



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



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Benziane rabab meriem

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie Gazier

Thème

**Etude comparative entre les outils de Forage tricône,
Pdc et imprègné.**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
HADJADJ Asma	MCB	Président
YOUCEFI Med Riyadh	MCB	Examinateur
GHALEM Khaled	MAA	Rapporteur

Année Universitaire : 2022-2023

عنوان المذكرة : دراسة مقارنة لأدوات الحفر الثلاثية وأدوات الألماس متعددة البلورات وأدوات الحفر المشبعة
اللقب : بن زيان الإسم : رباب مريم المؤطر: الاستاذ غالم خالد

ملخص : تقدم هذه الرسالة دراسة مقارنة تقييم أداء وكفاءة التكلفة لثلاثة أنواع من أدوات الحفر المستخدمة على نطاق واسع: أدوات الحفر الثلاثية وأدوات الألماس متعددة البلورات وأدوات الاستيفاء. تهدف البحث إلى تحديد نوع الأداة الأمثل لتشكيلات جيولوجية مختلفة من خلال تحليل كفاءة الحفر والمتانة واعتبارات اقتصادية. من خلال تحليل شامل للبيانات ودراسات الحالة، تقدم هذه الدراسة نصائح قيمة للمساعدة في اتخاذ القرارات في عمليات الحفر، والمساهمة في تحسين الاستكشاف والإنتاج بشكل أكثر فعالية وكفاءة من الناحية التكلفة في صناعة النفط والغاز.

كلمات مفتاحية: الحفر، التحسين، أداة الحفر، سرعة التقدم

Memory title : Comparative Study of Tricone, PDC, and Impregnated Drill Bits

Name :Benziane First name :Rabab meriem Directed by :Mr Ghalem khaled

Abstract: This thesis presents a comparative study evaluating the performance and cost efficiency of three widely used drill bit types: tricone, polycrystalline diamond compact (PDC), and impregnated bits. The research aims to determine the optimal drill bit type for different geological formations by analyzing drilling efficiency, durability, and economic considerations. Through comprehensive data analysis and case studies, this study provides valuable insights to aid in decision-making for drilling operations, contributing to more effective and cost-effective exploration and production in the oil and gas industry.

Key words: Drilling, optimization, drilling tool, feed rate.

Titre du mémoire : Etude comparative entre les outils de forage tricône, pdc et imprègné

Nom : Benziane Prénom : Rabab meriem Encadreur : MR Ghalem khaled

Résumé : Cette thèse présente une étude comparative évaluant la performance et la rentabilité de trois types d'outils de forage largement utilisés : tricône, diamant compact polycristallin (PDC) et outils imprégnés. L'étude vise à déterminer le type optimal d'outil de forage pour différentes formations géologiques en analysant l'efficacité du forage et la rentabilité. Grâce à une analyse complète des données et à des études de cas, cette étude fournit des informations précieuses pour aider à la prise de décision lors des opérations de forage, contribuant ainsi à une exploration et une production plus efficaces et plus rentables dans l'industrie du pétrole et du gaz.

Mots clés : Forage, optimisation, outil de forage, vitesse d'avancement

SOMMAIRE

Remerciements.

Dédicace.

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Liste des abréviations.

Introduction générale.

Chapitre I : Généralités Sur le Champ de Hassi- Messaoud

1	Historique du champ de Hassi-Messaoud.....	2
2	Situation Géographique du puits ONMZ 313.....	2
3	Description lithologique du puits ONMZ 313.....	3
4	Programme des outils forage du puits ONMZ313.....	5

Chapitre II : Le Forage Horizontal

1	Introduction.....	7
2	Avantages et inconvénients du forage horizontal.....	8
3	Les types des puits horizontaux.....	9
3.1	Les puits à long déplacement.....	9
3.2	Les puits en Re-entry.....	9
3.3	Les puits multilatéraux.....	10
4	La Lithologie du drain du réservoir.....	10
5	Les équipements spécifiques au forage dirigé.....	11
5.1	Moteurs de fond.....	11
5.2	Les stabilisateurs.....	12
5.3	Equipements amagnétiques.....	12
5.4	Raccords d'orientation.....	13
5.5	Raccords coudés.....	13

Chapitre III : Les Outils de Forage

PARTIE I : Généralités.

1	Introduction.....	14
2	Les différents types des outils de forage.....	14
2.1	Les outils à molettes	14

2.2 Les outils à éléments de coupe fixes.....	15
2.2.1 Les outils PDC	15
2.2.2 Types de diamant.....	16
3 Principe de fonctionnement des outils	17
3.1 Outils tricône	17
3.2 Outils PDC	18
3.3 Outil imprégné	20
4 Comparaison entre les caractéristiques des outils de forage.....	21

Chapitre IV : Etude Comparative entre les outils de Forage

1 Introduction.....	23
2 Les outils utilisés	23
3 Le prix de mètre foré.....	24
3.1 Méthode de calcul Vitesse d'avancement (ROP) et Prix mètre foré.....	24
4 Etude comparative entre les outils de forage	24
1.1 Etude comparative entre des outils de même type.....	24
4.1.1 Les outils tricônes.....	24
4.1.2 Les outils PDC.....	25
4.1.3 Les outils imprégnés.....	28
4.2 Comparaison entre les outils tricônes, PDC et imprégnés.....	30
Conclusion.....	31

Références bibliographique

REMERCIEMENT

*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 notre promoteur : Mr ghalem khaled Pour avoir
accepté de diriger mon travail, pour ses précieux conseils, et pour
son esprit d'ouverture et sa disponibilité.*

*Je voudrais également remercier une personne qui m'a beaucoup aidé
durant mon parcours universitaire et lui souhaiter le meilleur. Il était
comme un frère pour moi et a partagé toutes ses connaissances. Je
vous souhaite d'être toujours heureux, comme votre nom.*

*Enfin, je tiens à remercier les membres du jury qui me feront
l'honneur de juger mon travail.*

DEDICACE

« Qui a dit que je suis elle. Il l'a eu »

Aux mains pures qui ont retiré de mon chemin les épines de l'échec.

*À ceux qui m'ont soutenu avec amour quand je suis faible...À ceux
qui ont dessiné l'avenir avec des lignes de confiance et d'amour...*

« C'est ma famille »

*Je dédie la joie de ma remise de diplôme à cette grande personne qui
a toujours souhaité que ses yeux admettent me voir un jour comme
celui-ci à...*

« Ma mère »

*Et à celui dont la sueur couronnait son front et m'a appris que le
succès ne peut venir qu'avec de la patience Et la persévérance.*

« Mon père »

Et à ceux qui m'ont soutenu dans les moments difficiles.

« Mes Amies »

LISTE DES TABLEAUX

Tab I.1. Programme d'outils et paramètres de forage.....	5
Tab III.1. Comparaison entre les caractéristiques des outils de forage.....	28
Tab IV.1. Les différents essais des outils.....	29
Tab IV .2 . Etude comparative entre des outils de même type.....	31
Tab IV.3. Etude comparative entre des outils de même type.....	33
Tab IV.4. Etude comparative entre des outils de même type.....	35
Tab IV.5. Comparaison entre les outils tricônes, PDC et imprégnés.....	37

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Situation Géographique du puits ONMZ 313.....	3
Figure I.2: Profil du puits ONMZ313	6
Figure II.1: Profil d'un puits horizontal	8
Figure II.2: Les puits en Re-entry	10
Figure II.3: Les puits multilatéraux	10
Figure II.4: Moteur de fond	12
Figure II.5: Différents types des moteurs & Géométrie des moteurs.....	13
Figure III.1: Les outils à molette (tricône).....	15
Figure III.2: Principe de construction des molettes des tricônes.....	15
Figure III.3: Les outils à diamant (PDC).....	16
Figure III.4: Principe de fonctionnement d'un outil PDC.....	18
Figure III.5: Angles caractéristiques d'un PDC.....	20
Figure III.6 : Longueur utile L_d	21
Figure III.7: Outil imprégné.....	22

LISTE DES ABEVIATIONS

HMD : Hassi Messaoud.

BHA : Bottom Hole Assembly.

PDC : Polycristalline diamand compact.

TSP: Thermally Stable Polycrystalline.

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

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

RPM : Révolution Par Minute (Vitesse de rotation de l'outil de forage).

PDM : Positive Déplacement Motors.

MWD : les mesures pendant le forage.

P_m : est le prix de mètre foré,

P_o : est le prix de l'outil,

P_h : est le prix de l'heure de l'appareil,

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

T_f : est le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage **M**.

M : Intervalle foré.

INTRODUCTION

L'industrie du forage pétrolier et gazier est constamment à la recherche de méthodes et d'outils innovants pour optimiser l'efficacité et réduire les coûts de forage. Parmi les décisions cruciales à prendre lors d'une opération de forage, le choix de l'outil approprié joue un rôle essentiel. Dans ce contexte, l'étude comparative entre les outils de forage tricône, PDC (Polycrystalline Diamond Compact) et imprégné revêt une importance particulière. Ces outils offrent des performances et des caractéristiques distinctes, influençant directement la vitesse d'avancement, la qualité du forage et les coûts associés.

À Hassi-Messaoud, où l'exploitation pétrolière a atteint un niveau significatif avec plus de 1200 puits forés, les sociétés pétrolières s'efforcent d'améliorer continuellement leurs méthodes de travail pour réduire les dépenses de forage. Dans cette thèse, nous nous pencherons sur une étude approfondie et comparative des outils de forage tricône, PDC et imprégné, en analysant leurs performances en termes de vitesse d'avancement et de rentabilité économique. L'objectif de cette recherche est de fournir des informations précieuses pour guider les décisions de sélection des outils de forage les plus adaptés au contexte spécifique du drain horizontal de la phase 6" dans le champ de Hassi-Messaoud.

Chapitre I : Généralités Sur le Champ de Hassi- Messaoud

1 Historique du champ de Hassi-Messaoud :

Le champ de Hassi-Messaoud est situé dans le bassin d'Oued Mya au Nord du Sahara à 950 Km au Sud-est d' Alger et 350 Km² de la frontière tunisienne. Il s'étend sur une superficie de 1600 Km².

En janvier 1956 la SN-REPAL a amorcé le premier sondage MD1 ; le 15 janvier de la même année, le sondage a découvert à 3338 m des grés du Cambrien productifs d'huile et la confirmation de l'existence de gisement a été portée par le sondage du OM1 à 7 Km au Nord-ouest.

Ce gisement se caractérise par la formation Cambro-ordovicien est :

- Sa profondeur entre 3000 m et 3500 m,
- Son épaisseur environ de 200 m,
- La légèreté de son huile (API = 45.04),
- Sa pression initiale est de 482 Kf/cm², pour un point de bulle entre 140 et 200 Kf/cm².

Le réservoir d'huile est constitué de 4 couches qui sont par ordre croissant de leur profondeur : le Ri, Ra, R2 et R3.

Le Ra constitue en qualité et en épaisseur la partie la plus importante de gisement.

2 Situation Géographique du puits ONMZ 313 :

Les coordonnées "Lambert sud Algérie" (LSA) de la plate forme sont les :

<i>Coordonnées LSA</i>	X (M)	Y (M)	Altitude
<i>Plate forme</i>	833 549.54	131 616.16	Zs =153.7 m, Zt =164 m

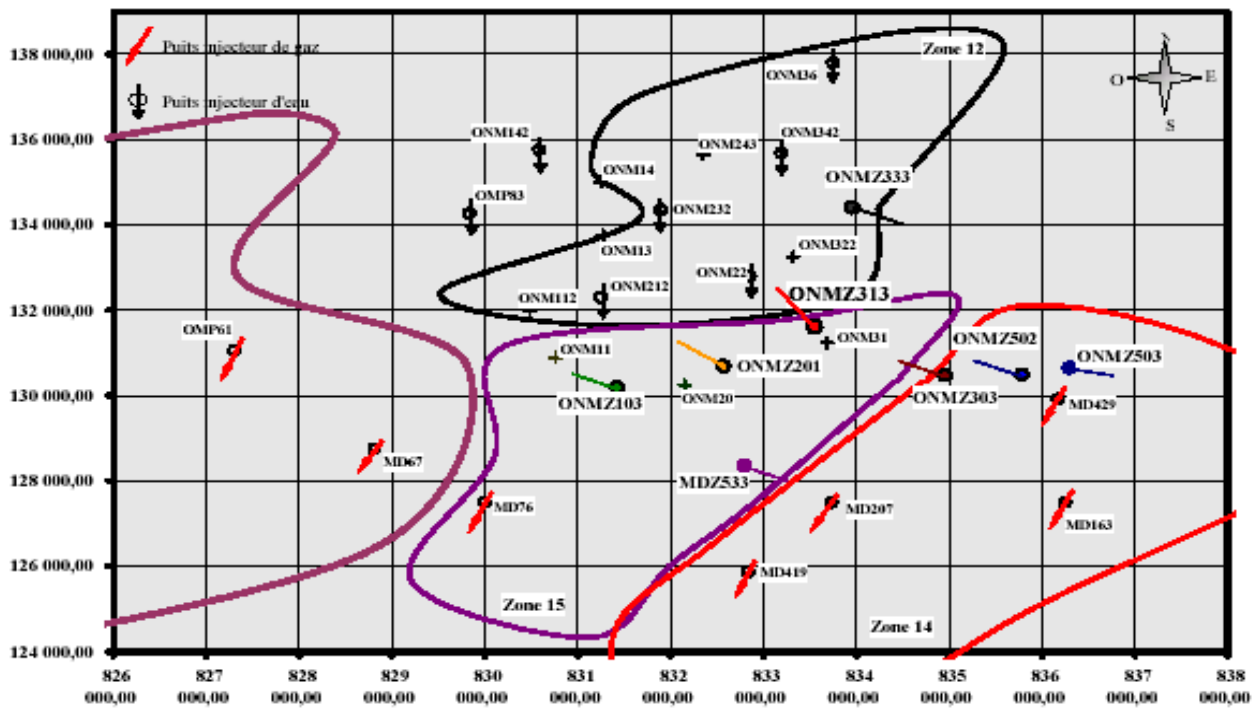


Figure I.1 : Situation Géographique du puits ONMZ 313

3 Description lithologique de la phase 6' du puits ONMZ 313 :

Cambrien :

3501 m à 4373 m en MD (3445 m à 3482.25 m TVD) Ep = 37 m.

Essentiellement constitué de grès hétérogènes, fins à très grossiers, entrecoupés de passées de siltstones argilo-micacés, ces matériaux dites Grés de MESSAOUD. On y distingue trois litho-zones; R1 (Ri+Ra), R2 et R3.

Grès : blanc, transparent à translucide, et gris blanc, siliceux à silico- quartzitique, fins à moyens, parfois grossiers, sub-arrondi à anguleux, durs moyennement consolidés à consolidés, bitumineux.

Silt : gris blanc, gris sombre, beige et gris noir tendre à moyennement dur localement bitumineux. [1]

4 Programme d'outils et paramètres de forage du puits ONMZ313 :

Phases	26"	16"	12 ^{1/4}		8 ^{3/8}	6"
			Verticale	Build -up		
Types d'outils	EMS11CGK	DSX92HF	SPH639	HCM408	SE3841i	HH372G8
Profondeur (m)	494	2305	3185	3349	3561	4368
WOB (t)	1 - 25	5 - 20	8 - 18	1 - 12	3 - 12	1 - 8
RPM (tr/min)	60 - 130	80 - 150	100 - 200	140 - 200	140 - 190	150 - 200
Débit (l/min)	2000 - 4000	2800 - 3000	2800	2000 -2400	1800-2000	750 - 900
Dusage	3*18 + 3*11	9*12	6*15 + 3*20	8*15/32	4*16/32	3*13/32

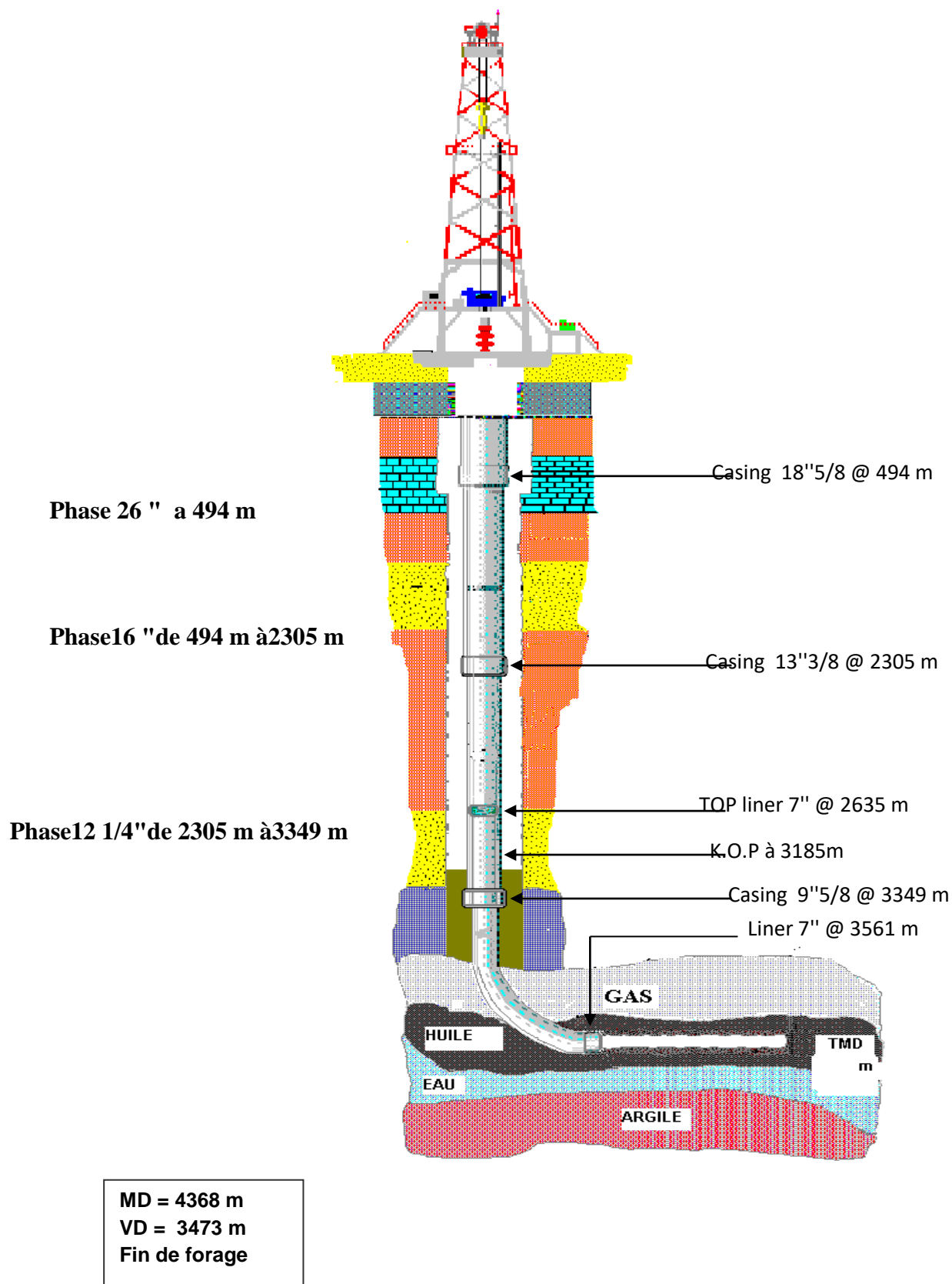


Figure I.2 : profile du puits ONMZ313 [1]

Chapitre II : Le Forage Horizontal

1 Introduction :

Le forage horizontal est un forage directionnel qui se caractérise par la traversée du réservoir avec une inclinaison pouvant atteindre un maximum de 100°, c'est-à-dire s'éloigner petit à petit de la verticale qui passe par la tête du puits suivant une trajectoire et un rayon de courbure donnés pour enfin arriver à forer le réservoir horizontalement.

Le forage horizontal est un exercice beaucoup plus coûteux. Et complexe que les forages conventionnels tels que les forages verticaux ou déviés. En général, les statistiques montrent qu'il est nécessaire de majorer le budget d'un puits vertical de 30 à 40% pour obtenir le budget d'un puits horizontal. Alors, dans quelles occasions doit-on considérer le forage d'un puits horizontal.

Les objectifs recherchés lors d'un forage horizontal sont en général une combinaison de plusieurs facteurs à savoir :

- ✓ Obtenir une longueur optimale de la liaison couche-trou.
- ✓ Augmenter l'efficacité et la productivité du puits.
- ✓ Limiter le nombre de puits à forer sur un champ.

Pour résoudre un problème particulier de production tel que :

- Anisotropie de perméabilité
- Isolation de la formation
- Effet de cône de l'aquifère ou de l'anneau de gaz lors de la production (Effet 'coning')
- Une géométrie particulière du réservoir ou de l'emplacement de surface
- Piètre production des puits conventionnels.
- Toutes combinaisons de problèmes décrits ci-dessus. [2]

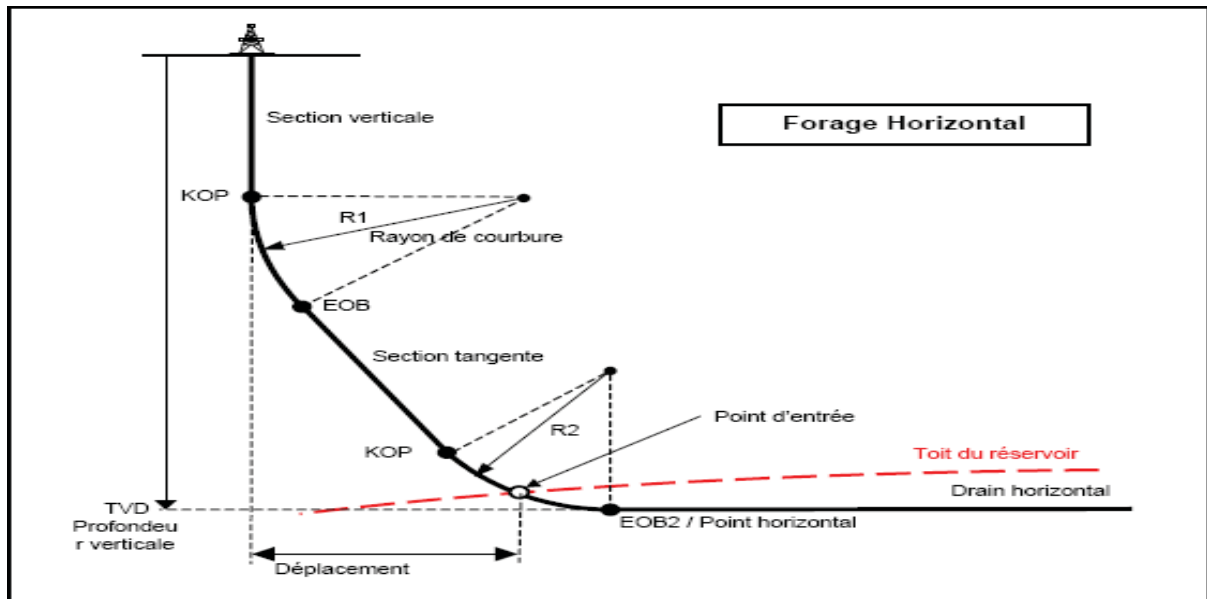


Figure II.1 : Profil d'un puits horizontal

2 Avantages et inconvénients du forage horizontal : [2]

2.1 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.

Dans les situations suivantes, il est recommandé d'effectuer un forage horizontal :

- Réservoirs fracturés.
- Réservoirs multi-couches.
- Conning de gaz et d'eau.
- Réservoirs à faible épaisseur.
- Réservoirs d'huile lourde.
- Réservoirs à basse perméabilité.

2.2 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.

- **Pour atteindre la cible**

Le forage horizontal n'est pas un problème en lui-même, la difficulté réside plus à atteindre une cible ayant quelquefois une tolérance verticale réduite.

- **Le nettoyage du puits**

Un bon nettoyage du puits est indispensable au succès d'un forage horizontal. Le fluide doit:

- assurer le transport des déblais entre le front de taille et la surface
- éviter l'accumulation de déblais dans les parties inclinées du puits

Une élimination efficace des solides est également nécessaire.

- **Le comportement des formations**

Le comportement des formations peut être très différent lorsqu'elles sont forées à haute inclinaison, en particulier leur stabilité.

- **L'endommagement des formations**

3 Les types des puits horizontaux :

Trois types de puits peuvent être distingués:

- **Les puits à long rayon :**

Ces puits ont un rayon de courbure $>200m$, (gradients $< 3 \text{ deg}/10m$) et permettent l'utilisation de toutes les procédures de forage conventionnelles, forage avec rotary, carottage, tubage, etc....et ceci avec des équipements standards et pour des puits sans restriction de diamètre ou de longueur de drain. La longueur de ces puits peut atteindre plus de 1000m.

- **Les puits à moyen rayon :**

Ces puits ont un rayon de courbure entre 50m et 200m ($3 < \text{deg}/10\text{m} < 7$), et nécessitent des équipements adaptés tels des moteurs de fond coudés et ajustables en surface.

Avec un tel rayon de courbure on peut aller jusqu'à 600m de drain horizontal si la trajectoire est bien réalisée (affinée).

- **Les puits à rayon court ou ultra court :**

Ces puits ont un rayon de courbure $< 50\text{m}$ et peuvent atteindre même 5m, et nécessitent des équipements spécifiques tels que des moteurs articulés et des garnitures articulées. En raison de difficultés de contrôle de la trajectoire la longueur de drain est limitée à environ 300m, et de tels puits sont difficiles à compléter, limitant l'utilisation de cette technique. [4]

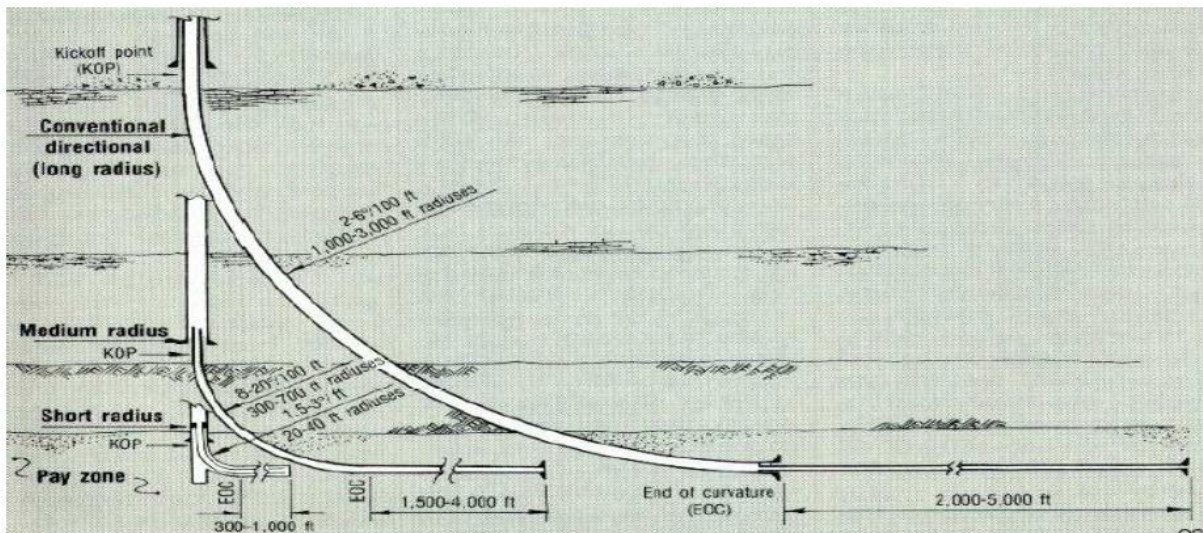


Figure II.2 : Comparaison des gradients de montée en inclinaison

3.2 Les puits à long déplacement :

Les puits à long déplacement ont une longue section forée à haute inclinaison jusqu'au toit du réservoir, suivie d'un drain horizontal. La longueur totale peut atteindre plusieurs kilomètres, le record étant à ce jour de 12 km avec BP sur le champ de Witch Farm.

3.3 Les puits en ré-entrée :

Les puits en ré-entrée sont une autre séquelle du forage horizontal et consistent un repartir d'un puits déjà existant, vertical ou dévié, qui est alors abandonné et bouché afin de forer un puits latéral se terminant le plus souvent à l'horizontale

3.4 Les puits multilatéraux :

Les puits multilatéraux sont un développement du forage horizontal. Ils consistent à forer une ou plusieurs branches à partir d'un drain primaire qui peut être vertical, dévié ou lui-même horizontal. [4]

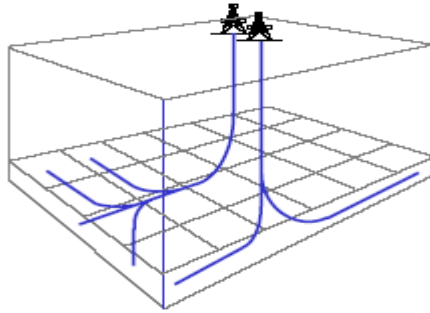


Figure II.3 : Les puits multilatéraux

4 La Lithologie du drain du réservoir :

4.1 Litho-zone R1 :

Le réservoir correspond à la mesure égale. Il a été principalement intersecté dans les environs du champ, Ce sont des pierres de sable moyen de mesure égale avec le ciment d'argile tendre, Il est basé sur le pâturage supérieur par la surface de l'abrasion, (e = 50 m).

4.2 Litho-zone Ra :

Représente le réservoir principal, dans sa partie supérieure et moyenne (e = 20 à 60 m) il est formé de grés quartzites, an isométriques, moyens à grossiers à ciment silico - argileux (kaolinite) localement constitué de quartzites franches, dans la partie inférieure s'intercalent, de manière irrégulière, L'épaisseur moyenne totale du Ra est de 100 à 120 m.

4.3 Litho-zone R2 :

Est constitué de grés quartzites et quartzites gréseuses, moyens à grossiers, an isométriques, avec parfois des niveaux micro-conglomératiques, à ciment argileux assez abondant (illite). On note des intercalations millimétriques de silt.(e = 100 m).

4.4 Litho-zone R3 :

Repose sur l'Infracambrien, et parfois directement sur le socle granitique, c'est une série de comblement d'une épaisseur moyenne de 300 m, elle se compose de grès grossiers à micro conglomérats feldspathiques, les grains sont mal classés, le ciment est de nature argileuse avec parfois des zones à grès ferrugineux, et des intercalations d'argiles silteuses. Le "R3 ne présente aucun intérêt pétrolier.

5 Les équipements spécifiques au forage dirigé :

5.1 Moteurs de fond :

Les éléments clés d'un moteur de fond sont :

- **Rotor** : pièce hélicoïdale (hélice externe en queue de cochon) fabriquée en acier inoxydable,
- **Stator** : élastomère moulé en forme d'hélice interne avec une spire supplémentaire par rapport au rotor.

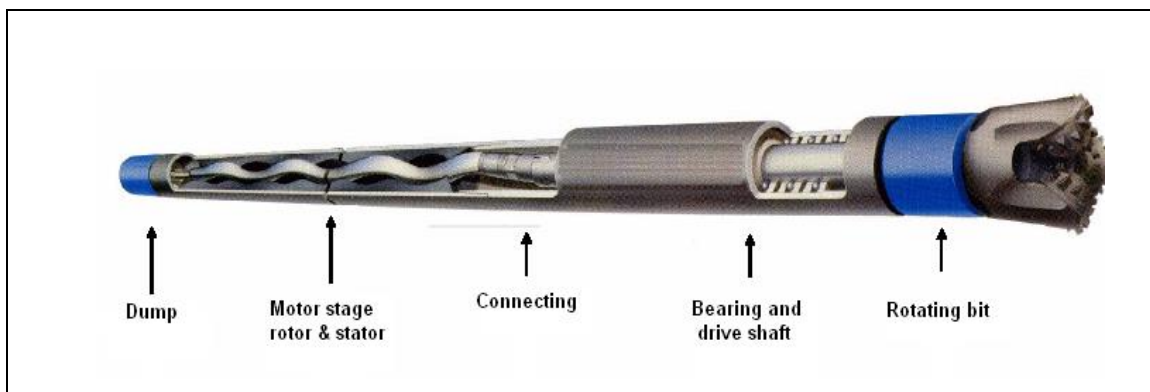


Figure II.4 : Moteur de fond

5.1.1 Description :

Les éléments constituant d'un PDM sont les suivants :

- ❖ Un étage moteur.
- ❖ Un arbre d'entraînement.
- ❖ Un joint universel (cardan).
- ❖ Une valve de détournement (by-pass).

5.2 Les stabilisateurs :

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

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

- a) lames soudées,
- b) lames intégrales,
- c) à chemise,
- d) à chemise non rotative.

5.3 Equipements amagnétiques :

Les équipements amagnétiques les plus courants sont :

- MWD,
- des tiges de forage,
- des masse-tiges,
- des stabilisateurs,
- steering tools.
- des raccords,

Ces matériaux amagnétiques peuvent être :

- de l'aluminium,
- des aciers inoxydables de haute qualité,
- des alliages tels que le "*Monel*" (70% nickel + 30% cuivre).

5.4 Raccords d'orientation :

Ils sont habituellement fabriqués en acier amagnétique en raison de leur proximité par rapport au compas ou aux magnétomètres.

Les raccords d'orientation sont conçus pour recevoir une chemise dans laquelle viendra se loger l'extrémité inférieure de l'outil de mesure.

5.5 Raccords coudés :

Les raccords coudés sont utilisés en combinaison avec un moteur de fond (de corps droit) pour le désaxer par rapport à l'axe du puits et donc désaxer l'outil de forage.

Ils sont installés immédiatement au-dessus du moteur. Ils sont fabriqués soit en acier standard, soit en acier amagnétique.

Les raccords coudés et les raccords d'orientation sont fréquemment combinés en seul raccord appelé "raccord coudé d'orientation". [2]



Figure II.5 : Différents types des moteurs & Géométrie des moteurs.

Chapitre III : Les Outils de Forage

1 Introduction :



L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse, mais la plus importante pour réaliser un puits de forage.

Les facteurs les plus importants qui conditionnent l'avancement sont les suivants : La nature de la roche, sa forabilité, sa tendance à dévier, son abrasivité,

- Le type d'outil utilisé pour détruire la roche,
- Le poids sur l'outil ainsi que la vitesse de rotation,
- Les caractéristiques du fluide utilisé pour nettoyer le front de taille et le débit de circulation,
- La stabilisation,
- Les techniques nouvelles : l'emploi des turbines, moteurs de fond, [5]

2 Les différents types des outils de forage :

Les outils de forage peuvent être classés en deux groupes :

-  Les outils à molettes.
-  Les outils à éléments de coupe fixes.

2.1 Les outils à molettes :

Les outils à molettes ont été introduits dans le forage rotary par H.R. HUGUES en 1909 : ils en constituent aujourd'hui l'outil de base.

Il existe plusieurs types d'outils à molettes à dents en acier notamment :

- les bicônes (2 cônes),
- les tricônes (3 cônes),

Le tricône est le plus utilisé. Le bicône utilisé auparavant pour la déviation est aujourd'hui Peu utilisé. [5]



Figure III.1 : Les outils à molette (tricône)

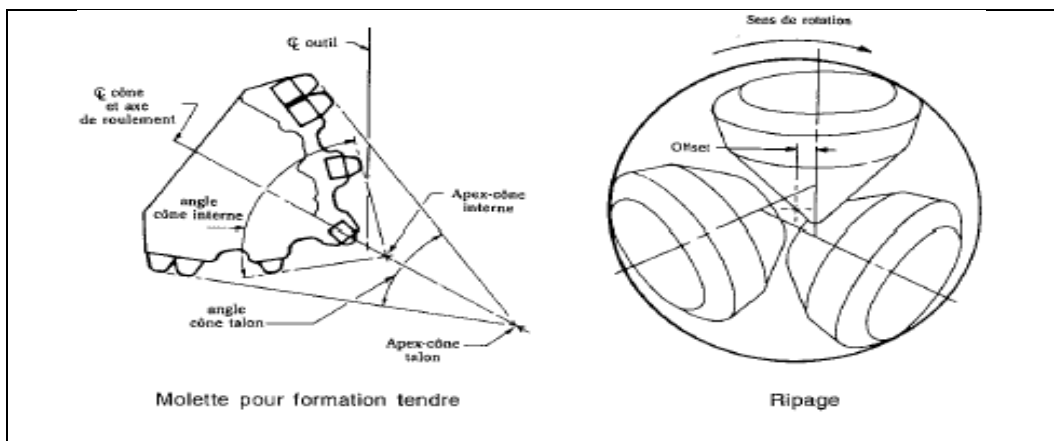


Figure III.2 : Principe de construction des molettes des (tricônes)

2.2 Les outils à éléments de coupe fixes :

Les outils diamantés sont de trois types :

- à diamants naturels,
- à taillants PDC ou diamants polycristallins,
- à taillants TSP ou diamants polycristallins thermostables.

Ces trois types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécaniquement différente : le diamant naturel abrase la roche et travaille comme une meule, les diamants polycristallins cisailent la roche en découpant des copeaux

comme un outil de tournage des métaux. La forme de tous ces outils de forage est monobloc ce qui leur confère une certaine solidité et une durée de vie plus longue. [5]



Figure III.3 : Les outils à diamant (PDC)

3 Principe de fonctionnement des outils :

3.1 Outils tricône :

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.

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. [6]

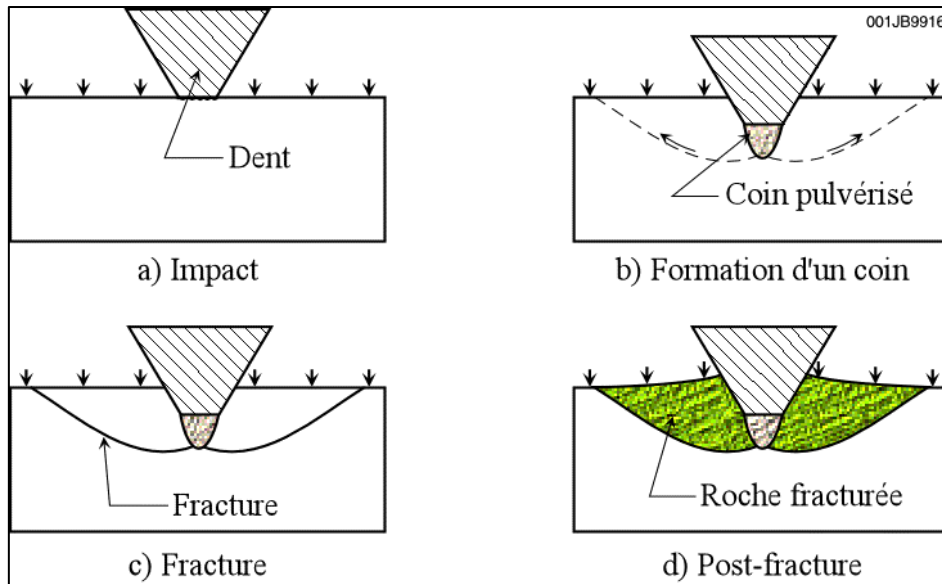


Figure III.4 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche

3.2 Outils PDC :

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.

Le balayage du fond du trou est obtenu par le mouvement de rotation de l'outil autour de l'axe de forage. [5]

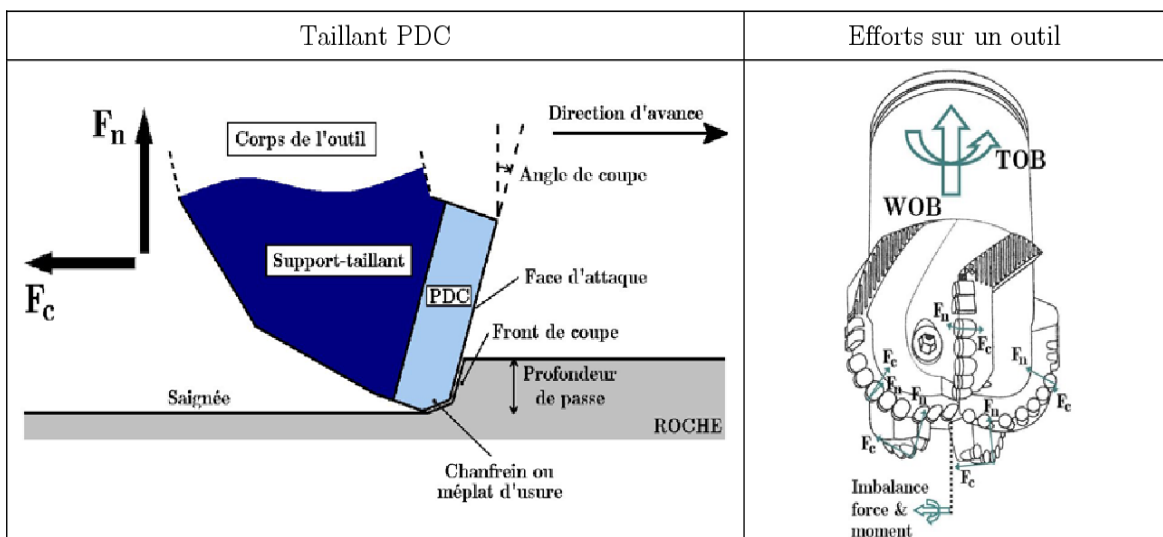


Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'un outil PDC

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.

3.2.1 Les efforts appliqués sur le cutter :

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

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

Les efforts latéraux de chaque pastille sont équilibrés entre eux de sorte que l'effort latéral est nul. [7]

4 Désignation d'un outil PDC :

• On désigne un outil par :

- 1) Le profil,
- 2) Le corps de l'outil,
- 3) Densité des cutters,
- 4) Angles caractéristiques de parties,
- 5) Longueur utile (L_{edge}).

4.1 Le profil :

Il existe principalement trois types de profils :

- 1- profil plat ou avec un faible cône intérieur,
- 2- profil double cône (cône intérieur très prononcé),
- 3- profil parabolique.

4.2 Le corps de l'outil :

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

- a. Corps en acier (steel body),
- b. Corps en carbure de tungstène (Matrix body).

a) Corps en acier (Steel body) :

Les outils avec corps en acier sont usinés dans des barres d'acier, alors que les outils avec corps en matrice sont coulés à partir de poudre de carbure de tungstène dans des moules correctement usinés.

Pour produire le profil de l'outil, la barre d'acier est usinée à l'aide d'un tour contrôlé par ordinateur, ainsi le filetage mâle API et le diamètre intérieur du passage principal du fluide sont usinés.

Les canaux d'irrigation, les lames, les logements des dents, les trous des duses et filetages sont usinés par la machine à commande numérique.

Après que l'usinage du corps ait été effectué, les picots de diamètre sont sertis sous presse dans leur logement ainsi que les dents du PDC.

b) 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. [7]

4.3 Densité 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.

Des mesures qualitatives des performances de l'outil à différentes densités de distribution peuvent être effectuées.

$$\text{Contrainte par cutter} = \frac{WOB_{total} / \text{nombre de cutter}}{\text{La surface de coupe}}$$

4.4 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_a (clearance angle).
- 3- L'angle latéral W_s (Side rake angle).

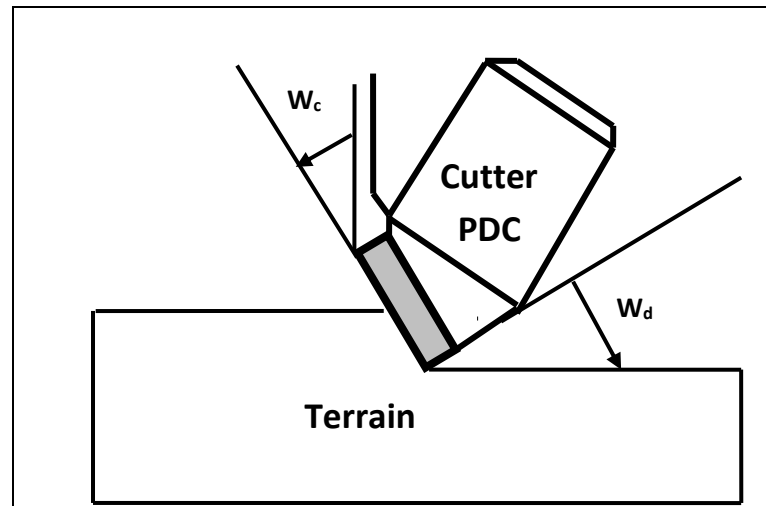


Figure III.5 : Angles caractéristiques d'un PDC

4.5 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" (exposition).

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} .

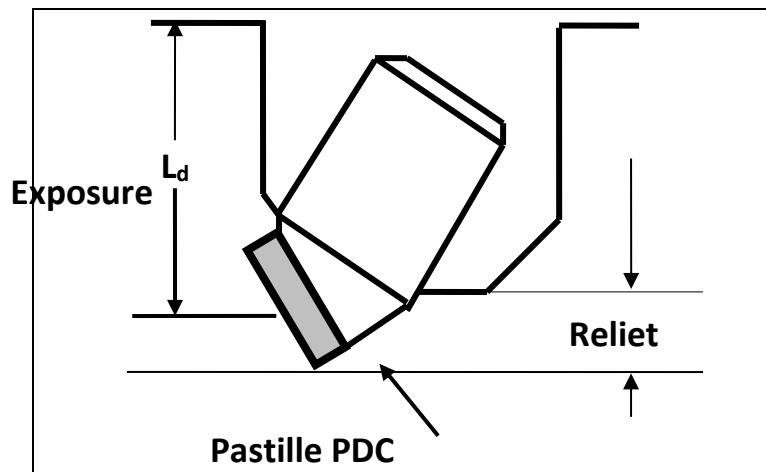


Figure III.6 : Longueur utile L_d

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. [7]

3.3 Outil imprégné :

Ce type d'outil comporte des lames en carbure de tungstène imprégnées de petits grains de diamants permettant de creuser à travers des roches très dures. Le carbure de tungstène s'use sur la surface de coupe et les grains de diamants usés tombent, faisant place à des grains non usés. Cette technologie permet d'améliorer la durée de vie et le métrage foré de l'outil. Les outils imprégnés nécessitent une grande vitesse de rotation et peu de poids sur l'outil (WOB) pour avoir un avancement acceptable.

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.

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

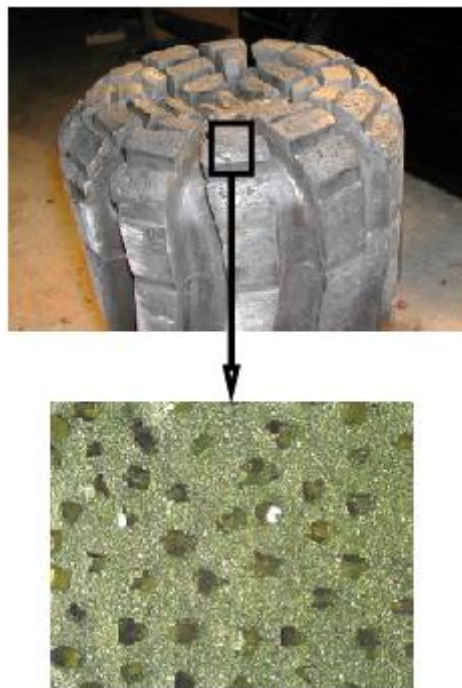


Figure III.7 : Outil imprégné

4 Comparaison entre les caractéristiques des outils de forage :

L'étude comparative entre les outils de forage tricône, pdc et Imprégné est importante car elle permet de déterminer lequel est le plus efficace pour différents types de formations géologiques.

<i>Caractéristique des outils tricônes</i>	<i>Caractéristique des fixes cutters</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Il est utilisé pour des profils short radius. - Les tricônes sont limités par leur durée de vie. - Les tricônes offrent performance et un bon contrôle directionnel. - La facilité de contrôle de tool face. - Choix des tricônes avec des dents courtes pour limiter le torque, car les tricônes ne fonctionnent pas avec des high torque - Ne résistent pas à de formation très abrasives comme le sable ou les grès. - En cas d'abrasivité, les tricônes doivent avoir le pourtour des molettes protégées (inserts éventuellement recouvert de diamant) et les bras renforcés de pads d'usure spéciaux. - Ils sont préférés si on veut un bon contrôle de trajectoire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il convient au forage de longue section. - La durée de vie des PDC est plus grande que les tricônes, sont mieux adaptés aux paramètres de forage utilisés. - Choix des shorts gauge pour améliorer le contrôle de tool face. - L'utilisation des outils PDC de court shank afin d'améliorer le contrôle de trous. - Limitation de largeur des cutters pour contrebalancer le high torque. - Ils sont adaptés pour des formations très dures (PDC) et très abrasives (Imprégné), - Les outils à tête fixe peuvent avoir des jupes calibrées plus longues, une densité de diamant ou TSP accrue, davantage de cutters PDC à la périphérie. - Ils sont préférés si on veut avoir un meilleur avancement dans le drain horizontal.

Chapitre IV : Etude Comparative entre les outils de Forage

1 Introduction :

Cette partie vise à étudier les performances des différents outils de forage utilisés Dans la phase 6" du champ de fuite horizontal du HMD, il est donc étudié en détail, Les outils de forage doivent être choisis judicieusement.

Pour cela il faut :

- Réduire le temps de forage.
- Vitesse d'avancement optimale (ROP optimale).
- Améliorer le nettoyage du fond du puits.
- Minimiser le prix de revient du mètre de forage.

2 Les outils utilisés :

Type d'outil		Fabricant	Puits	Prix (\$)
Tricône	EHP61DHL	Hycalog	Horizontal	13448
	EHP81DHL	Hycalog	Horizontal	13448
	EP4872	Hughes	Horizontal	22635
	EP4732	Hughes	Horizontal	19175
	EP4051	Hughes	Horizontal	21567
	XR40YODPD	Smith	Horizontal	11494
PDC	M09PX	Smith	Horizontal	23000
	FM2941	DBS	Horizontal	22106
	SE3831i	DBS	Horizontal	35399
	DS143D	Hycalog	Horizontal	23090
Imprégné	Ti2352	DBS	Horizontal	29200
	TiP2352	DBS	Horizontal	32162
	Ti3184P	DBS	Horizontal	32162
	Ti2352T	DBS	Horizontal	23800
	Ti3244	DBS	Horizontal	36000
	S280G8	Hughes	Horizontal	27083
	472GFDTX	Hycalog	Horizontal	23090

Dans le cadre des développements d'outils les différents essais ont été réalisés par les fabricants d'outils suivants :

3 Le prix de mètre foré :

Le prix de mètre foré : 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. [9]

Les formules qui permettent de calculer le prix de revient du mètre foré sont :

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

P_m : est le prix de mètre foré,

P_0 : est le prix de l'outil,

P_h : est le prix de l'heure de l'appareil,

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

T_f : est le temps de rotation de l'outil pour effectuer le métrage M .

M : Intervalle foré.

3.1 Méthode de calcul de la vitesse d'avancement (ROP) et Prix mètre foré:

On calcule la vitesse d'avancement (ROP) avec formule suivante:

$$\text{ROP (M/h)} = \frac{\text{Intervalle foré (M)}}{\text{Temps de foré (Tf)}}$$

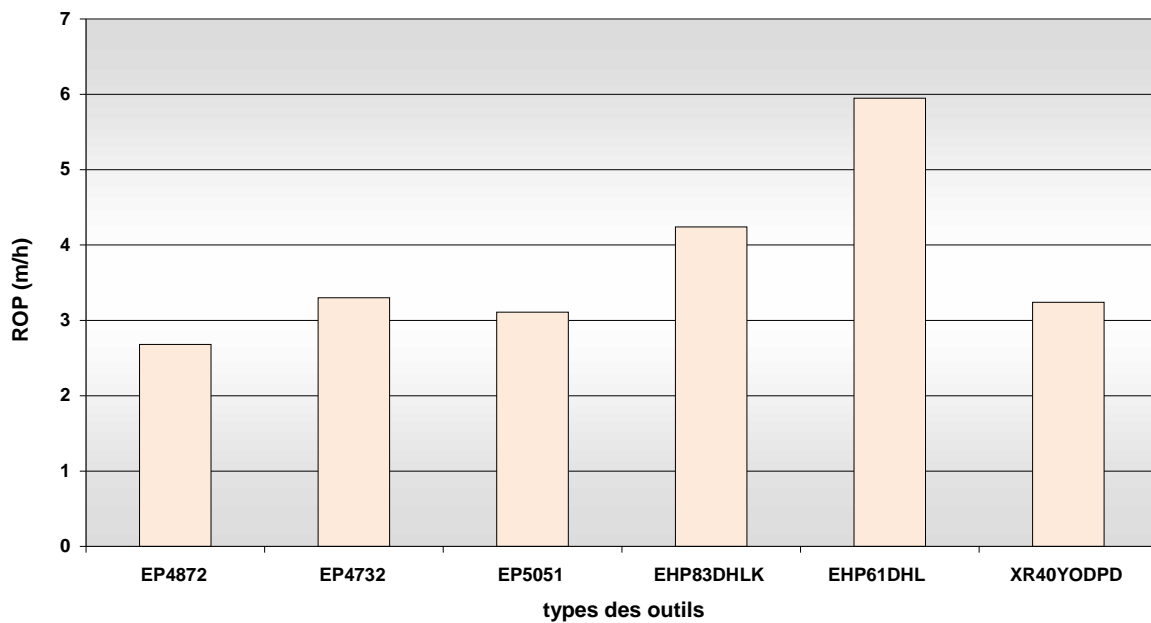
4 Etude comparative entre les outils de forage :

4.1 Etude comparative entre des outils de même type :

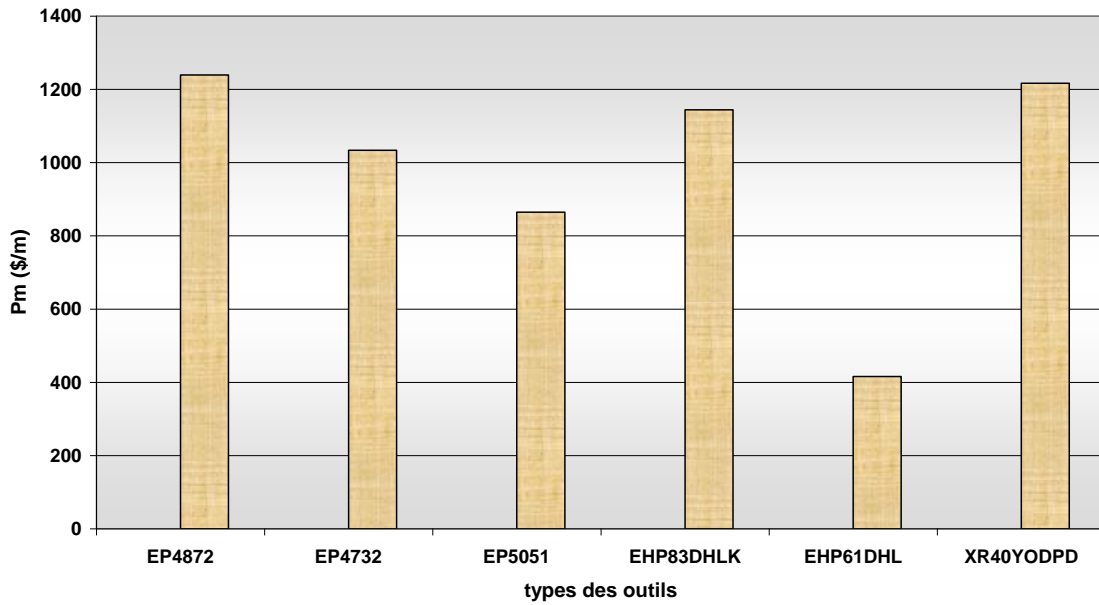
4.1.1 Les outils tricônes :

Outil	Fabricant	Rop (m/h)	P _m (\$/m)
EP4872	HUGHES	2.68	1238.89
EP4732		3.3	1033.46
EP5051		3.11	864.65
EHP83DHLK	HYCALOG	4.24	1144.26
EHP61DHL		5.95	415.66
XR50YODPD	SMITH	3.24	1216.63

comparaison des ROP entre les types des outils tricônes



comparaison des couts /metre pour les types des outils tricones



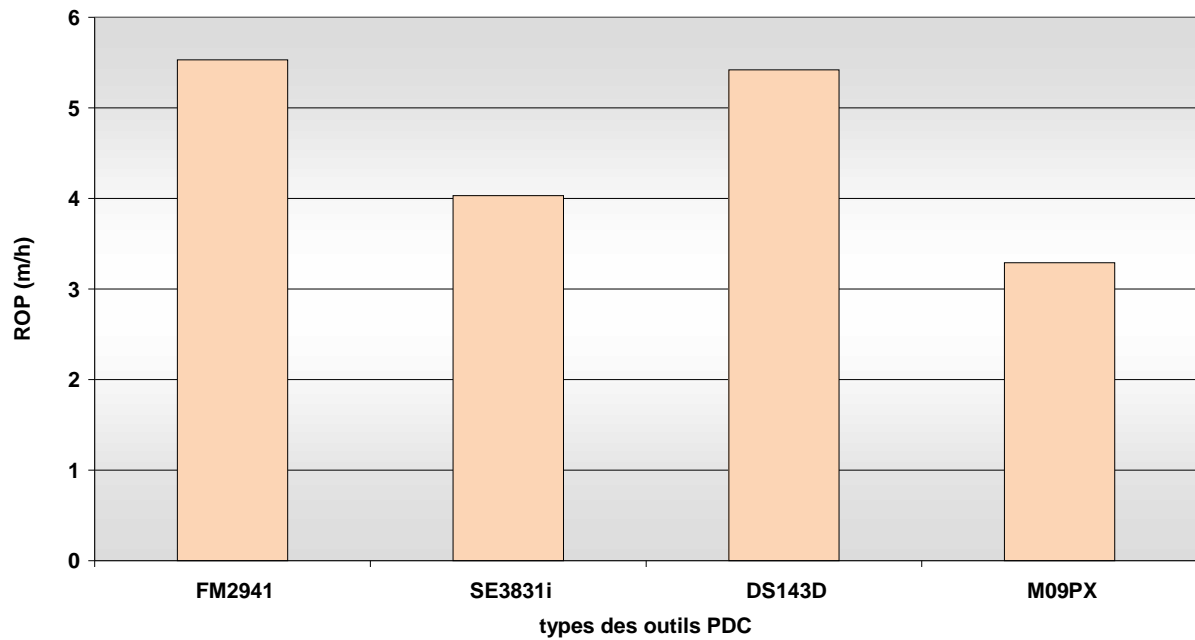
D'après les deux graphes précédents, on constate que l'outil **EHP61DHL** de la compagnie **HYCALOG** est plus performant de point de vue avancement (**ROP = 5.95 m/h**), par rapport aux autres d'outils tricônes.

Ce qui engendre une réduction du prix du mètre foré (**P_m = 415.66 \$/m**).

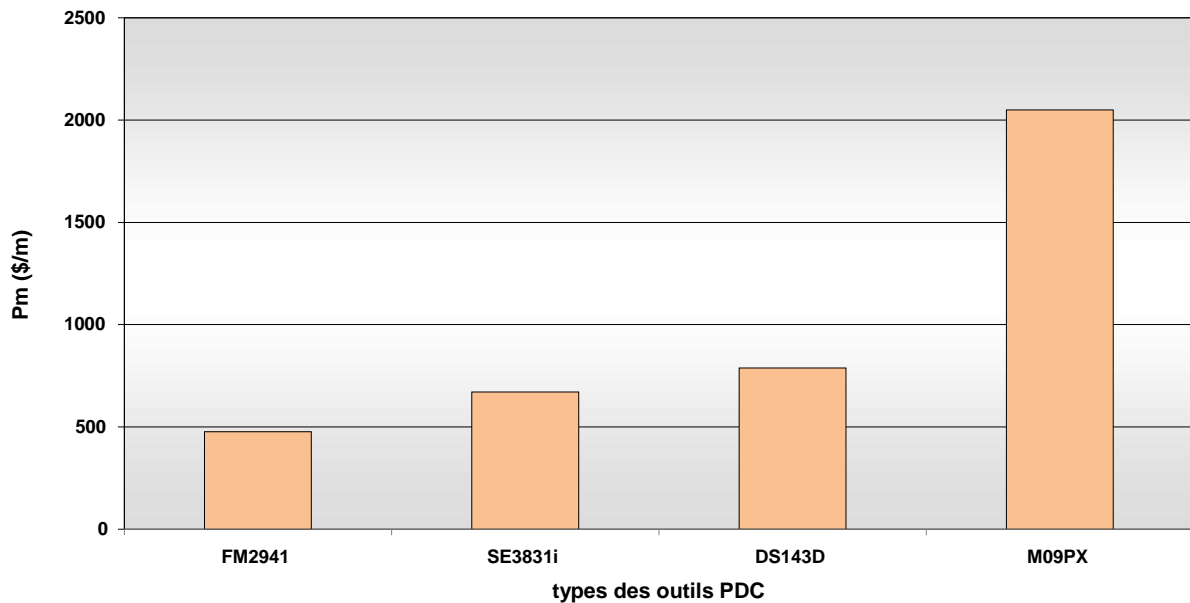
4.1.2 Les outils PDC :

Outil	Fabricant	Rop (m/h)	P _m (\$/m)
FM2941	DBS	5.53	476.70
SE3831i		4.03	671.22
DS143D	HYCALOG	5.42	788.50
M09PX	SMITH	3.29	2049.61

comparaison des ROP entre les types des outils PDC



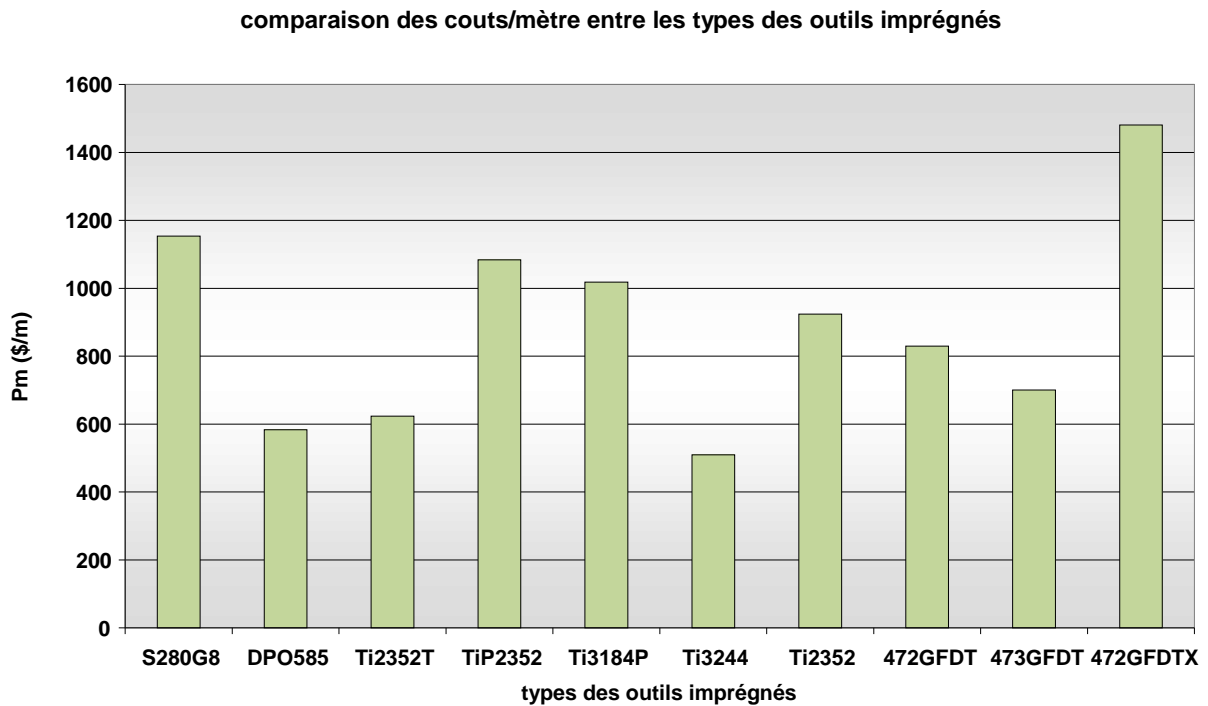
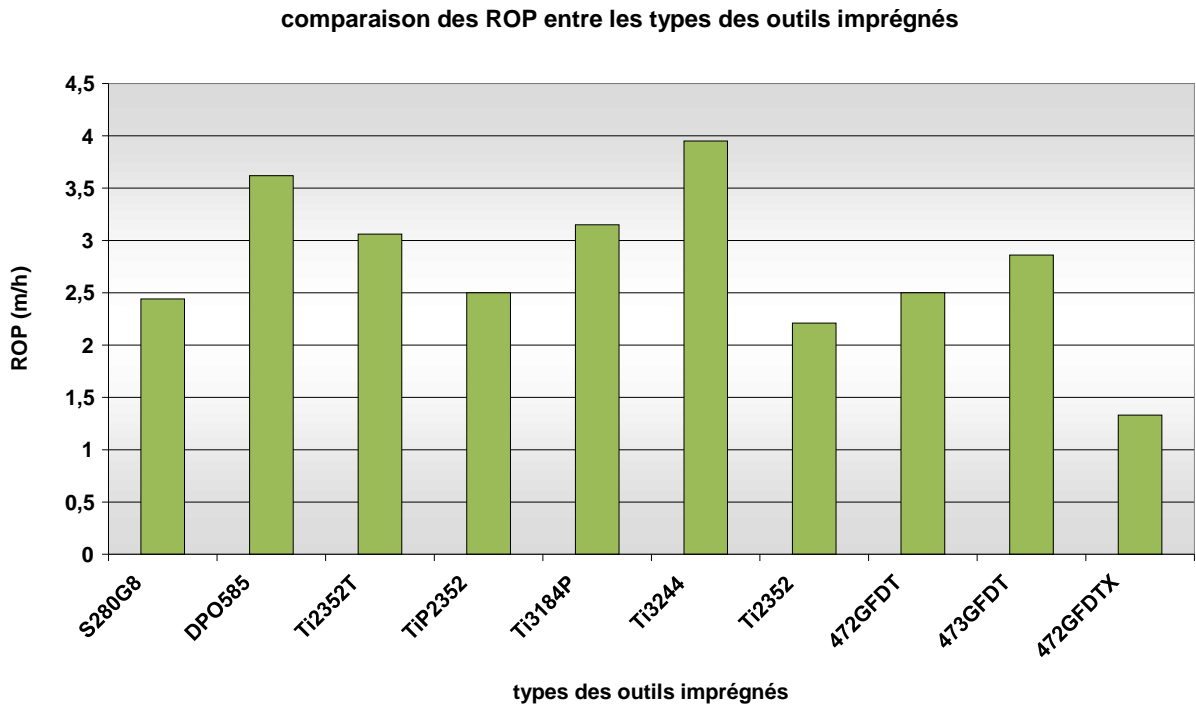
comparaison des couts/mètre entre les types des outils PDC



D'après les deux graphes précédents, on constate que **l'outil FM2941** de la compagnie **DBS** est plus performant de point de vue avancement (**ROP = 5.53 m/h**), par rapport aux autres d'outils PDC, ce qui engendre un prix de mètre foré (**P_m = 476.70 \$/m**)

4.1.3 Les outils imprégnés :

Outil	Fabricant	Rop S a (m/h)	P _m (\$/m)
S280G8	HUGHES	2.44	1153.45
DPO585		3.62	583.45
Ti2352T	DBS	3.06	623.06
TiP2352		2.50	1083.95
Ti3184P		3.15	1017.71
Ti3244		3.95	509.04
Ti2352		2.21	923.65
472GFDT	HYCALOG	2.50	829.46
473GFDT		2.86	700.21
472GFDTX		1.33	1481.03



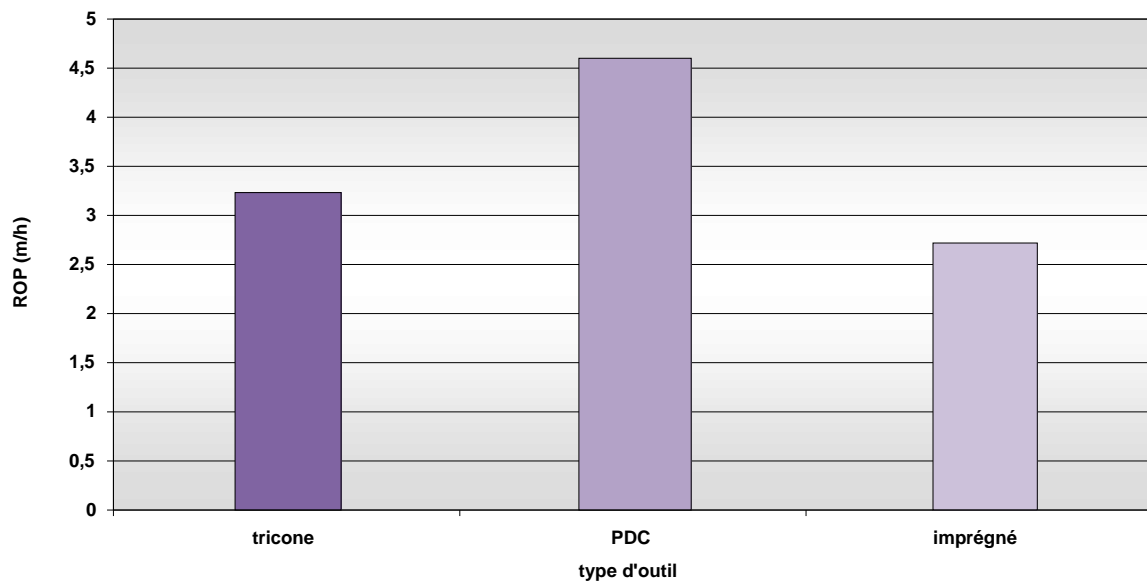
D'après les deux graphes précédents, on constate que l'outil **Ti3244** de la compagnie **DBS** est plus performant de point de vue avancement (**ROP = 3.95 m/h**), par rapport aux autres d'outils Imprégnés.

Ce qui engendre une réduction du prix du métrage foré (**P_m = 509.04 \$/m**)

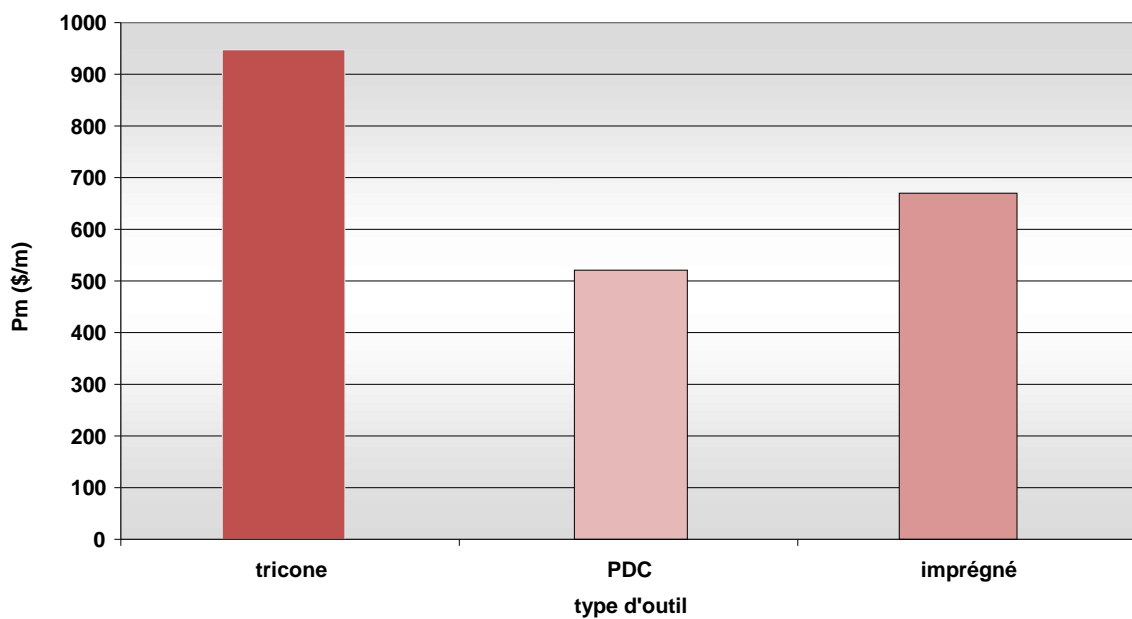
4.2 Comparaison entre les outils tricônes, PDC et imprégnés :

Type d'outil	ROP _{moy} (m/h)	Pm _{moy} (\$/m)
Tricônes	3.31	948.76
PDC	4.60	521.05
Imprégnés	2.72	661.79

comparaison des ROP entre les outils



comparaison des couts/mètre des outils



D'après les deux graphes précédents on voit que **les outils PDC** dans le drain horizontal sont plus performants de point de vue avancement (**ROP = 4.60 m/h**), par rapport aux autres types d'outils.

Ce qui engendre une réduction du prix du mètre foré (**$P_m = 521.05$ \$/m**).

Conclusion

En conclusion, l'étude comparative entre les outils de forage tricône, PDC et imprégné nous a permis de tirer plusieurs conclusions significatives. Tout d'abord, nous avons constaté qu'il existe une diversité d'outils disponibles, chacun ayant ses propres caractéristiques et performances spécifiques. Cependant, compte tenu de la dureté du réservoir dans le champ de Hassi-Messaoud, les tricônes se sont révélés moins performants.

En examinant les vitesses d'avancement (ROP), nous avons observé une variation allant de 2 à 5 mètres par heure pour les différents outils. Cette différence met en évidence l'importance du choix de l'outil approprié pour optimiser la productivité du forage.

Les résultats pratiques ont clairement démontré que les outils PDC offrent la meilleure rentabilité. Leur capacité à résister à l'usure et à maintenir une stabilité directionnelle élevée en fait un choix avantageux dans les opérations de forage, offrant des performances régulières et rentables.

Cette étude comparative a fourni des informations essentielles aux opérateurs de forage, les aidants à prendre des décisions fondées pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts des opérations de forage. En utilisant les connaissances acquises à partir de cette étude comparative, il est possible d'optimiser les performances et d'atteindre des résultats supérieurs dans le forage pétrolier et gazier, notamment dans le drain horizontal du champ de Hassi-Messaoud.

Références Bibliographique

- [1] Fiche de puits ONMZ313, SONATRACH –Division forage.
- [2] J.P SZEZUKA, Forage dirigé –Ingénierie et méthodes, Edition 3.3 Juin 2005.
- [3] Document <<SONATRACH>>-Procédures de forage horizontal-SH/DF Janvier 2003.
- [4] Forage Dirigé & UBD, IAP, SONATRACH.
- [5] F.GRONDIN, Les outils de forage SONATRACH Division de Forage DF, Edition Janvier 2004.
- [6] J.P GUYEN, Techniques d'exploitation pétrolière -Le Forage -, Editions TECHNIP 1993.
- [7] A. SLIMANI, Module M2, formation des superviseurs, division forage, SONATRACH.
- [8] Manual ANADRILL« Programmation Et réalisation d'un puits horizontal », (choix des outils de forage), Horizontal Drilling Training 1991.
- [9] Document « **ENSPM** » Forage • Production • Gisement - Edition 1999.
- [10] NACEF Ali, ‘‘Modélisation de la Vitesse D’avancement de L’outil de Forage ’’
Memoire De Magister, Universite M’hamed Bougara- Boumerdes, 2014/2015.