1291,66	26500	<b>953,35</b>	
		MDZ592	3411	3430	19	<b>3,92</b>	4,85	17,1	1291,66	26500	<b>2886,94</b>	
OMLZ652	3473	4061	588	<b>2,94</b>	200	18,83	1291,66	26500	<b>525,77</b>			
HHD372G8	HUGHES	ONMZ513	3728	4132	404	<b>3,39</b>	119,02	19,65	1291,66	31000	<b>520,09</b>	
			4132	4480	348	<b>3,49</b>	99,6	21,53	1291,66	31000	<b>538,67</b>	
		ONMZ443	3431	3916	485	<b>4,06</b>	119,53	18,36	1291,66	31000	<b>431,15</b>	
			3918	4174	256	<b>3,17</b>	80,83	20,23	1291,66	31000	<b>631,00</b>	
			4174	4363	189	<b>4,25</b>	44,5	21,34	1291,66	31000	<b>613,98</b>	
		ONMZ303	3449	4164	715	<b>4,08</b>	175,45	19,03	1291,66	31000	<b>394,69</b>	
			4164	4451	287	<b>3,45</b>	83,1	21,53	1291,66	31000	<b>578,91</b>	
ONIZ421	3747	4100	353	<b>5,49</b>	64,23	19,61	1291,66	31000	<b>394,60</b>			
T13085B	DBS	MDZ539	4008	4051	43	<b>3,18</b>	13,5	20,14	1291,66	30000	<b>1708,17</b>	
			3456	3602	146	<b>3,14</b>	46,44	17,64	1291,66	30000	<b>772,39</b>	
			4175	4355	180	<b>4,49</b>	40,05	21,32	1291,66	30000	<b>607,05</b>	
DPO585	HYCALOG	ONMZ143	3490	3819	329	<b>4,21</b>	74,53	18,47	1291,66	31000	<b>459,34</b>	
			3819	4137	318	<b>3,2</b>	99,25	19,89	1291,66	31000	<b>581,41</b>	
			4137	4408	271	<b>3,01</b>	89,8	21,36	1291,66	31000	<b>644,21</b>	
Ti3244	DBS	OMOZ801	4143	4311	168	<b>3,71</b>	45,28	21,1	1291,66	30000	<b>688,93</b>	
			3607	3784	177	<b>3,73</b>	47,45	18,5	1291,66	30000	<b>650,76</b>	
			3784	3984	200	<b>4,17</b>	47,96	19,4	1291,66	30000	<b>585,03</b>	
472GFPTX	HYCALOG	OMOZ64	3932	4032	100	<b>2,53</b>	39,5	21,38	1291,66	28000	<b>1066,36</b>	
			OMKZ702	3654	3733	79	<b>4,08</b>	19,4	18,46	1291,66	28000	<b>973,45</b>
				4288	4517	229	<b>3,79</b>	60,4	22,01	1291,66	28000	<b>587,10</b>
<p><b>ROP moy =3,68 m/h</b>  <b>Pm moy =855,62 \$/m</b></p>												

### IV.III. Étude de performance des outils

#### IV.III.1. Comportement des outils dans la cambrien (Ra et R2)

Tab.IV.06 : Comparaison entre les outils (Tricône et Imprégné) dans la cambrien Ra

Type d'outil	ROP <sub>moy</sub> (m/h)	Pm <sub>moy</sub> (\$/m)	ROP <sub>moy</sub> /Pm <sub>moy</sub>
Tricônes	2,74	1360,64	<b>0,002</b>
Imprégnés	3,73	991,96	<b>0,004</b>



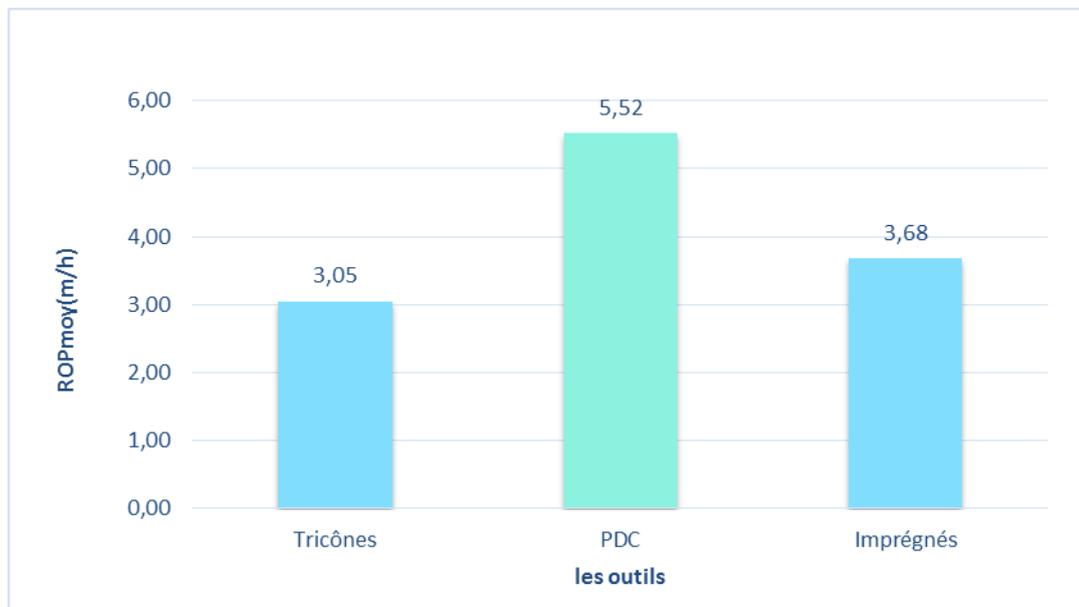
Fig.IV.01 : Variation des ROP moy (m/h) des outils tricône et imprégné dans la cambrien Ra



Fig.IV.02 : Variation de Pm moy (\$/m) entre les outils tricône et imprégné dans la cambrien Ra

**Tab.IV.07 : Comparaison entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien****R<sub>2</sub>**

Type d'outil	ROP <sub>moy</sub> (m/h)	Pm <sub>moy</sub> (\$/m)	ROP moy/Pm moy
Tricônes	3,05	1414,94	<b>0,002</b>
PDC	5,52	798,50	<b>0,007</b>
Imprégnés	3,68	855,62	<b>0,004</b>

**Fig.IV.03 : Variation de ROP<sub>moy</sub> entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien R<sub>2</sub>****Fig.IV.04 : Variation de Pm<sub>moy</sub> entre les outils tricônes, PDC et imprégnés dans la cambrien R<sub>2</sub>**

## IV.III.2. Étude comparative entre les outils de même type

Tab.IV.08 : comparaison entre les outils imprégnés utilisé dans la cambrien Ra

Outil	Fabricant	Rop (m/h)	P <sub>m</sub> (\$/m)	ROP moy/Pm moy
KGR50BCTPX	SMITH	3,48	992,30	0,004
KGR50BEBX		4,21	1765,11	0,002
TiP2352	DBS	4,89	474,18	0,01
Ti3184P		4,36	718,86	0,006
Ti3085B		3,60	1029,21	0,004
Ti3244		3,87	641,57	0,006
472GFDT	HYCALOG	3,29	838,08	0,004
473GFDT		3,13	819,02	0,004
472GFPTX		3,47	875,64	0,004
DPO585		3,33	576,89	0,006
HHD372G8	HUGHES	3,92	514,32	0,008
S280G8		3,50	728,26	0,005



**Fig.IV.05** : Variation de ROP moy entre les outils imprégnés utilisé dans la cambrien Ra



Fig.IV.06 : Variation de Pm moy entre les outils imprégnés utilisé dans la cambrien Ra

Tab.IV.09 : Comparaison entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R2 :

Outils	Fabricant	ROP (m/h)	Pm (s/m)	ROP moy/Pm moy
FM2941	DBS	6,14	648,31	<b>0,0095</b>
SE3833i		4,03	966,30	<b>0,0042</b>
DS143D	HYCALOG	6,08	954,79	<b>0,0064</b>
MOPX	SMITH	4,31	896,22	<b>0,0048</b>

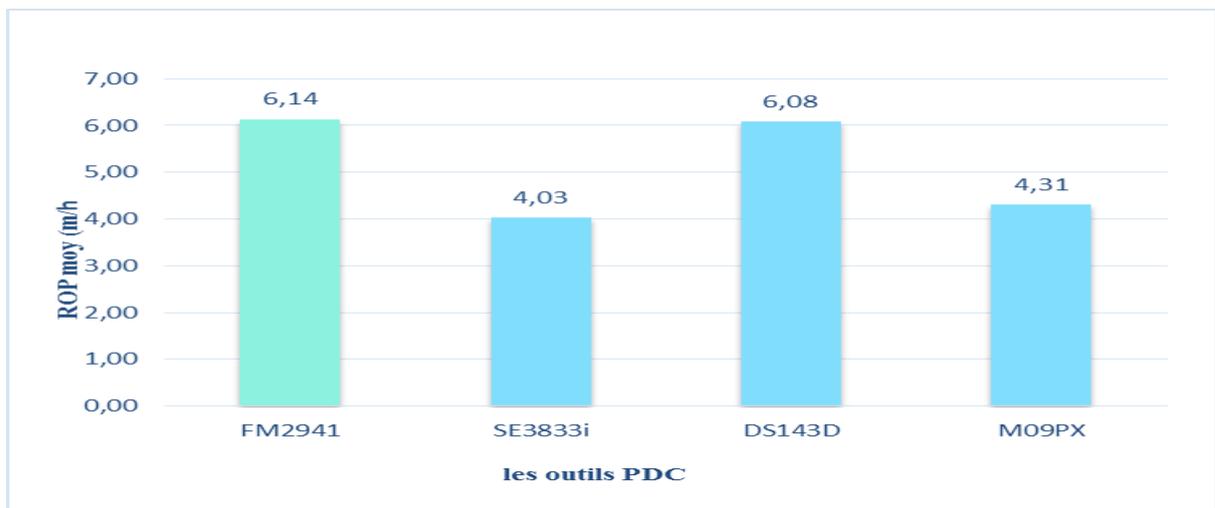


Fig.IV.07 : Variation de ROP moy entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R2

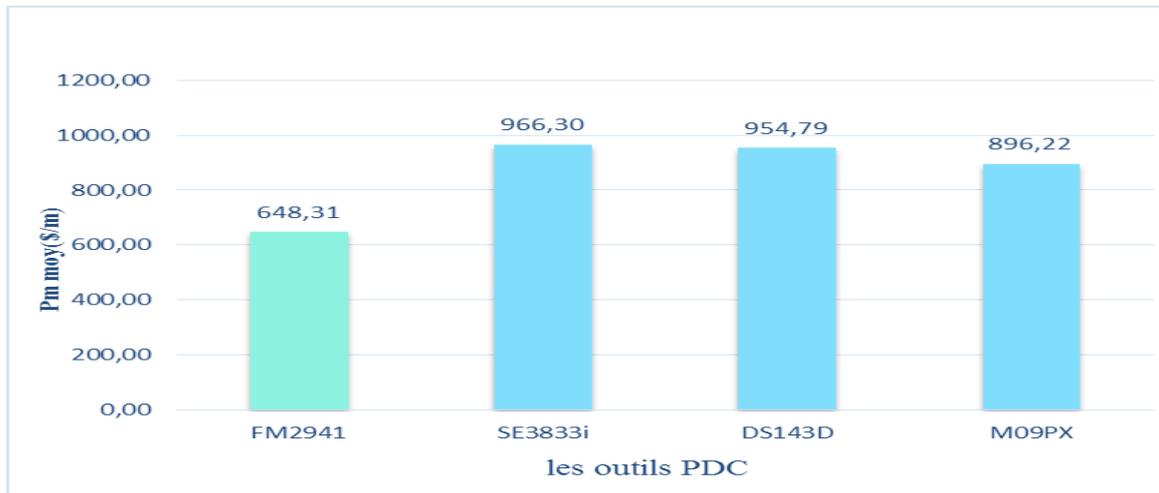


Fig.IV.08 : Variation de Pm moy entre les outils PDC utilisé dans le cambrien R2

Tab.IV.10 : comparaison entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra

Outil	Fabricant	ROP(m/h)	Pm(\$/m )	ROPmoy/Pm moy
EP4872	HUGHES	3,10	1380,60	<b>0,002</b>
EP4732		3,07	1189,72	<b>0,003</b>
EP5051		2,87	1168,57	<b>0,002</b>
EHP83DHLK	HYCALOG	3,28	1523,17	<b>0,002</b>
EHP61DHLK		5,95	560,03	<b>0,011</b>
XR50YODPD	SMITH	1,84	1600,11	<b>0,001</b>
XR40YDDPD		3,33	1572,01	<b>0,002</b>

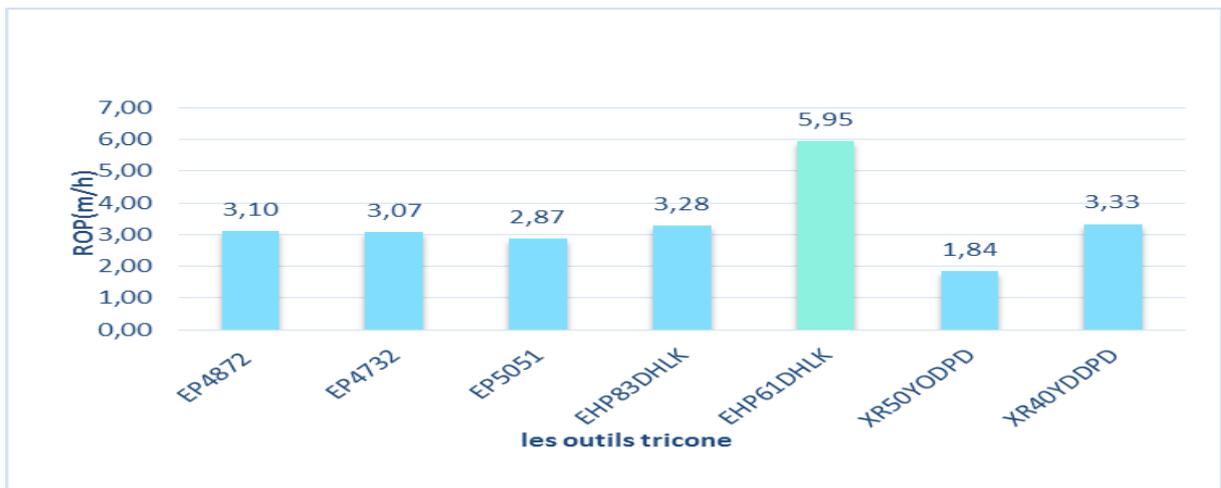
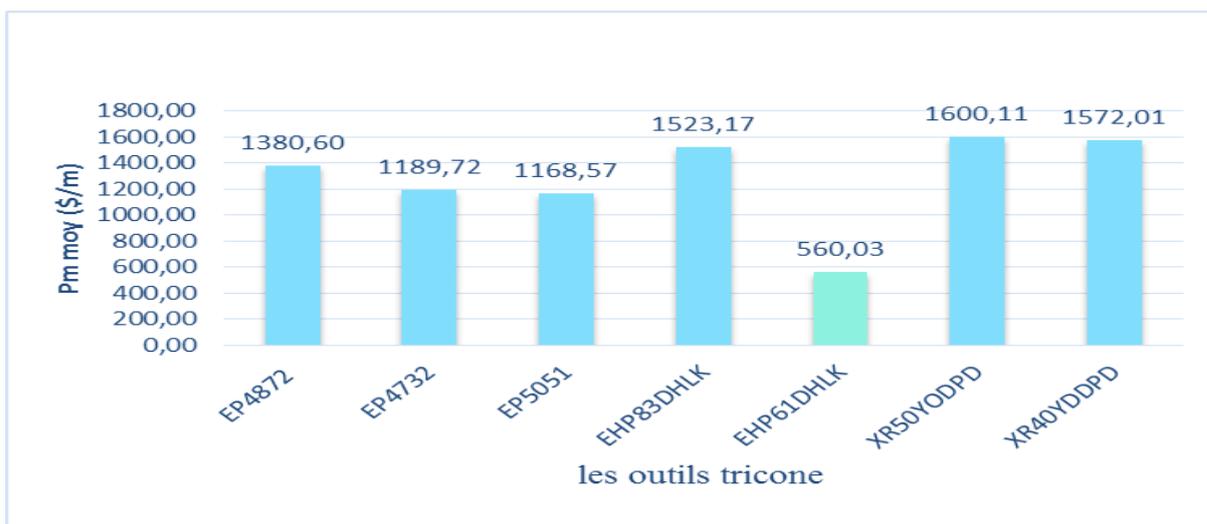


Fig.IV.09 : Variation de ROP moy entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra



**Fig.IV.10** : Variation Pm moy entre les outils tricône utilisé dans le cambrien Ra

#### IV.III.3.Résultats et commentaires

A travers des analyses effectuées sur 34 puits forés dans la région de Hassi Messaoud 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 dans la formation cambrien, sont comme suit (voir tableaux ci-dessus) :

##### A- cambrien Ra + R2

- **Les outils imprégné** : ils ont **ROP moy = 3,73 m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **991,96 \$/m**, contre une vitesse de **2.74.m/h** et un prix du mètre **1360,64\$/m** foré pour **les outils tricônes**.

##### B- cambrien R2

- **les outils PDC** : ils ont **ROP =5,52m/h**, avec une réduction moyenne du prix du mètre foré de **798,50 \$/m** par rapport aux outils imprégné et tricônes.

Aussi, les performances enregistrées par des outils de même type et par type de formations sont comme suit :

##### C- cambrien Ra + R2 (outils imprégnés)

- L'outil **TiP2352** de la compagnie **DBS** est plus performant de point de vue avancement et prix moyen de mètre foré (**ROP = 4,89m/h**, prix moyen de mètre foré = **474,18 \$/m**), par rapport aux autres types d'outils imprégnés.

**D-cambrien R2 (les outils PDC)**

- l'outil **FM2941** de la compagnie **DBS** est plus performant de point de vue avancement (**ROP =6,14 m/h**, et un prix moyen de mètre foré **P<sub>m</sub> =648,31 \$/m**), par rapport aux autres types d'outils PDC.

**E-cambrienRa+R2 (les outils tricône)**

- l'outil **EHP83DHLK** de la compagnie **HYCALOG** est plus performant de point de vue avancement **ROP =5,95m/h**, et un prix moyen du mètre foré de **560 ,03 \$/m**), par rapport aux outils tricône.

**IV.IV.Courbe d'avancement d'un outil**

Le prix de mètre foré est :

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

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

l'origine, avec :  $A = \frac{P_h}{P_m}$  et  $B = \frac{P_o}{P_m} + \frac{P_h}{P_m} T_m$

Calcul de l'abscisse et de l'ordonnée :

a- L'abscisse :  $y = 0 \Rightarrow X = -\frac{B}{A}$  D'ou :  $X = -T_m - \frac{P_o}{P_h} x$

b- L'ordonnée :  $X = 0 \Rightarrow y = B$  D'ou :  $y = \frac{P_o + P_h \cdot T_m}{P_m}$

**L'avancement d'outil FM2941 dans le puits OMOZ463 est représenté dans le tableau suivant [3] :**

M(M)	0	191	95	37
Tf (Hers)	0	19	19	7,52
C M(m)	0	191	286	323
C Tf (Hers)	0	19	38	45,52

Les données sont représentées dans le tableau suivant :

M (m)	Rop (m/h)	Tf (h)	Tm (h)	Ph (\$/h)	Po (\$)	Ph/Pm	Po+(Ph*Tm)/Pm	Pm (\$/m)
323	7,10	45,52	21,46	1291,66	22106	3,84	148,2	336,21

L'équation de la droite de rentabilité de cet outil s'écrit : **M=3,84T<sub>f</sub>+148,2**

Les conditions initiales :

**T<sub>f</sub> = 0 => M = 148 ,2**

**T<sub>f</sub> = -38,59 => M =0**

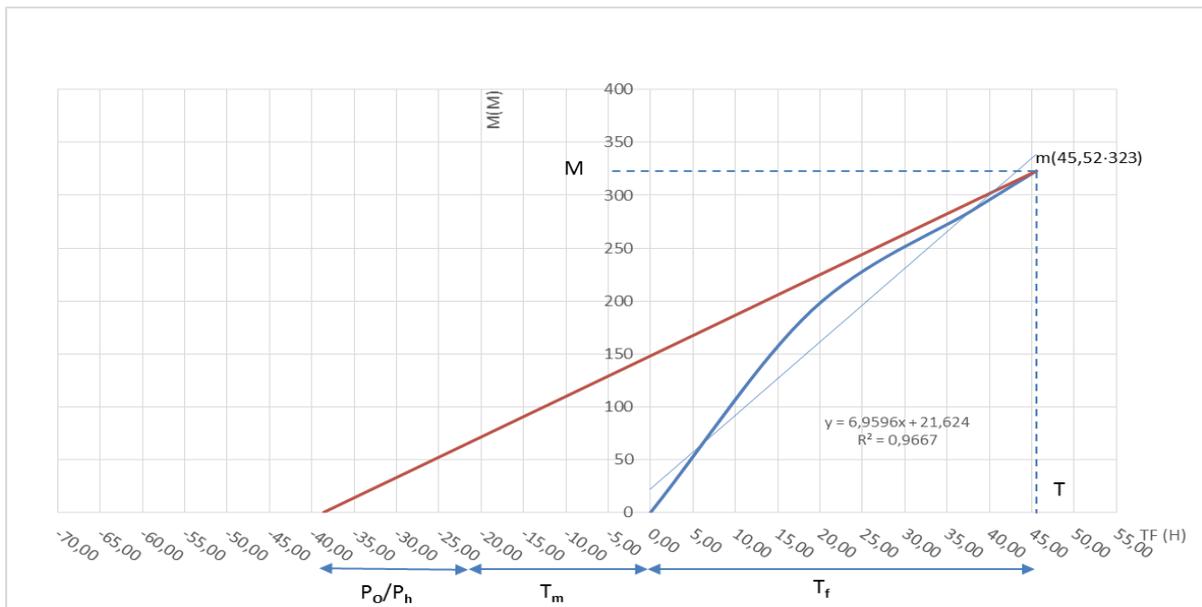


Fig.IV.11 : Courbe d'avancement d'un outil PDC FM2941

Après un temps de rotation OT=45.52 h, l'outil FM2941 a effectué un métrage M =323 représenté par le point  $m(45,52 \text{ } .323)$  sur la courbe. La pente de la droite  $B_m$  représente l'avancement commercial de l'outil. En effet, nous avons :

$$\text{Pente de } B_m = \frac{T_m}{BA + AO + OT} \quad \text{avec } \mathbf{B_m = tga}$$

$$\text{Que l'on peut écrire : } B_m = \frac{M}{\frac{P_o}{P_h} + T_m + T_f} \quad B_m = \frac{323}{17,11 + 21,46 + 45,52}$$

$$\mathbf{B_m = 3,84}$$

Le prix du mètre sera minimal ( $P_m = 336,21(\$/m)$ ) ou l'avancement commercial maximal lorsque la pente de la droite  $B_m$  sera maximale (  $tga = \mathbf{B_m = 3.84}$ ), c'est-à-dire lorsque cette droite sera tangente à la courbe d'avancement.

Cet outil est remonté avant la fin du nombre d'heures de rotation sans usure suite à la fin de phase

**L'avancement d'outil 472GFDT imprégné dans le puits OMOZ466 est représenté dans le tableau suivant [3] :**

M(M)	0	112	59
Tf (Hers)	0	24	22.8
C M(m)	0	112	171
C Tf (Hers)	0	24	46.8

Les données sont représentées dans le tableau suivant :

M (m)	Rop (m/h)	T <sub>f</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	Ph/Pm	Po+(Ph*Tm)/Pm	P <sub>m</sub> (\$/m)
171	3.70	46.8	20.2	1291,66	28000	1.93	80.75	669.83

L'équation de la droite de rentabilité de cet outil s'écrit :  $M=1.93T_f+80.75$

Les conditions initiales :

$T_f = 0 \Rightarrow M = 80,75$

$T_f = -41,83 \Rightarrow M = 0$

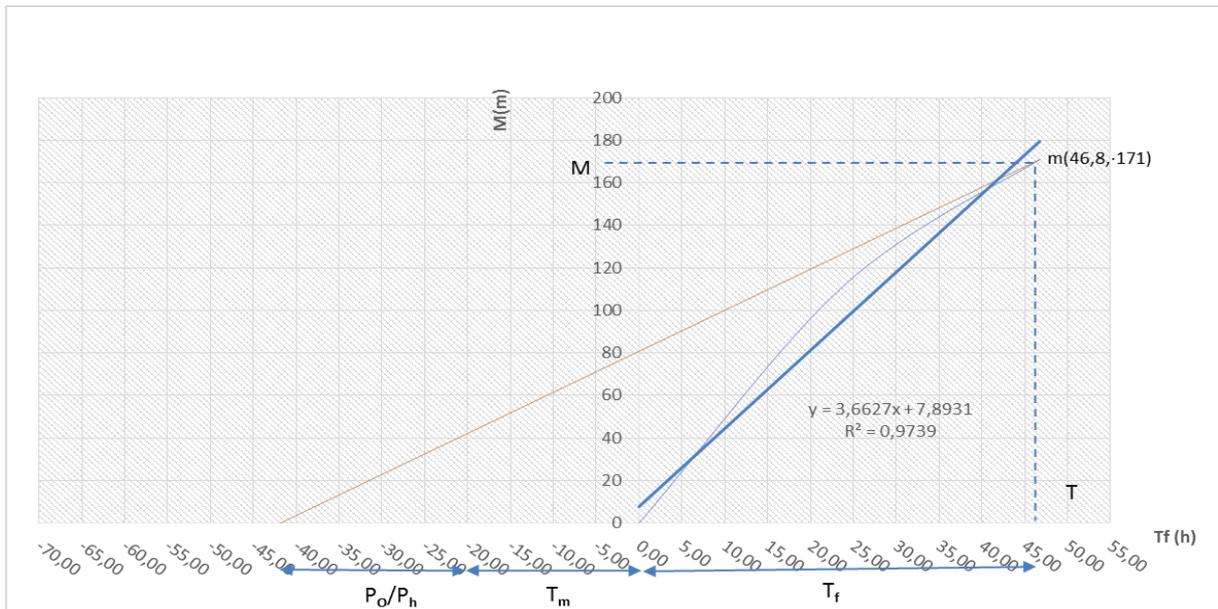


Fig.IV.12 : Courbe d'avancement d'un outil imprégné 472GFDT

Après un temps de rotation OT=46,8 h l'outil 473GFDT a effectué un métrage M =171m représenté par le point m (46 ,8.171) sur la courbe.

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

$$AN : \quad B_m = \frac{171}{21,67+46,8+20,2} \quad \text{Pente de } B_m = \frac{T_m}{BA + AO + OT}$$

**B<sub>m</sub>=1,92**

Le prix du mètre sera minimal (P<sub>m</sub> = **669,59(\$/m)**) ou l'avancement commercial maximal lorsque la pente de la droite Bm sera maximale (**tga =B<sub>m</sub>=1,92**), c'est-à-dire lorsque cette droite sera tangente à la courbe d'avancement.

Cet outil est remonté à la fin du nombre d'heures de rotation

### Interprétation

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

Pour l'outil FM2941 son  $P_m = 336,21 (\$/m)$  et sa pente  $B_m = 3,84$ .

Pour l'outil 472GFDT son  $P_m = 669,59 (\$/m)$  et sa pente  $B_m = 1,92$ .

Donc on constate que l'outil **PDC FM2941** est le meilleur.

### IV.V.Méthode de Break Even

Nous voulons comparer la rentabilité de l'outil PDC FM2941 par rapport d'un outil imprégné 472GFDT descendu dans deux puits voisins (puits OMOZ466 et OMOZ463).

L'outil 472GFDT (A) :

M (m)	T <sub>f</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)
171	46,8	20,2	1291,66	28000	<b>669,83</b>

L'outil FM2941 (B):

M(m)	T <sub>f</sub> (h)	T <sub>m</sub> (h)	P <sub>h</sub> (\$/h)	P <sub>o</sub> (\$)	P <sub>m</sub> (\$/m)
323	45,5	21,46	1291,66	22106	<b>336,21</b>

L'avancement de l'outil PDC FM2941 :

M(m)	0	191	286	323
T <sub>f</sub> (Hers)	0	19	38	45,52

Prix moyen des mètres forés des outils 472GFDT (A) :

$$P_{mA} = \frac{P_{oA} + P_h(T_{mA} + T_{fA})}{M_A}$$

$$\text{AN : } P_m = \frac{28000 + 1291,66 (46,8 + 20,2)}{171} = 669,83 \$/m$$

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 :

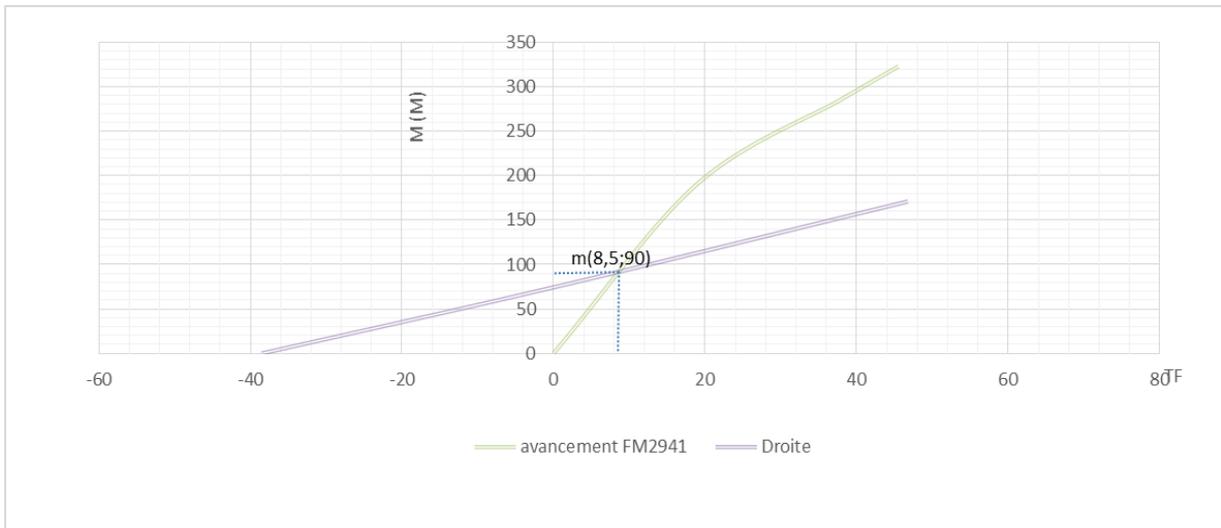
$$P_{mA} = \frac{P_{oB} + P_h(T_{mB} + T_{fB})}{M_B} \Leftrightarrow M_B = \frac{P_{oB} + P_h(T_{mB} + T_{fB})}{P_{mA}} \Rightarrow M_B = \frac{P_h}{P_{mA}} T_f + \frac{(P_{oB} + P_h T_{mB})}{P_{mA}}$$

$$\text{AN: } M_B = \frac{1291,66}{669,83} T_f + \frac{22106 + 1291,66 (21,46)}{669,83} \Rightarrow M_B = 1,93 T_f + 80,75$$

Les conditions initiales :

$$T_f = 0 \Rightarrow M = 80.75$$

$$T_f = -41.88 \Rightarrow M = 0$$



**Fig.IV.13** : la courbe de rentabilité par la méthode de Brik even

Le point d'intersection  $m(8,5,90)$  entre la droite (XY) et la courbe d'avancement représente une performance à réaliser par l'outil FM2941 pour que son coût au mètre foré soit égal au coût du mètre foré par l'outil A ( $P_{mB} = P_{mA}$ ).

L'ensemble des points du graphe, situés au-dessus de point d'intersection représentent les performances à réaliser par l'outil FM2941 pour que son coût du mètre soit inférieur à celui de l'outil 742GFDT ( $P_{mB} < P_{mA}$ ). ceux situés sous le point d'intersection représentent l'ensemble des performances pour lesquelles l'outil FM2941 ne sera pas rentable par rapport à l'outil de référence.

*CONCLUSION  
ET  
RECOMMENDATIONS*

## **Conclusions et recommandations**

L'objectif principal de forage est d'atteindre un gisement pétrolier à moindre coût et dans les meilleures conditions de sécurité.

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 présente étude nous a permet de constater que la meilleure façon de procéder pour sélectionner l'outil le mieux adapté à une formation ou à une phase de forage peut être obtenue par des corrélations entre les outils utilisés, les paramètres appliqués, et les caractéristiques des roches.

Aussi, la rentabilité d'un outil dépend de plusieurs facteurs qui contribuent individuellement ou combiné à l'augmentation de la ROP. Elle peut être s'exprimer par un aspect technico-économique défini par la qualité du puits et le prix de revient du mètre foré.

Les résultats obtenus relatifs à la vitesse d'avancement (ROP) et le prix de mètre foré montrent que les outils imprégnés sont les plus rentables dans le cambrien Ra tandis que les outils PDC sont les plus performants dans le cambrien R2.

Aussi, dans le même type d'outils, on a pu constater que dans les outils imprégnés, l'outil Tip2352 de la compagnie HYCALOG est le plus rentable dans le cambrien Ra+R2.

La même étude montre que l'outil PDCFM2941 de la compagnie DBS est le plus rentable dans le cambrien R2 comparativement avec les autres outils PDC.

Il y a lieu de noter que les résultats obtenus nécessite d'être validés plus tard dans les conditions réelles d'exploitation terrain, ces résultats peuvent aussi appliqués dans d'autres formations en modifiant uniquement les critères de choix des outils de forage.

Aussi, l'étude s'appuie sur une base de donnée de 35 puits et qui nécessite d'être compléter par un nombre suffisant de puits afin de rapprocher l'étude aux conditions réelle de travail.

*REFERENCES*  
*BIBLIOGRAPHIQUE*

## Références bibliographique

- [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>> -Fiche de puits OMOZ463 et OMOZ466.
- [4]Document <<SONATRACH>> -Géologie de Hassi Messaoud HMD-
- [5]Document <<SONATRACH>> -Module M1 Formation JDF
- A.SLIMANI.
- [6]Document <<SONATRACH>>-Procédures de forage horizontal-SH/DF Janvier 2003.
- [7]Forage dirigé –Ingénierie et méthodes-
- J.P SZEZUKA Edition 3.3 Juin 2005.
- [8]Formulaire du foreur Editions TECHNIP 1974,1989.
- [9]Les outils de forage SONATRACH Division de Forage DF
- F.GRONDIN Edition Janvier 2004 .
- [10]Les outils de forage ENSPM Formation Industrie
- Forage –Production -Gisement Edition 1999.
- [11]Programmation et réalisation d'un puits horizontal
- Horizontal Drilling Training Manual ANADRILL 1991.
- [12]Techniques d'exploitation pétrolière -Le Forage -
- J.P GUYEN Editions TECHNIP 1993.