

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES HYDROCARBURES, ENERGIES RENOUVELABLES
ET SCIENCE DE LA TERRE ET L'UNIVERS



DEPARTEMENT DE FORAGE ET MECANIQUE DES CHANTIERS
PETROLIERS

MEMOIRE

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master professionnelle

Option: **Forage pétrolier**

Thème :

ETUDE DE CHOIX ET PERFORMANCE DES OUTILS DE FORAGE PETROLIER (cas du champ de Bourarhat)

Réalisé par :

KERRACHE Lamine
KADOUCHE Hicham
BOURENANE Brahim

Soutenu publiquement le **20/06/2018** devant le jury composé de :

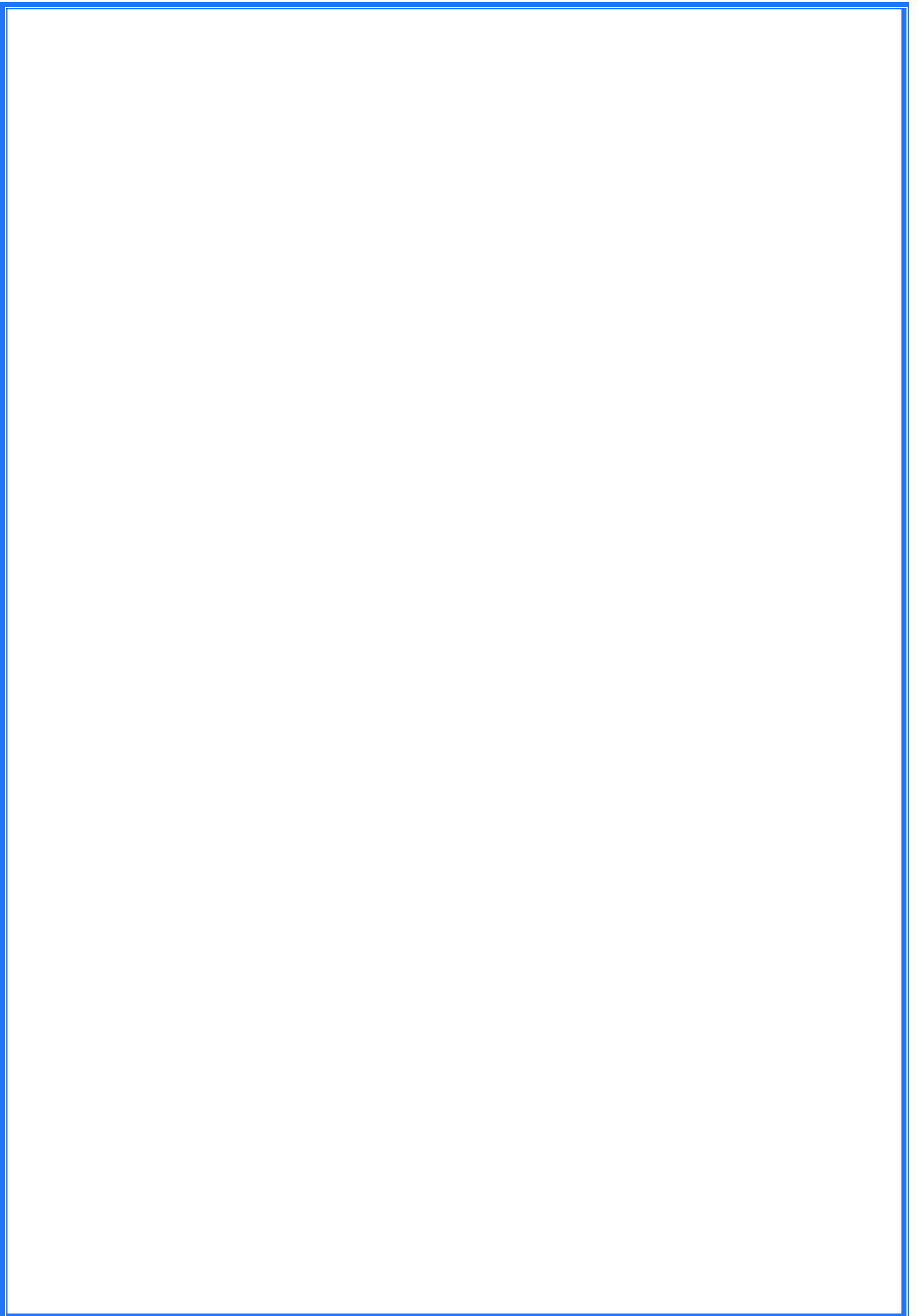
President:	Mr. BOUCHMAA Kamel	Univ. OUARGLA
Examineur:	Mr. ABBAS HADJ Abbas	Univ. OUARGLA
Encadreur:	Mr. FROUHAT Rachid	Univ. OUARGLA

Année universitaire : 2017/2018











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. Frouhat Rachid***

*Pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux
conseils,*

*pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui,
notre travail s'est déroulé.*

Nous remercions aussi :

*Tous les travailleurs de chantier E.N.T.P (TP 212) pour leurs
aides durant la période de stage, en particulier les chefs du post,*


et les superviseurs de SONATRACH

*Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidé de près ou de
loin à la*

finalisation de ce travail, nous tenons à leur


exprimer notre vive gratitude.

*Enfin nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre
formation à l'université de OVARGLA.*



DEDICACES



A decorative scroll with a black border and a white interior, set against a red background. The scroll is adorned with various flowers: purple tulips, yellow daisies, and small blue flowers. A large red rose is positioned on the right side of the scroll. The text is written in a cursive font, with certain words highlighted in red.

*J'ai toujours **pensé** faire ou **offrir** quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la **vie**, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon **inspiration** et de mon **courage**, à qui je dois de l'**amour** et la **reconnaissance**.*

☉ *A mes chers parents .*

☉ *A mes frères, et mes sœurs, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

☉ *A toute ma famille **Bournane**.*

☉ *A tout mes amis **de Ouargla**.*


☉ *A tout le groupe el khafdji .*

☉ *Et surtout a mes binôme **Hicham et Lamine**.*

☉ *A tous les personnes qui ma aidés de loin ou de proche.*

B. Brahim

A small green plant with white flowers, located in the bottom right corner of the page.

A decorative scroll with a black outline and a white interior, set against a red background. The scroll is adorned with various flowers: purple tulips, yellow daisies, and small blue flowers. A large red rose is positioned on the right side of the scroll. The text is written in a mix of black and red fonts, with some words in red for emphasis.

*J'ai toujours **pensé** faire où **offrir** quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti, des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la **vie**, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon **inspiration** et de mon **courage**, à qui je dois de l'**amour** et la **reconnaissance**.*

☉ *A mes **parents**.*

☉ *A mes frères **Mouhamed, Fouad** et ma sœur **Lila**, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

☉ *A toute ma famille **Kadouche**.*


☉ *A tout mes **amis**.*

☉ *A **Mustapha** et **Hassine**.*

☉ *Et surtout a mes binôme **Lamine** et **Brahim**.*

K.HICHAM

A small green plant with white flowers, located in the bottom right corner of the page.



*J'ai toujours **pensé** faire où **offrir** quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la **vie**, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon **inspiration** et de mon **courage**, à qui je dois de l'**amour** et la **reconnaissance**.*

☉ *A mes chers parents et **NANA**.*

☉ *A mes frères, et ma sœur, **Dania et Nihad**, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

☉ *A toute ma famille **Kerrache**.*

☉ *A tout mes amis **de Bejaia**.*

☉ *A ma proche Amie **Cilia**.*

☉ *A tout le groupe **KABYLE** ainsi que A tous les amis de ouargla.*

☉ *Et surtout a mes binôme **Hicham et Brahim**.*

☉ *A tous les personnes qui ma aidés de loin ou de proche.*

K. LAMINE



SOMMAIRE

Remerciements.

Dédicace.

Sommaire.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations.

Introduction générale.

Chapitre I : Généralité sur le champ de BOURARHAT

I. Introduction.....	2
II. Situation géographique et localisation des puits étudiés.....	2
III. Aperçu litho-stratigraphique.....	4

Chapitre II : Généralité sur les outils de forage

I. Introduction.....	9
II. Les différents types des outils de forage.....	10
II.1. Les outils à molettes.....	10
II.1.1. Mode de destruction de la roche.....	12
II.1.2. Structure de coupe.....	14
II.1.3. Classification IADC des outils à molettes.....	17
II.2. Les outils à diamant.....	18
II.2.1. Les outils au diamant naturel.....	19
II.2.1.1. Caractéristiques principales du diamant naturel.....	19
II.2.1.2. Mode de destruction de la roche par diamant naturel.....	20
II.2.2. Les outils à diamant synthétique.....	21
II.2.2.1. Les outils PDC.....	21
II.2.2.1.1. Mode de travail d'un outil PDC.....	23
II.2.2.1.2. Principe de fonctionnement.....	23
II.2.2.1.3. Désignation d'un outil PDC.....	24
II.2.2.2. Les outils TSP.....	28
II.2.2.2.1. Mode de travail d'un outil TSP.....	29
II.2.3. Fabrication des outils.....	29
II.2.3.1. Les outils à diamants naturels.....	29
II.2.3.2. Les diamants brasés.....	30

II.2.3.3. Les diamants en imprégnation.....	30
II.2.4. Classification IADC des outils diamants.....	31

Chapitre III : Choix des outils de forage

I. Introduction.....	34
II. Choix de l'outil de forage.....	34
II.1. Importance du choix.....	34
II.2. Choix Economique des outils.....	34
II.2.1. Prix du mètre foré.....	35
II.2.2. Avancement commercial.....	35
II.2.2.1. Application.....	35
II.2.2.2. Critères de remontée de l'outil.....	36
II.3. Choix de l'outil par la méthode de Break Even.....	37
II.3.1. Principe.....	37
II.3.2. Résumé de la méthode.....	39

Chapitre IV : Etude de performance des outils

I. Introduction.....	41
II. Présentation de la phase étudiée.....	41
III. Résultats pratiques.....	42
III.1. Comparaison entre les outils PDC dans le Cambro-ordovician (Unité IV-3).....	45
III.2. Comparaison entre les outils IMP dans le Cambro-ordovician (Unité IV-3).....	46
III.3. Comparaison entre les outils IMP et PDC dans le Cambro-ordovician (IV-3).....	47
III.4. Comparaison entre les outils imprégnés dans IV-2, III3 et III-2 en mode rotary.....	48
III.5. Comparaison entre les outils imprégnés utilisés avec turbine dans les unités IV-2, III3 et III-2 du réservoir.....	49
III.6. Comparaison entre les outils de forage imprégnés utilisés avec turbine pour forer le Cambrian unité II du réservoir.....	50
III.7. Comparaison entre les deux modes de forage rotary vs turbine.....	51
IV. Les courbes d'avancement des outils.....	52
IV.1. La Courbe d'avancement de l'outil DSF811M.....	52
IV.2. La Courbe d'avancement de l'outil DD5560.....	53
IV.3. Comparaison de la rentabilité l'outil HH356G8 par rapport à l'outil DD5560.....	54

Conclusion générale.

Recommandations.

Bibliographie.

Résumé.

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de la figure	Page
Figure I.1	Situation géographique et localisation des puits étudiés.	2
Figure I.2	Coupe stratigraphique.	8
Figure II.1	Les outils à molettes (tricône).	10
Figure II.2	Tricône à dents en acier.	11
Figure II.3	Tricône à picots.	11
Figure II.4	Nomenclature des tricônes.	12
Figure II.5	Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche.	13
Figure II.6	Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche.	13
Figure II.7	Numérotation des cônes et répartition les outils à molettes.	14
Figure II.8	Rechargement et affûtage des dents.	15
Figure II.9	Différents types de picots.	16
Figure II.10	Outil au diamant naturel.	20
Figure II.11	Action d'un outil à diamant naturel.	21
Figure II.12	Nomenclature des éléments des outils PDC.	22
Figure II.13	Outils PDC.	22
Figure II.14	Action de l'outil PDC.	23
Figure II.15	Efforts appliqués sur le cutter.	24
Figure II.16	Outil PDC Steel body.	24
Figure II.17	Outil PDC Matrix body.	25
Figure II.18	Différents types de profils des outils PDC.	26
Figure II.19	Angles caractéristiques d'un PDC.	27
Figure II.20	Longueur utile L_d .	27
Figure II.21	Outil TSP.	28

FigureII.22	Fabrication des outils.	29
Figure II.23	Les diamants en imprégnation.	30
Figure II.24	Code des profils.	31
FigureIII.1	La courbe d'avancement commerciale.	36
FigureIII.2	Droite de rentabilité avec la méthode de Break Even.	39
Figure III.3	Graph Break Even avec une coupe lithologique.	40
Figure IV.1	Graph des ROP et Pm des outils PDC.	45
Figure IV.2	Graph des ROP et Pm des outils Imprégnés.	46
Figure IV.3	Graph des ROP et Pm des outils Imprégnés.	47
Figure IV.4	Graph des ROP et Pm des outils imprégnés en mode rotary.	48
Figure IV.5	Graph des ROP et Pm des outils imprégnés utilisés avec turbine.	49
Figure IV.6	Graph des ROP et Pm des outils imprégnés utilisés avec turbine.	50
Figure IV.7	Graph des ROP et Pm des outils en différent mode de forage.	51
Figure IV.8	Graph courbe d'avancement de l'outil DSF811M.	52
Figure IV.9	Graph courbe d'avancement de l'outil DD5560.	53
Figure IV.10	Courbe d'avancement de l'outil HH356G8.	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Les coordonnées de puits BRTS-2.	03
Tableau I.2	Les coordonnées de puits BRTS-3.	03
Tableau I.3	Les coordonnées de puits BRTS-4.	04
Tableau I.4	Les coordonnées de puits OEB-2.	04
Tableau I.5	Les coordonnées de puits OEB-2.	04
Tableau II.1	Caractéristiques principales du diamant naturel.	20
Tableau II.2	Code des profils.	31
Tableau II.3	Type de d'usage (Code de l'hydraulique).	32
Tableau II.4	Densité des éléments de coupe.	32
Tableau II.5	Taille des éléments de coupe.	32
Tableau IV.1	Prix / mètre foré et ROP des outils PDC.	42
Tableau IV.2	Prix / mètre foré et ROP des outils Imprégnés en mode rotary.	43
Tableau IV.3	Prix / mètre foré et ROP des outils Imprégnés en utilisant la turbine.	44
Tableau IV.4	ROP et Pm des outils PDC.	45
Tableau IV.5	ROP et Pm des outils IMP.	46
Tableau IV.6	Données pour l'outil DSF811M.	51
Tableau IV.7	Données pour l'outil DD5560.	52
Tableau IV.8	Données pour l'outil HH356G8.	54

LISTE DES ABREVIATIONS

HMD : Hassi- Messaoud.

RPM : Révolution Par 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).

PDC: Polycristalline diamand compact.

TSP: Thermally Stable Polycrystalline.

IADC : International Association of Drilling Contractors.

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

Offset : Décalage l'axe de rotation de l'outil.

LPM : Litre par minute.

TAG : Trias argilo-gréseux.

INTRODUCTION



INTRODUCTION GENERALE

Le forage est une opération délicate et très coûteuse. L'objectif prioritaire des foreurs est la réalisation d'un puits, conformément au programme qui leur a été fourni, dans les meilleures conditions techniques et économiques avec un prix de revient le plus bas possible.

La destruction de la roche et la vitesse d'avancement dépendent essentiellement du type d'outil et des paramètres de forage qui lui sont appliqués.

La rentabilité d'un outil dépend de tous les facteurs qui contribuent à l'augmentation de la ROP. Elle s'exprime par un aspect économique défini par le Prix de revient du mètre foré.

Dans ce contexte, le présent travail consiste à mener une étude de performances des outils de forage dans le champs de Bourarhat.

Chapitre I : Dans ce chapitre en va présenter le champ de Bourarhat (situation géologique et lithologie de champs), qui situer au sud de bassin d'Illizi. Plusieurs puits son forer dans ce champs tel que : BRTS-2, BRTS-3, BRTS-4, OEB-2 et OEB-3.

Chapitre II : C'est une généralité sur les différents outils, utilise pour forer un puits pétrolier. Chaque outils a ces caractéristique et leur mode de travaille et aussi sont classification.

Chapitre III : On base sur le choix des outils de forage puisque le choix de bon outil est un problème qui se répète mainte fois au cours de forage d'un puits.

Chapitre VI : C'est le dernier chapitre ou on doit faire une étude comparative entre les différents outils et leur performance dans la phase 8^{1/2} du champ Bourarhat. Dans cette étude nous avons basé sur deux facteurs importants pour choisir l'outil de forage le plus rentable tel que le prix du mètre foré (le plus faible)et la meilleure vitesse d'avancement (ROP) Qui est lié aux paramètres suivant :La vitesse de rotation (RPM),le poids sur l'outil (WOB) et le nettoyage de fond de taille etc....

CHAPITRE

I

GENERALITES SUR LE
CHAMP DE BOURARHAT

I. Introduction :

Bourarhat Sud se situe au Sud du bassin d'Ilizi. Il se présente en un vaste monoclinale compliqué localement, par des structures appuyées contre failles, généralement subméridiennes. Les formations qui affleurent dans ce secteur sont tous d'âge paléozoïque et particulièrement carbonifères (Westphalien, Namurien, Tournaisien et Viséen). Le présent rapport d'implantation s'inscrit dans le cadre de l'appréciation de la structure de Bourarhat Sud dans le réservoir cambro-ordovicien [10].

II. Situation géographique et localisation des puits étudiés :

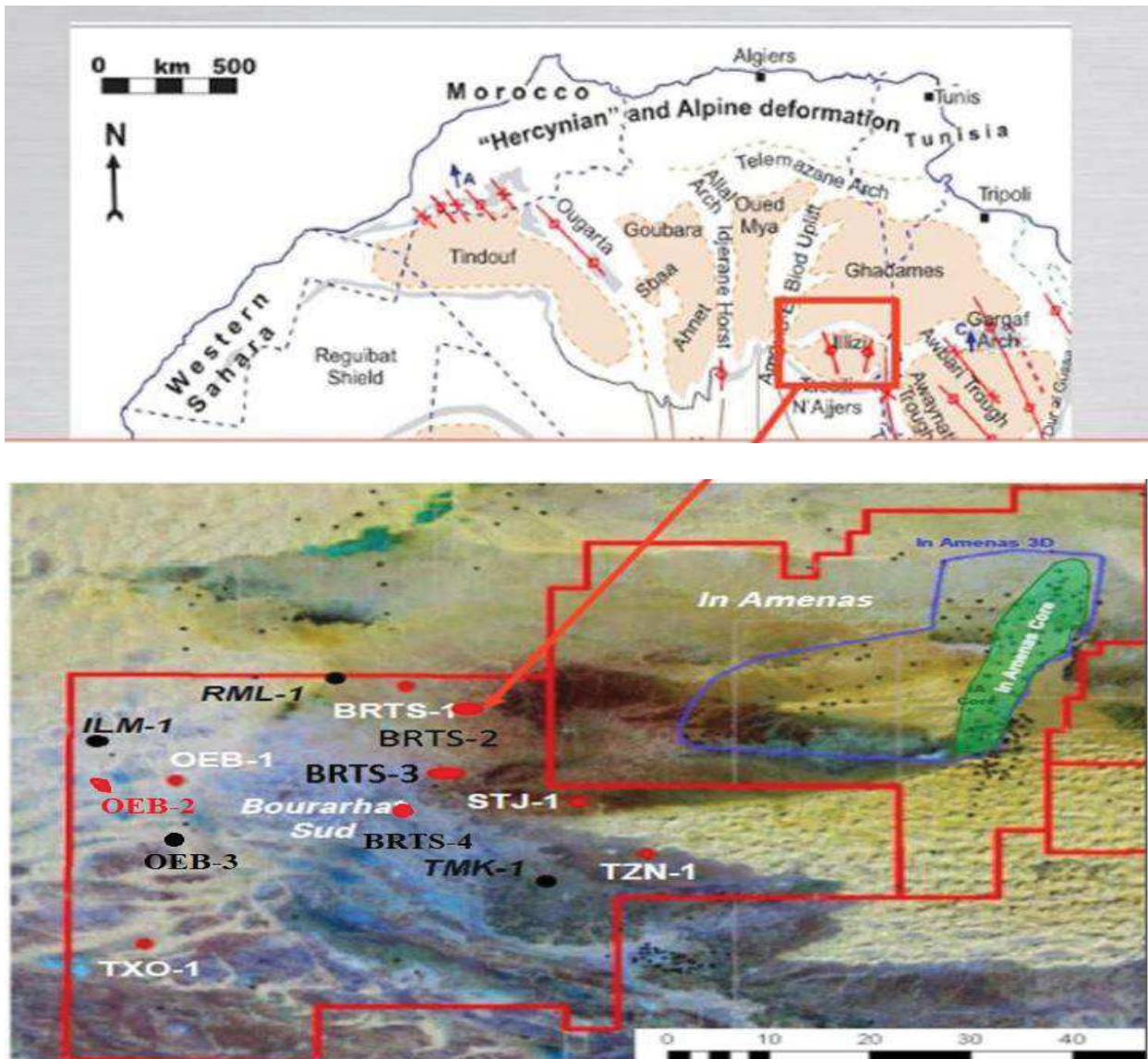


Figure I.1 : Situation géographique et localisation des puits étudiés [10].

A. Localisation de puits BRTS-2:

Il est situé à proximité de puits BRTS-1. Il sera foré avec l'appareil TP-212. Il admet comme coordonnées d'implantation :

Tableau I.1 : Les coordonnes de puits BRTS-2 [10].

UTM (Universal Transverse Mercator)	Géographiques	Altitudes
X = 462967.39	Longitude = 08° 37' 26.79160' E	Zs = 488.68m
Y = 3073294.13	Latitude = 27°47' 09.16521" N	Zt = 496.3m

B. Localisation de puits BRTS-3:

Il est situé à proximité des puits BRTS-1et BRTS-2. Il sera foré avec l'appareil TP-212. Il admet comme coordonnées d'implantation :

Tableau I.2 : Les coordonnes de puits BRTS-3 [10].

UTM (Universal Transverse Mercator)	Géographiques:	Altitudes:
X = 462272.31	Longitude = 08° 37' 01.91127' E	Zs = 474.72m
Y = 3068737.73	Latitude = 27°44' 41.01022" N	Zt = 482.35 m

C. Localisation de puits BRTS-4:

Le forage Bourarhat Sud-4 (BRTS-4) se situe à environ de 1770m au Sud-ouest du puits BRTS-3. Il sera foré avec l'appareil TP-212. Il admet comme coordonnées d'implantation :

Tableau I.3 : Les coordonnes de puits BRTS-4 [10].

UTM (Universal Transverse Mercator)	Géographiques	Altitudes
X = 461 144.224	Longitude = 08° 36' 20.86581' E	Zs = 487.46 m (Msl)
Y = 3 067374.504	Latitude = 27°43' 56.58807" N	Zt = 495.08 m

D. Localisation de puits OEB-2 :

Il sera foré avec l'appareil GWDC-158. Il admet comme coordonnées d'implantation :

Tableau I.4 : Les coordonnes de puits OEB-2 [10].

UTM (Universal Transverse Mercator)	Altitudes:
X = 433 767.685	Zs = 466m
Y = 3 060831.681	Zt = 473.65 m

E. Localisation de puits OEB-3:

Le forage Ouest Erg Bourarhat Sud-3 (OEB-3) se situé a environ de 2892 m au Sud du puits OEB-1, il sera foré avec l'appareil TP-212. Il admet comme coordonnées d'implantation:

Tableau I.5 : Les coordonnes de puits OEB-3 [10].

UTM (Universal Transverse Mercator)	Géographiques:	Altitudes:
X = 436927.041m	Longitude = 08° 21' 38.17530" E	Zs = 465.400m
Y = 3058079.979m	Latitude = 27° 38' 51.21507" N	Zt = 473.02m

III. Aperçu litho-stratigraphique :

La série stratigraphique devant être traversée par le forage est constituée par les formations d'âge paléozoïque, reposant en discordance majeure sur un socle souvent plissé de composition pétrographique variée, surmonté par les formations d'âge mésozoïque, reposant à leur tour en discordance sur le Paléozoïque. On distingue de haut en bas [8]:

A. Le Carbonifère :

- **Westphalien F** : Prédominance de calcaire gris; parfois microcristalline. Inter-couches de marnes calcaires multicolore. Calcaire très dur, sans porosité visible et parfois dolomitique. De petites quantités de pyrite ont été observées, également des traces de foraminifères, épines échinoides et microfossiles.

- **Westphalienne-Namurien E**: A prédominance argileuse, avec des intercalations calcaires. Mudstones multicolore devenant moins calcaires et marneux, avec la profondeur. Les inter- stratifiés et calcaires restent parfois microcristalline, sans porosité visible. De petites quantités de gypse se trouvent dans les interlits plus élevés, ainsi que des microfossiles et oolites en traces apparaissant à plus grande profondeur. Du sable propre et siltstone ont également été observés, principalement avec de la calcite cimentée, avec de temps en temps de la silice. Comme pour le calcaire, la porosité est faible.

- **Namurien D** : Top marqué par une base de calcaire à l'apparence de gris foncé. Grès bien triés et mudstones polyédriques contenant de la pyrite disséminée et devenant de plus en plus limoneux vers la base.

- **Visean C** : Marqué par deux lits de calcaire minces. Le Visean C est blanc cassé, très fins, à grès siltstones polyédriques, non calcaires et marnes avec intercalations mineures de calcaire, qui sont rarement oolitique.

- **Visean B** : Composé de grès, siltstones et de mudstones, avec quelques interlits de grès propre consistant, en vrac. Les grains de quartz sont sub-angulaires. La section basale montre une augmentation générale de la quantité de mudstone et de la teneur en argile.

- **Tournaisien A** : Composé de siltstones et de mudstones intercalés, avec des horizons de grès minces, montrant des traces de pyrite et présentant de faibles porosités.

B. Le Dévonien :

- **Le F2** : Grès massif, avec modérément une bonne porosité visible, inters stratifiés, très micacé, schisteux mudstone.
- **Série argileuse** : Mudstone , avec des inter- lits de grès et limons de calcaire gris.
- **Le F4** : Grès multicolore distinctif contenant des interlits de mudstones micacés.
- **La Série Argileuse** : Avec une certaine prédominance de mudstones inter-lités de grès blanc de grosseur variable.
- **Le F5** : Composé principalement de grains de quartz incolores, cimentés localement, avec de la silice et une bonne porosité.
- **Le F6, unité C3** : Grès massif. Les lits de mudstone sont micacés. Le grès est blanc à blanc cassé sub- angulaire à grains arrondis, et bien triés à porosité visible. Le ciment est siliceux, avec quelques grains de quartz, incolores en vrac et des traces de pyrite.
- **Le F6, unité C2** : Grès de couleur vert clair, blanc à incolore, avec des grains de quartz fins, moyennement triés. Il est maintenu dans une matrice d'argile verdâtre propre et friable. Le grès montre une porosité modérée à bonne.
- **Le F6, unité C3** : Blanc cassé à gris verdâtre clair, avec grains de quartz incolores. La plupart du temps propre, avec certaines zones d'une matrice d'argile molle, verte à porosité visible modérée à bonne.

C. Le Silurien :

- **Le F6, unité B1** : Blanc cassé à la lumière, à gris verdâtre, grains de quartz incolores, à faible tri. Très propre avec quelques zones ayant une matrice d'argile molle, verte. La porosité visible est modérée à bonne.
- **Le F6, unité A** : Sandstone de couleur blanc cassé à gris verdâtre clair, à grains de quartz incolores. Friables à modérément dur, bien triés et très propre avec certaines zones ayant une matrice d'argile molle, vert. La porosité visible est modérée à bonne.
- **Le F6, unité M2** : Grès avec des inter-lits de mudstone. Le grès est vert foncé, tacheté de gris clair à grains de quartz incolores. Modérément triés à porosité visible modérée. Le ciment y est siliceux dans certaines régions. Le mudstone stratifié est

Gris clair brunâtre à brun-rouge, modérément dur et très limoneux avec des traces de pyrite.

- **Le F6, unité M1** : Le haut de la section est composé de grès, avec des inter-lits de mudstone, devenant un Siltstone, avec la profondeur. Les échantillons ont une couleur brunrouge visible, mal consolidées et très ferrugineux dans les couches les moins profondes, avec abondances d'hématite et sidérite. La Base est dure et de couleur gris clair. Il s'agit de grès quartzeux, avec inter- lits mineurs de mudstone.

- **Le Silurien argileux** : Mudstones schisteux, avec inter-couches et des grès quartzites de quantités variables. Un pourcentage plus élevé de sable est à noter en haut de la formation devenant à mudstone vers la base. Des traces de calcaires friables sont à signaler dans les sections de mudstone inférieures.

D. Le Cambro-Ordovicien :

- **MS2** : Top marqué par la grande quantité de grès. Les grès montrent des grains de très fins à très grossiers avec une porosité montrant aussi une large fourchette (très faible porosité est notée vers la base de la formation en raison de la cimentation quartzitique). Le mince horizon de mudstone occasionnel se voit dans la moitié supérieure de la section. Le mudstone est grisâtre clair à gris noir, limoneux et légèrement calcaire avec des grains de pyrite disséminée étant trouvé dans le top de la plupart des couches.

- **MS1** : grès quartzeux, à grains moyens à très grossiers au sommet de la section, à moyens vers la base. Le ciment y est siliceux. La porosité diminue avec la profondeur, avec une bonne porosité dans la partie supérieure diminuant dans les sections inférieures.

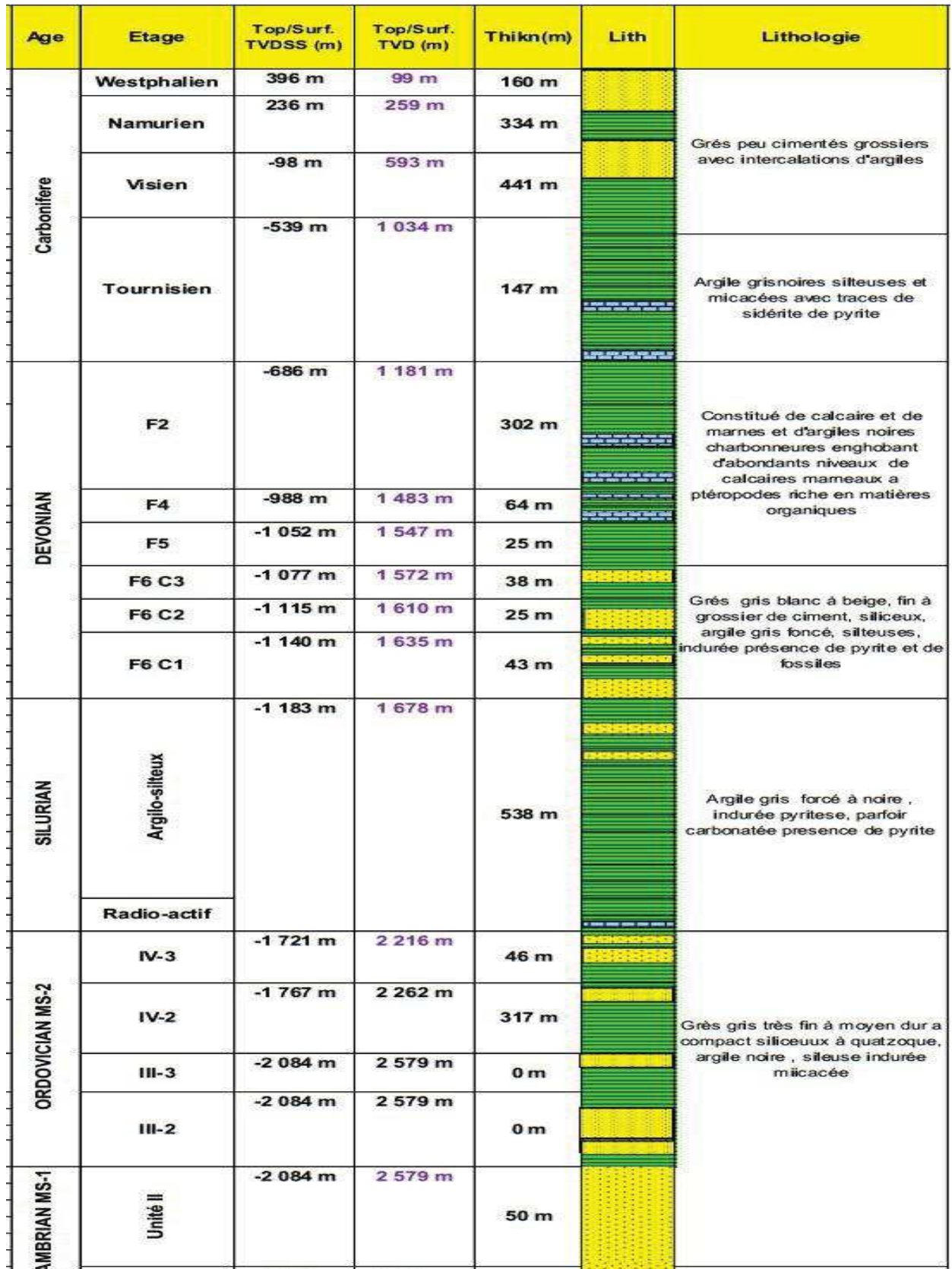


Figure I.2 : Coupe stratigraphique [8].

CHAPITRE

II

GENERALITES SUR LES OUTILES DE FORAGE

I. Introduction :

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.

L'outil le plus économique n'est pas nécessairement celui qui permet l'avancement le plus rapide. Il faut prendre en considération sa durée de vie et les temps de manœuvre.

La destruction de la roche et la vitesse d'avancement dépendent essentiellement du type d'outil et des paramètres de forage qui lui sont appliqués.

Les paramètres de forage peuvent être classés en deux catégories :

➤ Les paramètres mécaniques :

- ✓ Type de l'outil.
- ✓ Poids sur l'outil.
- ✓ Vitesse de rotation.

➤ Les paramètres hydrauliques :

- ✓ Débit.
- ✓ Nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité et filtrat).

Les outils de forage ont évolué au cours du temps pour répondre aux problèmes techniques du forage au cours de la réalisation du puits, qui s'avèrent de plus en plus complexes.

Toutes ces évolutions ont eu pour but d'augmenter la vitesse d'avancement et la durée de vie des outils, et donc de réduire le coût du forage.

Les outils de forage peuvent être classés en deux groupes :

- Les outils à molettes.
- Les outils diamants.

II. Les différents types des outils de forage :

Ces outils se classent en deux catégories :

II. 1. Les outils à molettes :

Les outils à molettes peuvent être des bi-cônes (utilisés dans les déviations par pression), des tricônes (les plus utilisés dans les forages actuels) ou des quadri-cônes (actuellement disparus).

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. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de friction, système de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression.

Les molettes d'un outil ne sont pas identiques: la molette n°1 possède une pointe qui occupe le centre, et les molettes n° 2 et 3 sont celles qui viennent après, dans le sens des aiguilles d'une montre.

Les dents peuvent être usinées directement dans la molette ou des pastilles en carbure de tungstène serties dans des trous percés sur la molette. Les outils à pastilles en carbure de tungstène et à paliers de friction ont une durée de vie plus longue dans les formations dures que les outils à dents fraisées et roulements à rouleaux [1].

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

- Des dents usinées dans le cône.
- Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône.



Figure II.1 : Les outils à molettes (tricône) [10].

- **Tricône à dents en acier (Steel Tooth Bit):** dont les dents sont usinées dans le cône. Ils sont généralement employés avec des vitesses de rotation relativement élevées dans les formations de surface [5].



Figure II.2 : Tricône à dents en acier [5].

- **Tricône à picots (Insert Bit):** dont les picots de carbure de tungstène sont emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône. Il a été initialement conçu pour forer les silices et les quartzites extrêmement durs et abrasifs qui étaient très coûteux à forer avec les outils à dents en acier en raison de leur durée de vie relativement courte [5].



Figure II.3: Tricône à picots [5].

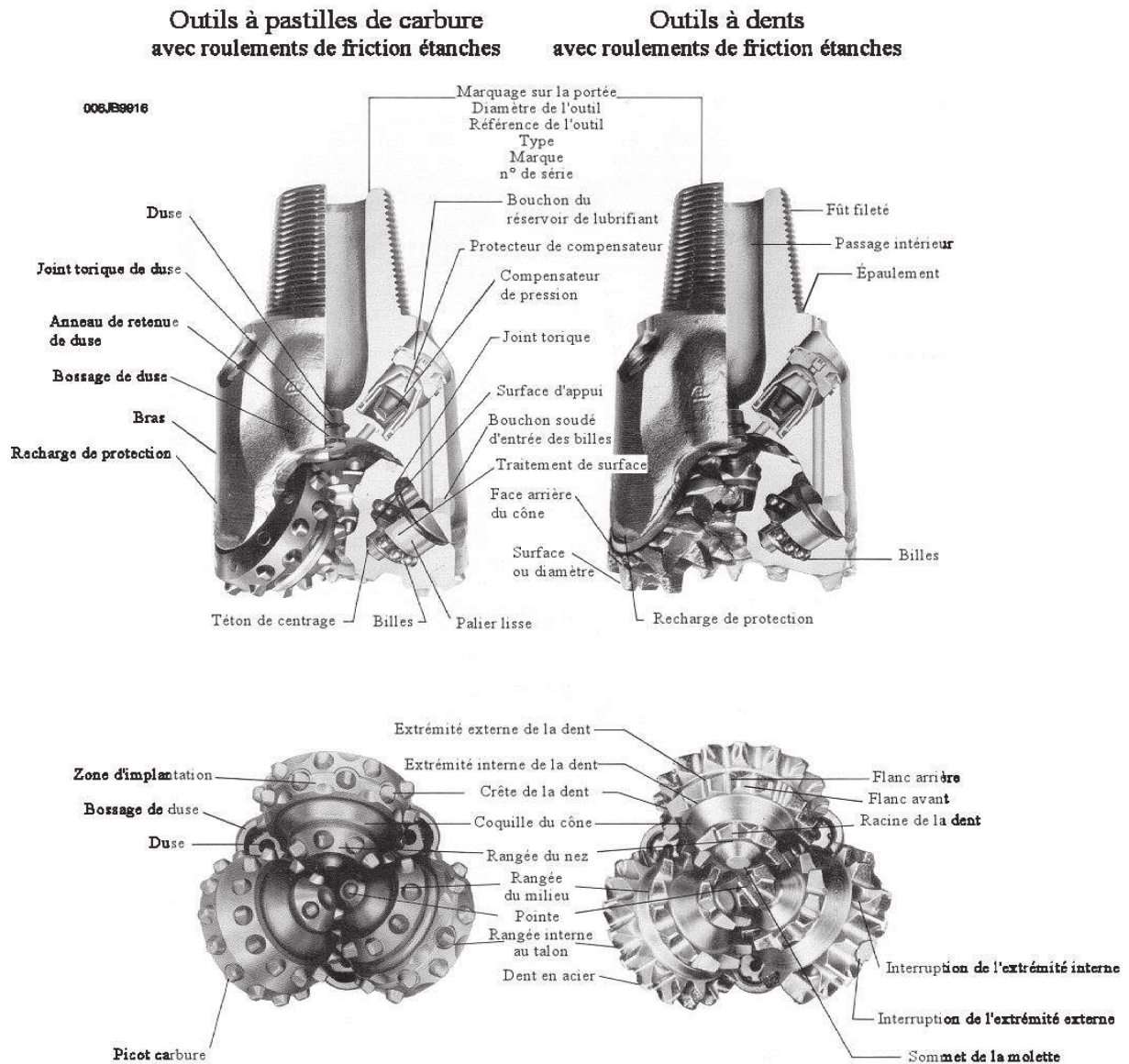


Figure II.4: Nomenclature des tricônes [6].

II .1.1. Mode de destruction de la roche :

L'efficacité d'un outil à molettes dépend de sa capacité à broyer la roche et à évacuer les morceaux, le tricône travaille par :

1. Percussion et pénétration de la dent ou du picot dans la formation. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour avoir un meilleur avancement. L'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille. La contrainte de compression appliquée sur la formation induit une fracture.
2. Arrachage du copeau de terrain par glissement de la molette sur elle-même (ripage). Ce glissement devra être plus important en terrain tendre qu'en terrain dur.

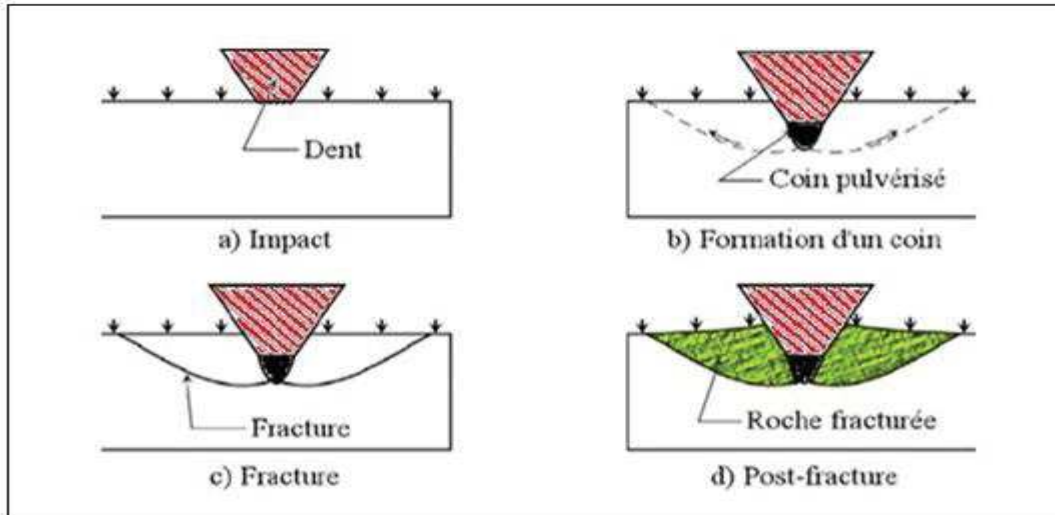


Figure II.5: Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche [1].

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].

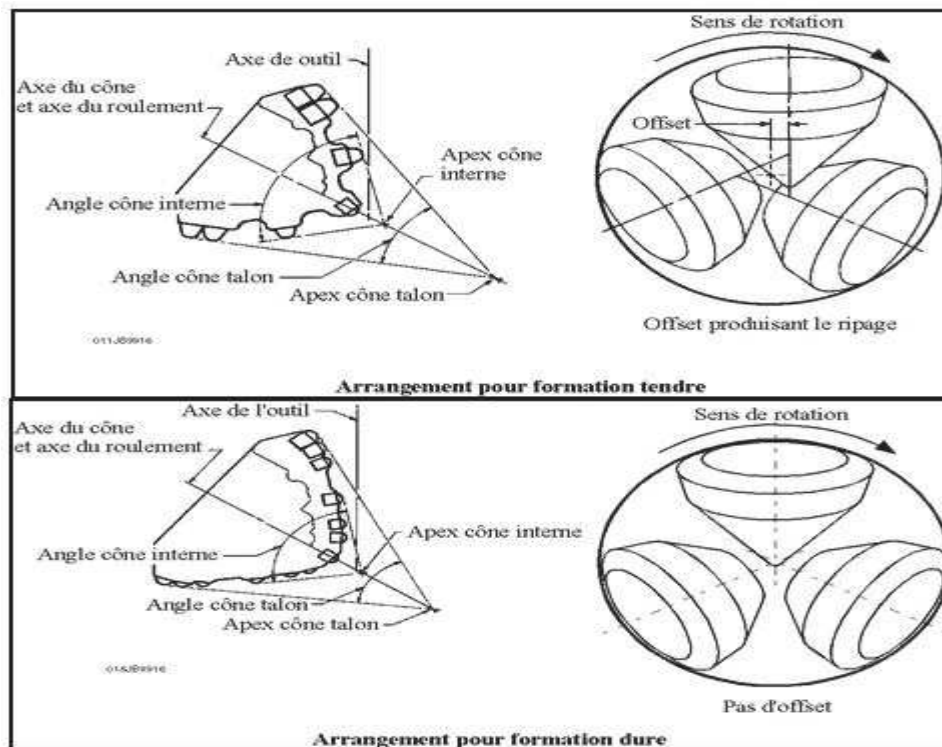


Figure II.6: Offset et inclinaison des cônes [6].

II.1.2. Structure de coupe :

Pour balayer entièrement le front de taille, les rangées de dents et / ou de picots sont décalées sur chaque molette.

La répartition des éléments de coupe sur chaque cône est importante. Un bon arrangement permet d'améliorer le nettoyage de l'outil et de réduire les risques de bourrage.

Les structures de coupe sont réparties en plusieurs rangées :

1. La rangée de nez (nose row) la plus au centre de l'outil.
2. La rangée médiane (middle row).
3. La rangée de talon (heel row) la plus extérieure.

Des picots de carbure de tungstène plats sont sertis sur la face extérieure des cônes, ceci afin de renforcer le talon de l'outil et de limiter la perte de diamètre dans les formations abrasives. La tendance actuelle est de renforcer cette face avec des diamants.

Le pas (écartement entre les éléments de coupe d'une même rangée) est également un point important. Si les dents sont régulièrement réparties sur un cercle, elles vont retomber toujours au même endroit sur le front de taille réduisant ainsi la pénétration et la destruction de la roche. Pour éviter cela, la répartition des dents n'est pas régulière [5].

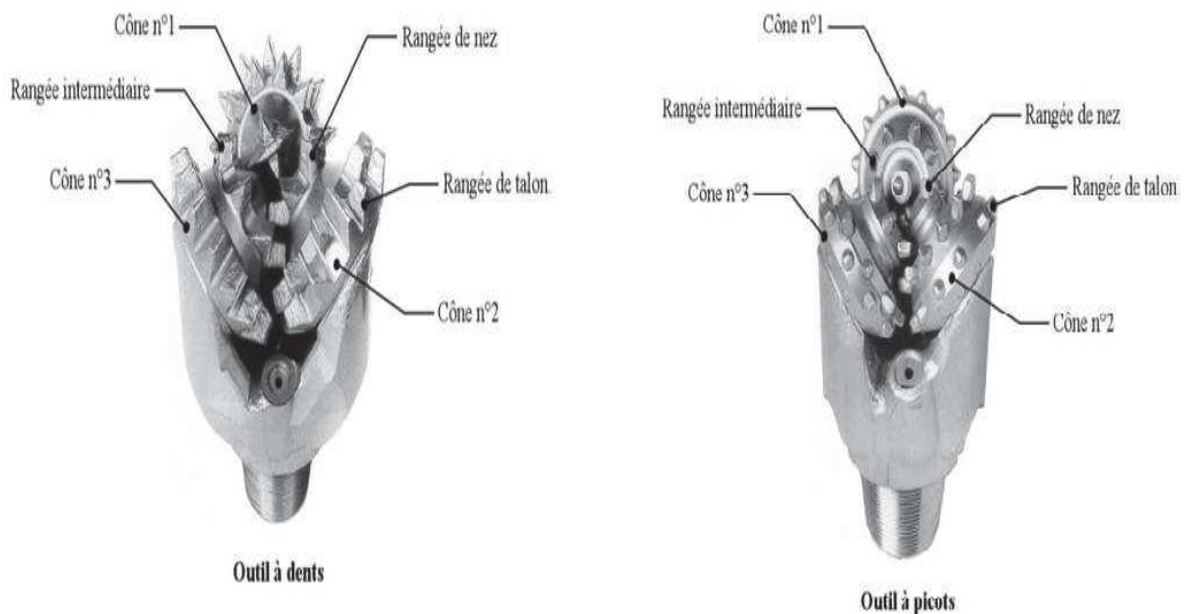


Figure II.7: Numérotation des cônes et répartition les outils à molettes [4].

a) Dents en acier :

Les dents de la rangée de talon ont des profils de crête adaptés aux formations à forer, le but étant de limiter leur usure et ainsi de réduire la perte de diamètre de l'outil.

Les dents des outils pour les formations tendres sont longues, largement espacées, de façon à favoriser la pénétration dans le terrain et l'arrachement de fragments plus importants. Les dents des outils pour ce type de formation peuvent être conçues pour s'auto-affûter en s'usant. Cela est réalisé en rechargeant seulement un côté de la dent.

Les dents des outils pour les formations moyennes et mi-dures sont plus rapprochées. La dent a également des angles légèrement plus grands pour supporter la charge nécessaire pour vaincre la résistance de la formation.

Les formations dures ont de fortes résistances à la compression et sont habituellement très abrasives. Les dents des outils conçues pour forer ces formations sont solides et peu espacées ainsi que des cônes sont épais de manière à supporter des poids importants.

Les dents pour formations dures ne sont pas rechargées. Elles présentent la même dureté sur les deux faces. Ces dents en s'usant ne s'affûtent pas. Il sera nécessaire d'appliquer un poids de plus en plus important sur l'outil pour obtenir le même avancement au fur et à mesure qu'il s'use [5].

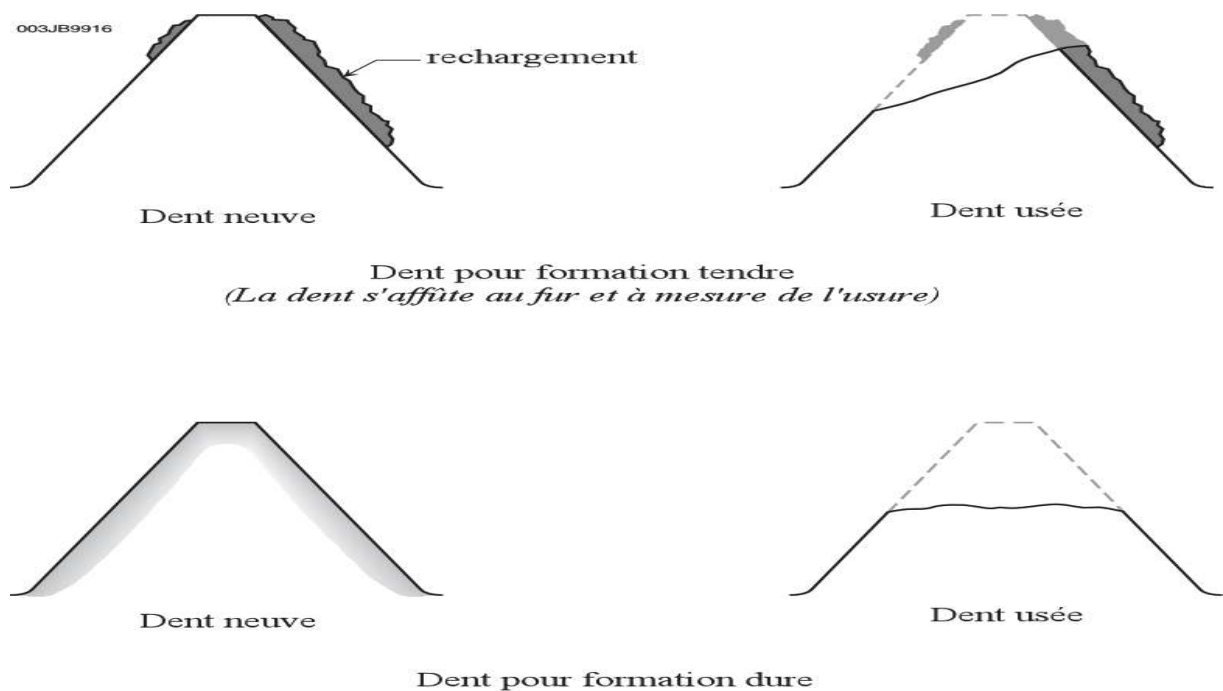


Figure II.8: Rechargement et affûtage des dents [6].

b) Picots de carbure de tungstène :

Les picots cylindriques en carbure de tungstène frittés sont sertis dans des trous usinés dans les cônes. Cet assemblage donne une structure de coupe présentant une grande résistance à l'usure par abrasion ainsi qu'aux efforts de compression. Grâce aux progrès de la métallurgie, différentes formes de picots sont actuellement disponibles, ce qui permet d'utiliser ce type d'outil pratiquement dans tous les types de terrain [5].

- La forme ovoïde est la plus résistante et elle est destinée pour l'action d'écrasement et d'éclatement nécessaire au forage des formations très dures.
- Les ogives présentent un peu plus de proéminence pour forer des formations un peu plus tendres.
- Le cône a également un profil solide convenant parfaitement à une action de forage du type écrasement et éclatement. Il est utilisé avec une action de raclage pour le forage des formations mi-dures.
- Le ciseau est utilisé dans les formations moyennes et tendres pour un avancement maximum grâce à une action de gouge et de raclage. Des formes spécifiques de ciseau sont choisies en fonction de la formation et des propriétés géométriques de l'outil.
- Les picots utilisés sur la rangée de talon sont plus courts et plus arrondis que ceux des autres rangées car ils supportent des charges plus importantes.

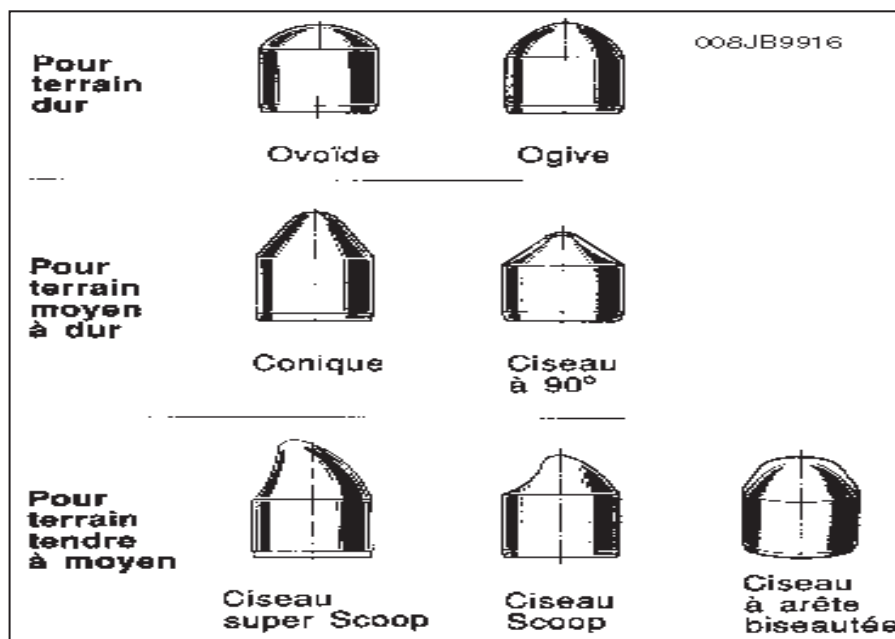


Figure II.9: Différents types de picots [6].

II.1.3. Classification IADC (International Association of Drilling Contractors) des outils à molettes :

La première classification a été réalisée en 1972 par l'IADC dans le but d'éliminer toute confusion provenant de différents systèmes de codage utilisés par les fabricants [1].

La classification IADC est représentée par 04 caractères : 03 chiffres et 01 lettre.

1^{er} Chiffre :

De 1 à 3 : Outils à dents fraisées en acier correspondant à des duretés de terrains croissantes.

- 1 - Formations tendres ayant une faible résistance à la compression et une grande forabilité.
- 2 - Formations moyennement tendres à moyennement dures ayant une forte résistance à la compression.
- 3 - Formations dures semi-abrasives ou abrasives.

De 4 à 8 : Outils à picots (inserts) en carbure de tungstène correspondant à des duretés de terrains croissantes.

- 4 - Formations tendres ayant une faible résistance à la compression et une grande forabilité.
- 5 - Formations tendres à moyennement tendres ayant une résistance faible à la compression.
- 6 - Formations moyennement dures ayant une forte résistance à la compression.
- 7 - Formations dures semi-abrasives à abrasives.
- 8 - Formations très dures et très abrasives.

2^{ème} Chiffre :

De 1 à 4 : Sous classification de la dureté des formations dans chacune des 08 classes déterminées par le 1^{er} chiffre.

3^{ème} Chiffre :

De 1 à 9 : Type de roulement, précision sur présence ou absence de protection par pastille en carbure de tungstène sur les bords d'attaque des molettes.

- 1 - Roulements standards non étanches sans protection.
- 2 - Roulements non étanches pour forage à l'air.
- 3 - Roulements non étanches avec protection.
- 4 - Roulements étanches sans protection.
- 5 - Roulements étanches avec protection.
- 6 - Paliers lisses étanches sans protection.
- 7 - Paliers lisses étanches avec protection.
- 8 et 9 - Pour un usage futur.

Lettre additionnelle :

Les lettres additionnelles apportent des précisions complémentaires sur les types d'outils :

- A** - Outils à paliers de friction pour forage à l'air.
- B** - Outils avec joints d'étanchéité spéciaux.
- C** - Outils à duse centrale.
- D** - Outils pour forage en déviation.
- E** - Outils à duses rallongées.
- G** - Outils à protections renforcées.
- H** - Outils application forage horizontal / steering.
- J** - Outils à duses inclinées.
- L** - Outils avec plaquette de protection du diamètre sur les bras.
- M** - Outils pour application au moteur.
- R** - Outils à soudures renforcés pour utilisation en percussion.
- S** - Outils à dents en acier standard.
- T** - Outils à deux molettes.
- W** - Outils à structure de coupe nouvelle.
- X** - Outils à inserts en forme de biseau.
- Y** - Outils à inserts coniques.
- Z** - Outils à inserts, autres formes.

II.2. Les outils à diamant :

Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont les outils monobloc. Des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot [5].

Le diamant est une substance ayant des propriétés physiques remarquables :

- C'est la substance la plus dure (résistance à l'écrasement la plus élevée) que l'on connaisse. Le diamant est environ 10 fois plus dur que l'acier et 2 fois plus que le carbure de tungstène.
- C'est la substance la plus résistante à l'usure (environ 10 fois plus résistant que le carbure de tungstène).

- C'est la substance qui a le plus faible coefficient de friction ; le diamant est plus glissant que le Téflon.
- C'est le meilleur conducteur de chaleur.
- Son coefficient de dilatation est très faible ce qui pose problème lorsqu'il est associé à d'autres matériaux (voir stabilité thermique des PDC).
- Son point de fusion est élevé (3 650 °C), mais il se transforme superficiellement en graphite à partir de 1 300 °C et perd sa résistance mécanique.
- Le poids des diamants s'exprime en carats (1 carat = 0.20 g). Un diamant d'un carat a un diamètre d'environ 5 mm.

Les outils diamantés sont de deux types :

- à diamant naturel.
- à diamant synthétique qui a son tour devise en deux catégories :
 - à taillants PDC ou diamant poly cristallins.
 - à taillants TSP ou diamant poly cristallins thermostables.

II.2.1. Les outils au diamant naturel :

C'est une cristallisation du carbure de densité 3,52. Du point de vue chimique le diamant et le graphite sont identiques. Alors que du point de vue physique, ils sont totalement contradictoires. Le graphite est fragile, noir, faible, souvent utilisé comme lubrifiant.

Le diamant par contre est extrêmement dur meilleur conducteur thermique, hautement abrasif la plupart du temps transparent, il est aussi un excellent isolant [6].

II.2.1.1. Caractéristiques principales du diamant naturel :

Le diamant est le matériau le plus dur et a des caractéristiques supérieures parmi les matériaux que l'on connaisse. Pour cela, c'est l'élément essentiel dans l'outil de forage, qui résiste aux conditions de fond (haute température et haute pression) [5].

Tableau II.1: Caractéristiques principales du diamant naturel. Source: IAP

Caractéristiques	Unité	Diamant	PDC	Carbure tungstène	Acier
Dureté	Kg/mm ²	6000-9000	5000-8000	1475	558
Résistance à la Compression	10 ³ psi	1260	890	780	238

Conductivité thermique (25°)	cm.° C	5.2	4.3	1.00	0.48
Densité	g/cm3	3.25	3-3.25	14.95	785
Point de fusion	°C	3650	-	2860	1530
Résistance à l'écrasement	Bars	80000	-	50000	15000
Module de Young	106 psi	105-152	132	92	29

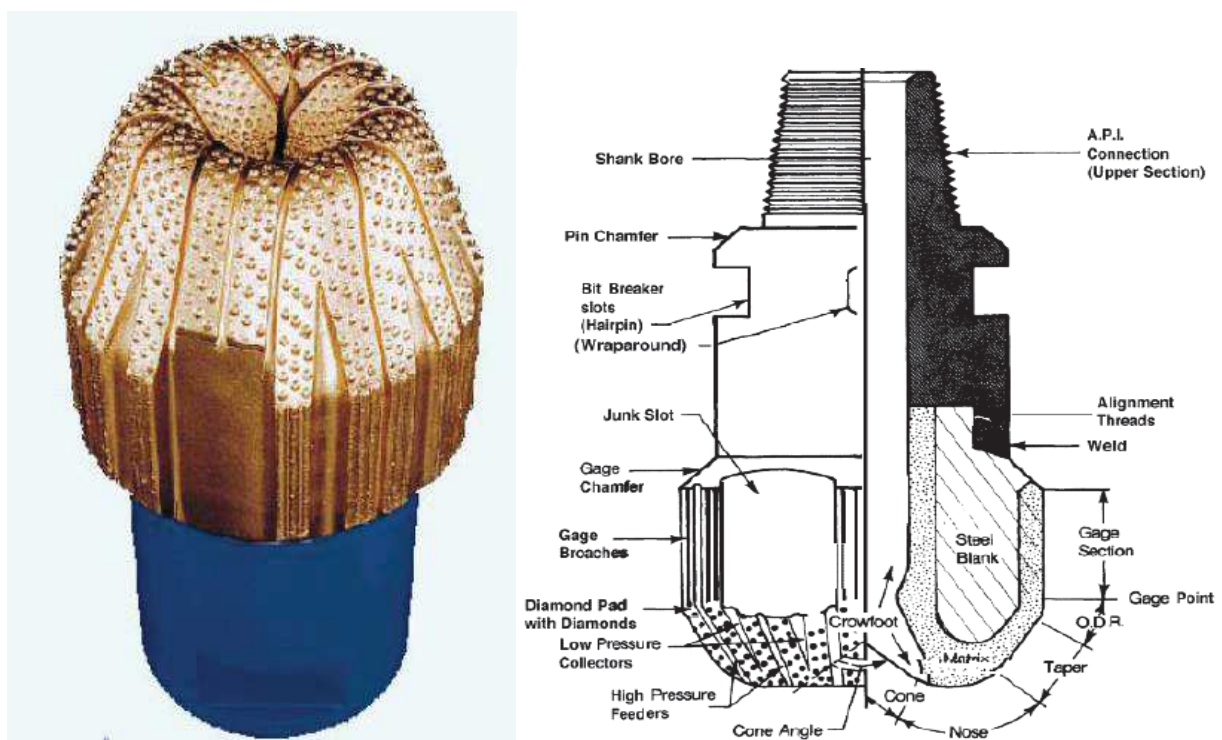


Figure II.10: Outil au diamant naturel [4].

II.2.1.2. Mode de destruction de la roche par diamant naturel :

Il agit par abrasion en creusant un sillon autant par fracturation que cisaillement, il laboure la roche. L'effort d'écrasement a autant d'importance que l'effort tangent. Il sera nécessaire d'appliquer un poids et une vitesse de rotation relativement élevés pour forer.

Le handicap du diamant naturel est la faible dimension des pierres utilisées. La profondeur de l'entaille produite dans la roche est très faible (de l'ordre de 0.1 mm).

Cela limite l'utilisation du diamant naturel aux terrains les plus durs et abrasifs. Les vitesses d'avancement obtenues seront donc relativement faibles (de 2 à 5 m/h) [5].

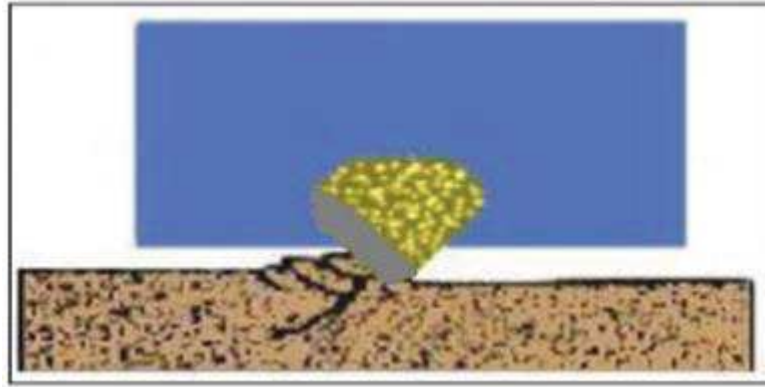


Figure II.11: Action d'un outil à diamant naturel [6].

II.2.2. Les outils à diamant synthétique :

Les outils au diamant synthétique sont plus résistants à l'abrasion que ceux au diamant naturel mais sont moins durs.

On distingue ces deux produits poly cristallins :

- Le diamant synthétique basse température PDC.
- Le diamant synthétique haut température TSD.

Les avantages de diamant synthétique au diamant naturel :

- Les deux produits (PDC, TSD) sont plus résistants à l'abrasion que les diamants naturels mais ils sont moins durs.
- La raison de l'énorme succès des pierres synthétiques et que le scientifique a la possibilité de fabriquer des diamants qui répondent exactement aux exigences des industriels.

II.2.2.1. Les outils PDC :

Le PDC se présente, en général, sous la forme d'une fine lamelle de diamant synthétique (épaisseur de 0,5 mm) avec des impuretés de cobalt, placée sur un substrat de carbure de tungstène. La couche de diamant est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires. Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux. La couche de diamant s'use par micro-écaillage et par graphitisation, causés par les températures très élevées qui se développent au contact de la formation forée, ce qui entraîne un auto-affûtage du PDC qui maintient l'efficacité de l'arête de coupe [3].

Les performances du taillant seront donc peu ou pas diminuées au cours de la vie de l'outil tant que la surface de contact avec la formation située derrière le PDC reste dans des

proportions raisonnables et que la roche n'est pas trop dure. A partir de 400 °C, la dilatation différentielle des différents constituants produit des ruptures de liaisons entre les cristaux et le PDC perd progressivement sa résistance. La structure n'est plus stable aux environs de 750 °C [1].

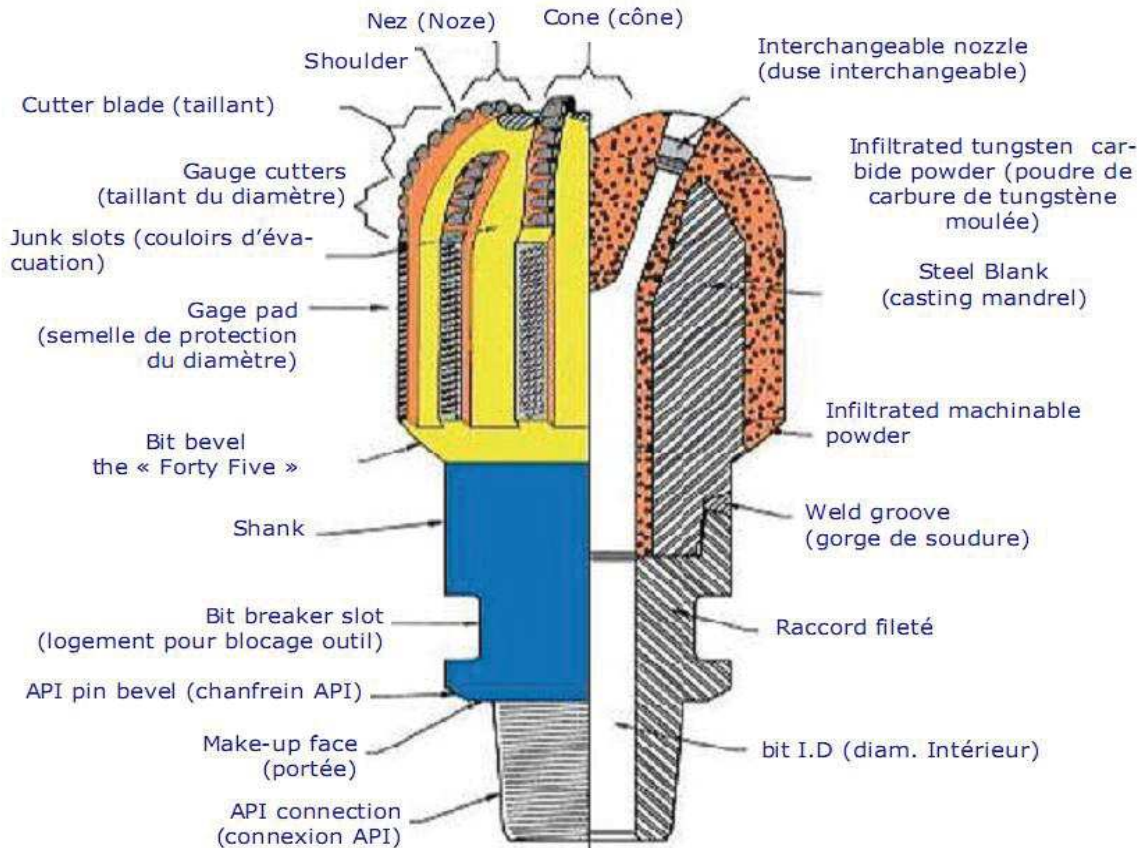


Figure II.12: Nomenclature des éléments des outils PDC [1].

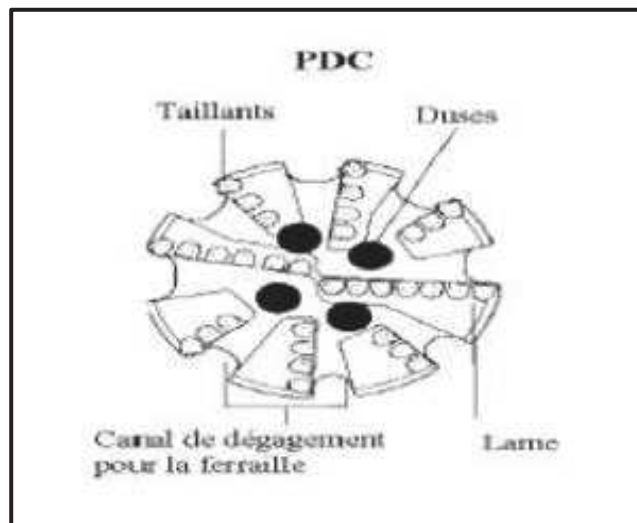


Figure II.13: Outil PDC [6].

II.2.2.1.1. Mode de travail d'un outil PDC :

Ils travaillent par cisaillement. La mise en action de l'élément de coupe nécessite en premier un effort d'écrasement entraînant la pénétration dans la formation.

Les taillants soulèvent les copeaux de roche formés ce qui contribue à un meilleur nettoyage du front de taille, donc évite le bourrage de l'outil et permet d'obtenir une vitesse d'avancement maximale (dans les formations plastiques, l'avancement est plus limité par le nettoyage du front de taille que par la destruction de la roche) [5].

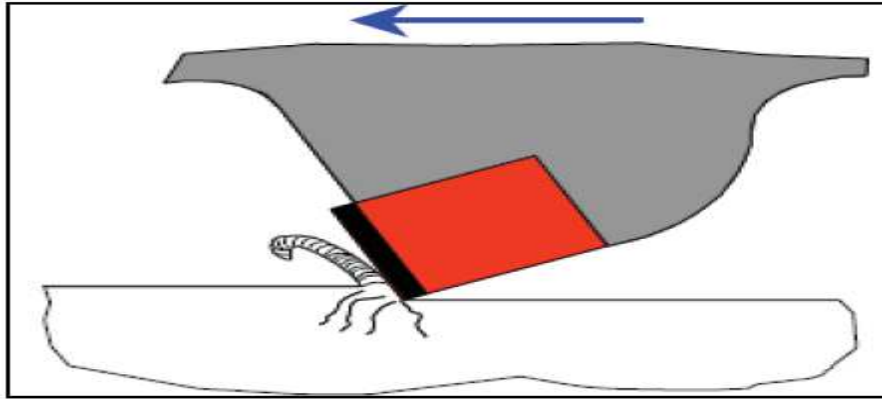


Figure II.14: Action de l'outil PDC [5].

II.2.2.1.2. Principe de fonctionnement :

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

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

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

➤ 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 [1].

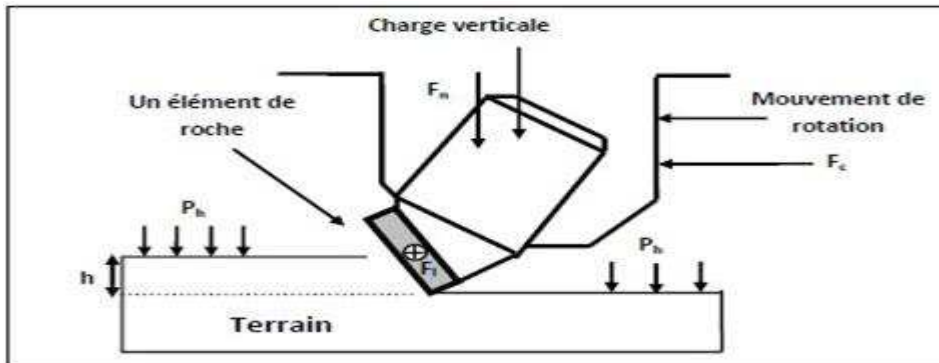


Figure II.15: Efforts appliqués sur le cutter [1].

II.2.2.1.3. Désignation d'un outil PDC :

On désigne un outil par :

1. Le corps de l'outil :

a) -Corps en acier (Steel body):

Le corps est en acier monobloc obtenu par usinage. Ces outils ont des taillants PDC sertis directement dans le corps sans brasage. Le diamètre est protégé par des barres en carbure de tungstène sur toute la hauteur de la jupe extérieure. Pour réduire le phénomène d'érosion du corps, la surface d'attaque de l'outil est protégée par une métallisation dure. Ce type d'outils offre la possibilité d'utiliser toute la surface du taillant, étant donné qu'il est entièrement exposé, et de remplacer les taillants après utilisation s'il n'y a pas eu érosion du corps. Par contre, les taillants ne peuvent pas supporter un torque important et se cassent à la base du corps [1].

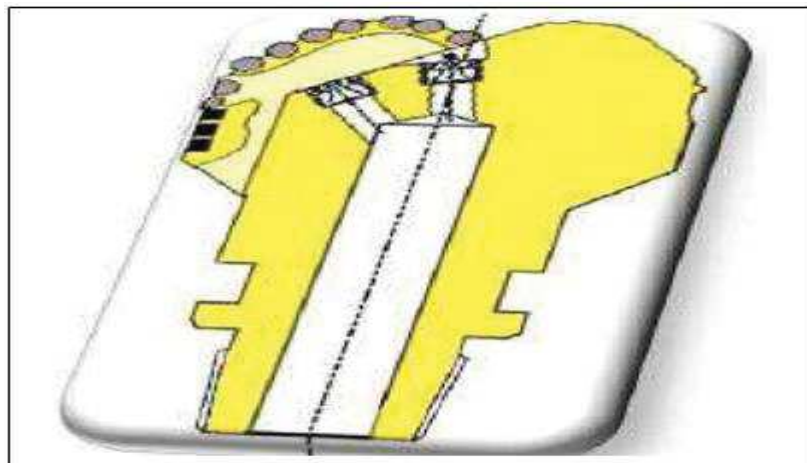


Figure II.16: Outil PDC Steel body [1].

➤ Les avantages du steel body :

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

➤ Les inconvénients du steel body :

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

b) –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.

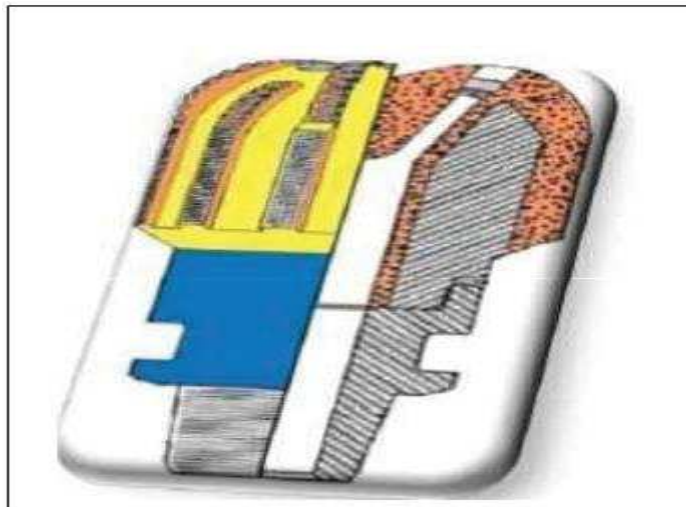


Figure II.17: Outil PDC Matrix body [1].

➤ Les avantages du Matrix body :

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

➤ Les inconvénients du Matrix body :

- son prix qui est sensiblement plus élevé que le steel body.
- une fois utilisé, cet outil ne peut pas être réparé.

- toute la surface de cutter ne peut pas être utilisée du fait de sa position dans la matrice.

2. Le profil :

Il existe principalement trois types de profils :

a)-Le profil plat ou avec un faible cône intérieur :

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

Dans ce type de profil, le poids se répartit uniformément sur les taillants, mais le nombre de ces derniers est limité et leur usure est intégrale du fait de la stabilité de l'outil.

Les outils ayant ce profil sont utilisés pour des terrains tendres et sont peu favorables aux avancements rapides.

b)-Le profil double cône (cône intérieur très prononcé) :

Le cône intérieur est très prononcé. Les taillants sont répartis d'une façon croissante vers la périphérie, améliorant ainsi la stabilité et la précision directionnelle. De plus, l'usure des cutters est plus homogène pour les profils en pointe de cône que dans les autres types de profils. Les outils ayant ce profil sont utilisés pour des terrains durs.

c)-Le profil parabolique :

Court ou long, ce type de profil présente une surface importante sur laquelle un grand nombre de taillants est fixé.

Le profil court ou moyen a l'avantage de réduire le couple résistant durant le forage, ce qui permet d'appliquer davantage de poids sur l'outil et, par conséquent, augmenter la vitesse d'avancement. En outre, le profil parabolique est plus facile à diriger avec un moteur de fond dans un puits dévié.

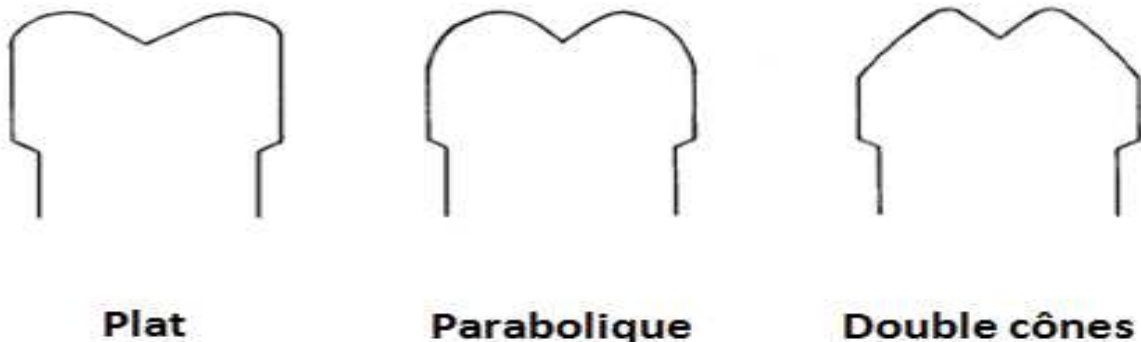


Figure II.18: Différents types de profils des outils PDC [12].

3. Densité des cutters :

Il est possible d'effectuer des mesurés qualitative de la performance d'un outil sur les différentes densités de distribution des cutters.

En général, lorsque la densité des cutters augmente, la vitesse de pénétration diminue. Si on augmente la densité des cutters d'un outil PDC, on réduit la charge effective par cutter [5].

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

4. Angles caractéristiques des pastilles PDC :

On définit trois angles caractéristiques sur les pastilles PDC :

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

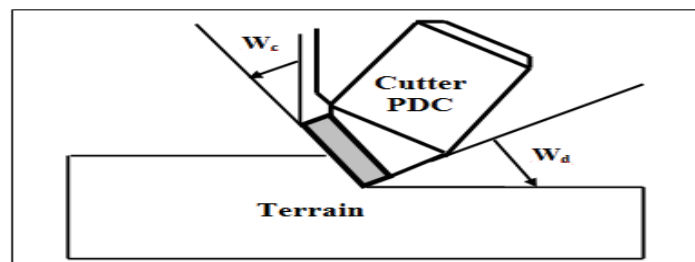


Figure II.19: Angles caractéristiques d'un PDC [5].

5. Longueur utile L_d :

La distance entre la matrice du trépan et le fond de la saignée creusée par le PDC est appelé "Longueur utile" (exposure).

Si L_d est la distance mesurée suivant la verticale entre la matrice du trépan et le centre de la pastille de diamètre D . Alors le rapport L_d/D est appelé L_{edge} .

Ces deux paramètres sont d'une importance capitale dans le système d'évacuation des copeaux et du nettoyage du puits et sur les efforts latéraux [5].

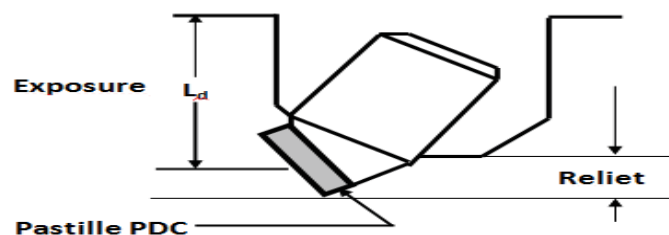


Figure II.20: Longueur utile L_d [12].

II.2.2.2. Les outils TSP :

TSP s'appelle aussi TSD (Thermally Stable Diamond). Il se compose de diamant synthétique sans cobalt (éliminé par acidification) et sans le substrat de carbure de tungstène.

Les TSP sont thermiquement stables jusqu'à 1200 °C. L'élimination du cobalt est faite parce qu'il n'est pas possible de fixer le diamant obtenu sur un support quelconque. Le TSP devra donc être maintenu en place mécaniquement comme le diamant naturel.

Les TSP sont, en général, recouverts du métal (tungstène ou nickel) par dépôt électrochimique, afin d'assurer une meilleure liaison avec la matrice et permettre alors une meilleure exposition.

Les TSP sont disponibles sous plusieurs formes :

- ✓ **Triangulaire** : dont les tailles standard sont de 3 à 1 pierres par carat. Elle est utilisée pour forer des formations moyennement dures à dures mais non abrasives.
- ✓ **Disque** : dont la taille est de l'ordre d'une pierre par carat. Elle est utilisée pour forer le même type de formation mais elle est plus performante dans les situations où une plus grande résistance à l'usure et au choc sont demandées. Cette forme permet d'avoir une vitesse d'avancement et une durée de vie plus élevées dans des formations dures et abrasives ou fracturées.

• TSP

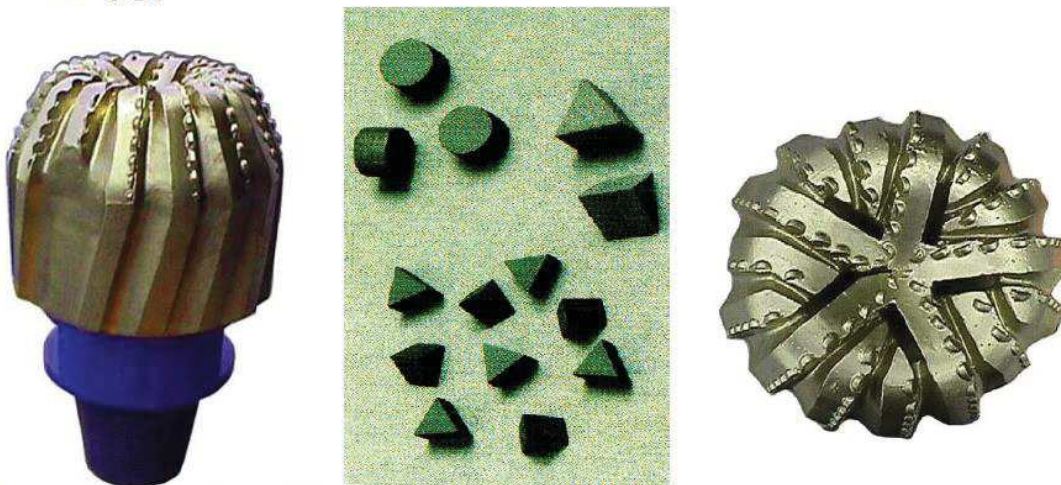


Figure II.21: outil TSP [4].

II.2.2.2.1. Mode de travail d'un outil TSP :

Ce type d'outil travaille d'une façon optimale tant qu'il peut conserver son angle d'attaque. Par la suite, son usure augmente et sa surface de contact devient moins efficace.

Ayant une bonne stabilité thermique (environ 1200°C), ces outils sont utilisés dans des formations moyennement dures à dures à abrasivité faible. Les taillants PDC de ces outils sont protégés à l'arrière par du TSD et/ou du diamant naturel, afin de ralentir et contrôler leur usure et permettre une dispersion plus rapide de la chaleur à l'arrière du taillant, empêchant ainsi d'atteindre des températures critiques dans la structure poly cristalline [3].

II.2.3. Fabrication des outils

II.2.3.1 Les outils à diamants naturels :

On procède d'abord à la fabrication d'un moule en graphite où la position de chaque diamant et des lignes d'eau (canaux d'irrigation des diamants) est prévue.

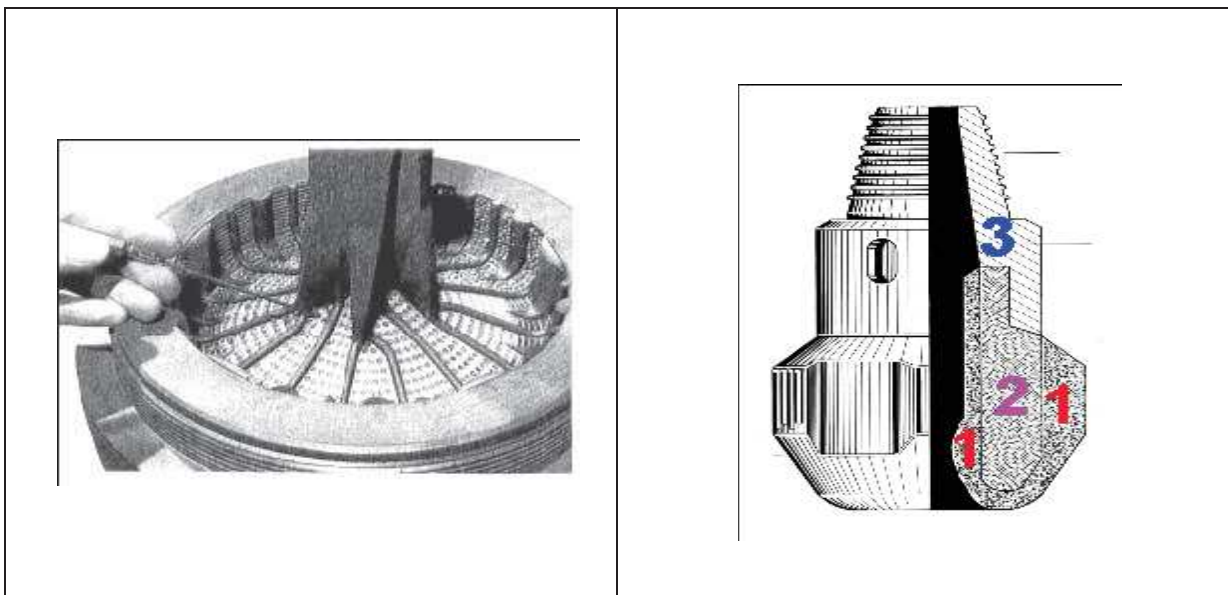


Figure II.22: Fabrication des outils [5].

Le moule est rempli de carbure de tungstène en poudre (1), au-dessus duquel on ajoute un liant à base de cuivre et de nickel, après mise en place de la monture en acier (2). Le point de fusion du liant se situe entre 900 et 1 080 °C suivant sa composition et selon la dureté de la matrice que l'on veut obtenir, l'ensemble est mis au four parfois pendant plusieurs heures (le temps dépend de la taille de l'outil) afin de permettre une pénétration parfaite du liant entre les grains de carbure et autour des diamants. Le raccord fileté (3) en acier au carbone (A.P.I.) est rapporté par soudure sur la monture en acier qui est-elle en acier doux (pour éviter la trempe et la carburisation dans le moule en graphite lors du passage au four).

II.2.3.2. Les diamants brasés :

A cause de leur faible résistance thermique, il n'est pas possible de mettre en place les PDC dans le moule et ensuite de passer l'ensemble au four.

Le procédé de fabrication de la matrice est identique à celui utilisé pour les diamants naturels. Pour le passage au four, les PDC sont remplacés par des pastilles de graphite.

Lorsque la matrice est terminée, ces pastilles sont enlevées et les taillants sont ensuite brasés. La brasure engendre des contraintes thermiques sur les taillants réduisant leurs capacités.

Les moules sont actuellement conçus par ordinateur et fabriqués en résine : cela permet de faire de nouveaux profils d'outil en un temps très court (de l'ordre de quelques jours) et permet également d'obtenir un dessin du moule plus précis.

II.2.3.3. Les diamants en imprégnation :

Pour l'imprégnation, on utilise des diamants de très petite taille (150 pierres par carat, ce qui correspond à un diamètre de l'ordre de 0.8 mm).



Figure II.23: Les diamants en imprégnation [3].

L'imprégnation se fait :

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

Ces outils sont utilisés pour forer des formations très dures et abrasives ou pour augmenter la durée de vie de l'outil. Au fur et à mesure de l'usure de la matrice, les diamants exposés se déchaussent et de nouveaux taillants apparaissent.

II.2.4. Classification IADC des outils diamants :

Un système de codification à quatre caractères permet de classer tous les outils diamants.

➤ **Le premier caractère :** Type de diamants et de matrice :

D : outil à diamants naturels possédant une matrice en carbure de tungstène.

M : outil PDC à matrice en carbure de tungstène.

S : outil PDC à matrice en acier.

L : outil TSP à matrice en carbure de tungstène.

O : autres types d'outils qui seront développés dans le futur.

➤ **Le deuxième caractère :** les profil d'outils sont qui codifiés à l'aide de neuf chiffres de 1 à 9 qui représentent les formes usuelles des outils diamants

Tableau II.2: Code des profils [5].

G : hauteur du calibre	C : hauteur du cône		
	Importante $C < 1/4D$	Moyenne $1/8 \leq C \leq 1/4 D$	Faible $C < 1/8D$
Importante $G > 3/8D$	1	2	3
Moyenne $1/8D \leq G \leq 3/8D$	4	5	6
Faible $G < 1/8D$	7	8	9

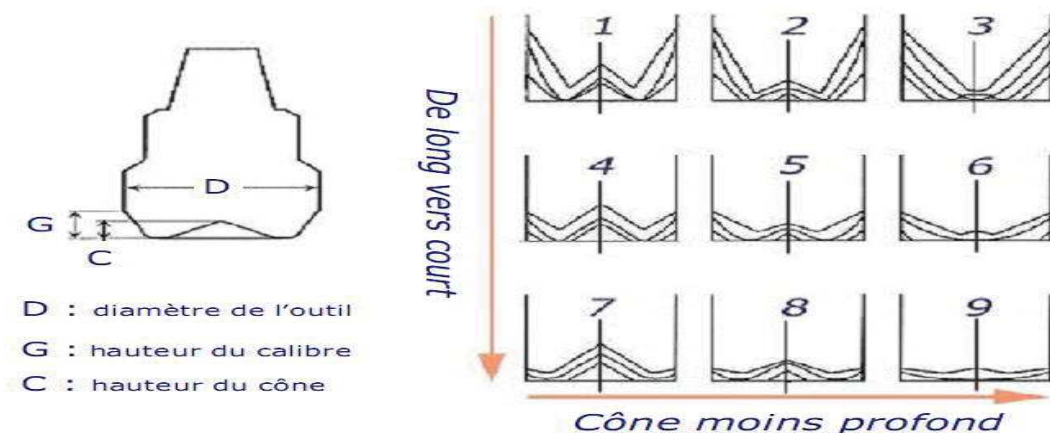


Figure II.24: Code des profils [5].

- **Le troisième caractère** : Le troisième caractère est un chiffre ou une lettre qui définit le type d'hydraulique de l'outil. Le dessin de l'hydraulique est défini par le type de dusage ou le type d'écoulement et par le placement des éléments de coupe (voir tableau).

Tableau II.3: Type de dusage (Code de l'hydraulique) [5].

Placement des éléments de coupe	Type de dusage		
	Duses interchangeables	Duses fixes	Conventionnels
Lames (*)	1	2	3
Nervures (*)	4	5	6
A plat	7	8	9

Alternativement aux codes 6 et 9 :

- R : pour sortie radiale du fluide.
- X : pour sortie avec gorge centrale.
- O : pour les autres types de sortie du fluide.

Le quatrième caractère : Taille et densité des diamants : neuf chiffres (1 à 9) symbolisent le type, la taille et la densité des diamants. La taille des diamants naturels est basée sur le nombre de pierres par carat, alors que la taille des diamants synthétiques est basée sur la dimension du taillant. La densité de diamants donne une indication relative de leur nombre afin de distinguer les outils fortement chargés de ceux faiblement chargés.

Tableau II.4: Densité des éléments de coupe [5].

	Densité		
	Faible	Moyenne	Grande
Grande	1	2	3
Moyenne	4	5	6
Faible	7	8	9

Tableau II.5: Taille des éléments de coupe [5].

Taille des éléments de coupe	Diamants naturels pierres par carat	Diamants synthétiques hauteur utile de l'élément de coupe
Grande	< 3	> 5/8
Moyenne	3 – 7	3/8 – 5/8
Faible	> 7	< 3/8

La classification IADC se base sur la description de l'outil et non sur l'application. Contrairement à celle des outils à molettes, elle n'indique pas directement le type de formation (nature, dureté, abrasivité, etc.) que l'on peut forer avec l'outil.

➤ **Commentaires sur la classification IADC des outils à éléments de coupe fixes:**

Cette classification n'est pas basée sur les caractéristiques des formations mais seulement sur celles des outils :

- Habituellement, les petits éléments de coupes, les petits diamants sont utilisés pour les formations les plus dures pour lesquelles une bonne couverture de diamants est nécessaire.
- Les plus grosses pierres sont généralement mises en place en laissant une plus grande surface exposée à la formation (2/5ème du diamètre de la pierre). Ainsi, elles peuvent couper, labourer les formations tendres qui pourraient bourrer les petites pierres.
- Les profils longs sont conçus pour augmenter le volume de diamants, pour des forages à vitesses de rotation élevées dans les formations abrasives.
- Les profils courts avec une surface de nez importante sont plutôt faits pour des formations compactes et très dures ou des roches intercalées et fracturées.

CHAPITRE

III

CHOIX DES OUTILS DE FORAGE

I. Introduction :

Le but de cette sélection est de choisir l'outil qui donnera le prix de revient du mètre foré le plus faible dans de bonnes conditions techniques.

La grande variété de dureté des formations et la grande variété des types d'outils ont rendu le choix des outils difficile.

Dans les forages d'exploration, les données concernant les formations à forer proviennent des coupes sismiques et des cartes géologiques régionales mais ces données ne permettent pas d'adapter parfaitement l'outil à la roche, par contre, en développement, les formations sont connues ce qui permet d'adapter l'outil à la roche.

Pour une formation donnée, plusieurs types d'outils sont proposés. Une étude comparative effectuée au cours des premiers forages permettra d'effectuer les autres forages dans des conditions excellentes de rapidité et d'économie [5].

II. Choix de l'outil de forage :

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 [2].

II.1. 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.

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 dollars. Puis, la performance de l'outil elle-même va augmenter considérablement la valeur de la décision prise lors du choix de l'outil [5].

II.2. Choix Economique 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].

II.2.1. Prix du mètre foré :

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

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

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.

II.2.2. Avancement commercial :

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

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

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.

II.2.2.1. Application :

Le poids et la vitesse de rotation permettant d'obtenir d'un outil le prix minimal ayant été calculé, ces paramètres devront être appliqués rigoureusement sur le chantier dans la mesure où les conditions rencontrées dans le forage le permettent.

Traçons sur un diagramme la courbe représentant l'avancement cumulé en fonction du temps de rotation (voir figure). 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 B_m représente l'avancement commercial de l'outil. En effet, nous avons [2]:

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

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.

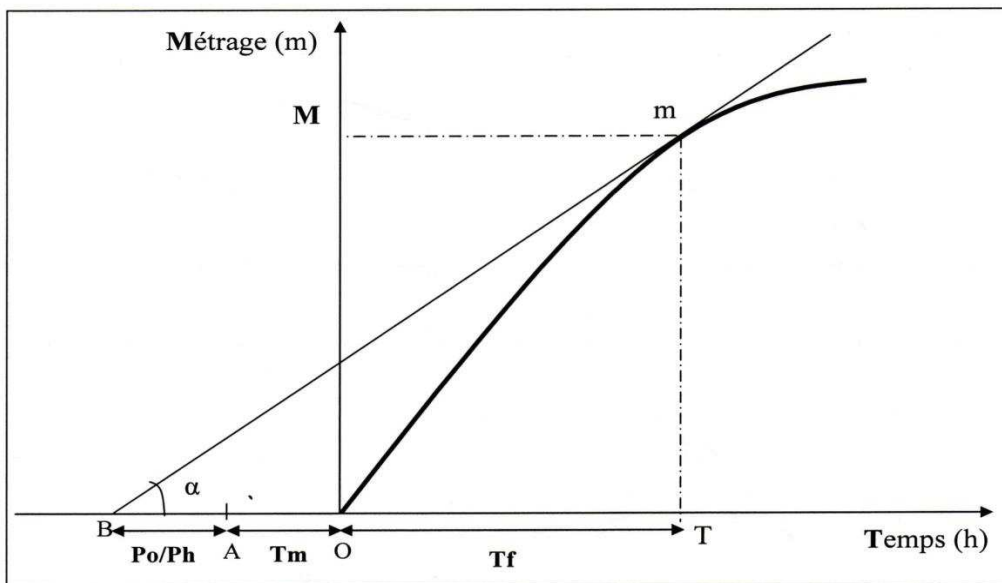


Figure III.1 : La courbe d'avancement commerciale [5].

Par conséquent, le prix du mètre sera minimal ou l'avancement commercial maximal lorsque la pente de la droite B_m sera maximale, c'est-à-dire lorsque cette droite sera tangente à la courbe d'avancement [2].

II.2.2.2. 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 .
- ✓ 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 [2].

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

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

Le Break Even est une méthode qui permet d'évaluer la rentabilité d'un ou plusieurs outils par rapport à un ou plusieurs autres outils dont la performance est connue. Elle est particulièrement intéressante sur site, en cours de forage, où il est possible à chaque instant d'avoir une idée de la rentabilité de l'outil qui fore [2].

II.3.1. Principe :

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

$$P_m = \frac{P_o + P_h(T_m + T_f)}{M} \Leftrightarrow M_B = \frac{P_{oA} + P_h(T_{fB} + T_{mB})}{P_{mA}}$$

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 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 :

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

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

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.

$$a = \frac{P_h}{P_{mA}}$$

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

$$b = \frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_{mA}}$$

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

Point X : $Y = 0$

$$X = -b/a = -\frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_h}$$

Point Y : $X = 0$

$$Y = b = \frac{P_{oB} + P_h T_{mB}}{P_{mA}}$$

➤ **Droite de rentabilité :**

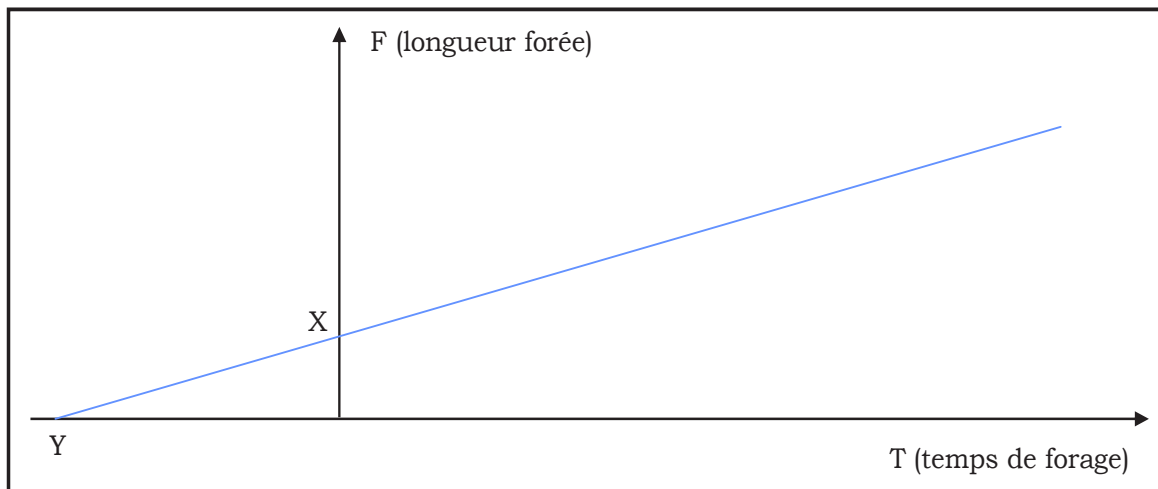


Figure III.2 : Droite de rentabilité avec la méthode de Break Even [2].

➤ **Conclusion :**

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

L'ensemble des points du graph, 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 [2].

II.3.2. 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.

Il est possible et recommandé d'améliorer la méthode du Break Even en joignant sur le graphe une coupe lithologique parallèle à l'axe des ordonnées, ce qui peut parfois éviter une remontée trop précoce de l'outil.

Sans la coupe lithologique cet outil aurait sûrement été remonté vers la sixième heure alors que l'outil franchissait la formation B très dure.

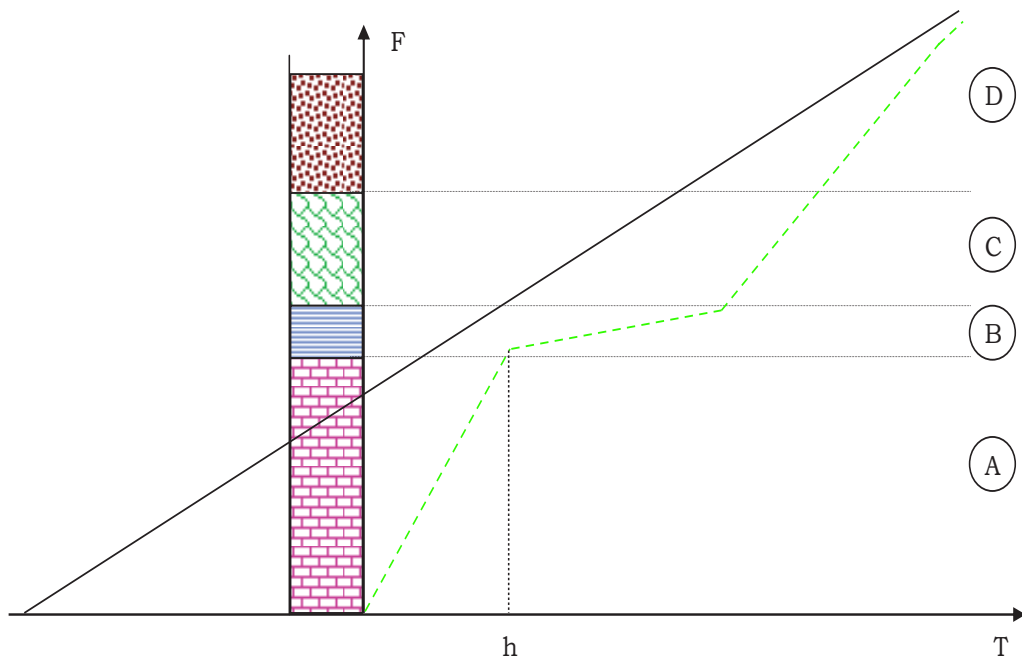


Figure III.3 : Graph Break Even avec une coupe lithologique [2].

Sans la coupe lithologique, cet outil aurait sûrement été remonté vers l'heure h alors que l'outil franchissait la formation B très dure [2].

CHAPITRE

IV

ETUDE DE PERFORMANCE DES OUTILS

I. Introduction :

Le forage des puits dans le champ de BOURARHAT rencontre le problème de la diminution anormale de la vitesse d'avancement dans le réservoir à cause de la dureté élevée de la formation, ce qui engendre des frais additionnels et un prix de mètre foré élevé, ce qui nous donne une grande marge d'étudier la performance des outils de forage dans cette formation [8].

II. Présentation de la phase étudiée :

La phase 8^{1/2} est prévue pour être forée en vertical à travers le Cambro-ordovician en traversant les formations suivantes (MS2 et MS1).

III. Résultats pratiques :

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

- **Le prix du mètre foré :** (le plus faible)
- **La meilleure vitesse d'avancement (ROP)** Qui est lié aux paramètres suivant :
 - La vitesse de rotation (RPM).
 - Le poids sur l'outil (WOB).
 - Le nettoyage de fond de taille etc...

Les résultats pratiques sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : Prix / mètre foré et ROP des outils PDC.

Puits	Outil	Formation traversée	Intervalle forée			ROP [m/hr]	Temps [Hr]		Coût [US \$]			CPM [US\$/m]
			de	à	métrage		Forage	Manœuvre	Forage	Manœuvre	Outil	
BRTS2	MSI713BPX	Silurien Argileux	2198	2229	31	6,75	4,59	21	4245,75	19425,00	20988,61	1526,52
		IV-3	2229	2233	4	0,42	9,48		8769,00			
BRTS3	MSI713BPX	Silurien Argileux	2193	2210	17	2,91	5,84	25	5402,00	23125,00	20988,61	2628,22
		IV-3	2210	2216	6	0,51	11,82		10933,50			
BRTS4	DSF811M	Silurien Argileux	2180	2246	66	10,46	6,31	20	5836,75	18500,00	22296,70	757,41
		IV-3	2246	2261	15	0,94	15,91		14716,75			
OEB2	MM84	Silurien Argileux	2133	2169	36	2,35	15,35	17,5	14198,75	16187,50	35056,15	1860,90
		IV-3	2169	2177	8	0,45	17,77		16437,25			
OEB3	MSI713BPX	Silurien Argileux	2140	2148	8	3,98	2,01	21,5	1859,25	19887,50	20988,61	5341,92
			2166	2172	6	3,06	1,96	20	1813,00	18500,00	20988,61	2212,54
		IV-3	2172	2192	20	1,14	17,54		16224,50			

Tableau IV.2: Prix / mètre foré et ROP des outils Imprégnés en mode rotary.

Puits	Outil	Formation traversée	Intervalle forée			ROP [m/hr]	Temps [Hr]		Coût [US \$]			CPM [US\$/m]
			de	à	m		Forage	Manceuvre	Forage	Manceuvre	Outil	
BRTS2	DD5560	IV-3	2 242	2 315	73	1,28	57,24	22,00	52 947,00	20350	25001,42	1346,55
		IV-2	2 324	2 340	16	1,49	10,75	23,00	9 943,75	21275	25001,42	3145,73
		III-3	2 340	2 359	19	0,98	30,13		27 870,25			
		III-2	2 359	2 360	1	0,72	31,52		29 156,00			
BRTS3	DD5560	IV-3	2 225	2 315	90	1,46	61,55	20,00	56 934	18 500,00	25001,42	1077,95
		IV-2	2 315	2 320	5	2,35	2,13		1 970			
			2 329	2 348	19	1,83	10,41	21,50	9 629	19 887,50	25001,42	2140,24
		III-3	2 348	2 366	18	0,52	34,91		32 292			
		III-2	2 366	2 371	5	1,50	3,33		3 080			
BRTS4	DD5560	IV-3	2 261	2 290	29	0,95	30,61	22,50	28 314	20 812,50	25001,42	1019,41
		IV-2	2 290	2 396	106	1,54	68,64		63 492			
OEB2	HH356G8	IV-3	2 186	2 235	49	1,26	38,88	16,50	35 964	15 262,50	19179,41	1362,10
		IV-2	2 235	2 239	4	2,07	1,93		1 785			
OEB3	K503BPX	IV-3	2233	2258	25	1,3	19,25	21	17806,25	19425	29944	2274,83
		IV-2	2258	2272	14	0,6	23,29		21543,25			
			2290	2322	32	0,66	48,6	18,5	44955	17112,5	29944	2875,36

Tableau IV.3: Prix / mètre foré et ROP des outils Imprégnés en utilisant la turbine

Puits	Outil	Formation traversée	Intervalle forée			ROP [m/hr]	Temps [Hr]			Coût [US \$]				CPM [US\$/m]
			de	à	métrage		Forage	rotation	Manœuvre	Forage	turbine	Manœuvre	Outil	
BRTS2	DD5560	III-3	2 378	2 415	37	1,43	25,88	105,50	22,00	23 939,00	28590,5	20350,0	25001,4	970,5
		II	2 415	2 540	125	1,76	65,05			60 171,25				
			2 540	2 543	3	2,27	2,25			2 081,25				
BRTS3	K503BPX	III-2	2 380	2 400	20	1,29	16	180,75	23,00	14 374,50	48983,3	21275,0	29944,0	1025,1
		II	2 400	2 605	205	1,72	119			110 528,25				
		Socle	2 605	2 625	20	0,71	28			26 038,75				
BRTS4	HH356G8	IV-2	2 396	2 501	105	1,45	72	146	37,00	66 822,00	39566,0	34225,0	19179,4	1263,1
		II	2 501	2 564	63	1,11	57			52 401,25				
OEB2	HH356G8	IV-2	2 248	2 272	24	3,68	7	17,50	16,25	6 031,00	4742,5	15031,3	19179,4	898,2
		III-3	2272	2298	26	4,09	6,35			5 873,75				
		III-2	2298	2307	9	3,9	2,31			2 136,75				
			2316	2538	222	2,83	78,49			85,5				
	HHS376	2538	2600	62	3,01	20,59	23,75	19,75	19 045,75	6436,3	18268,8	29601,0	1183,1	
OEB3	HHS376	IV-2	2322	2390	68	2,2	30,92	68,5	23	28601	18563,5	21275,0	29601,0	1184,5
		II	2390	2423	33	1,41	23,35			21598,75				
	HH356G8	2423	2498	75	1,39	53,9	61,75	26,25	49857,5	16734,3	24281,3	19179,4	1467,4	
	IQ616D	2498	2670	172	3,06	56,13	69	23,5	51920,25	18699,0	21737,5	30636,0	715,1	

III.1.Comparaison entre les outils PDC dans le Cambro-ordovician (Unité IV-3) :

Tableau IV.4 : ROP et Pm des outils PDC.

	Outil	métrage	ROP (m/h)	P _m (\$/m)
PDC	MSI713BPX	4	0,42	1526,52
		6	0,51	2628,22
		20	1,14	2212,54
	MSI713BPX	10	0,69	2122,43
	DSF811M	15	0,94	757,41
	MM84	8	0,45	1860,90

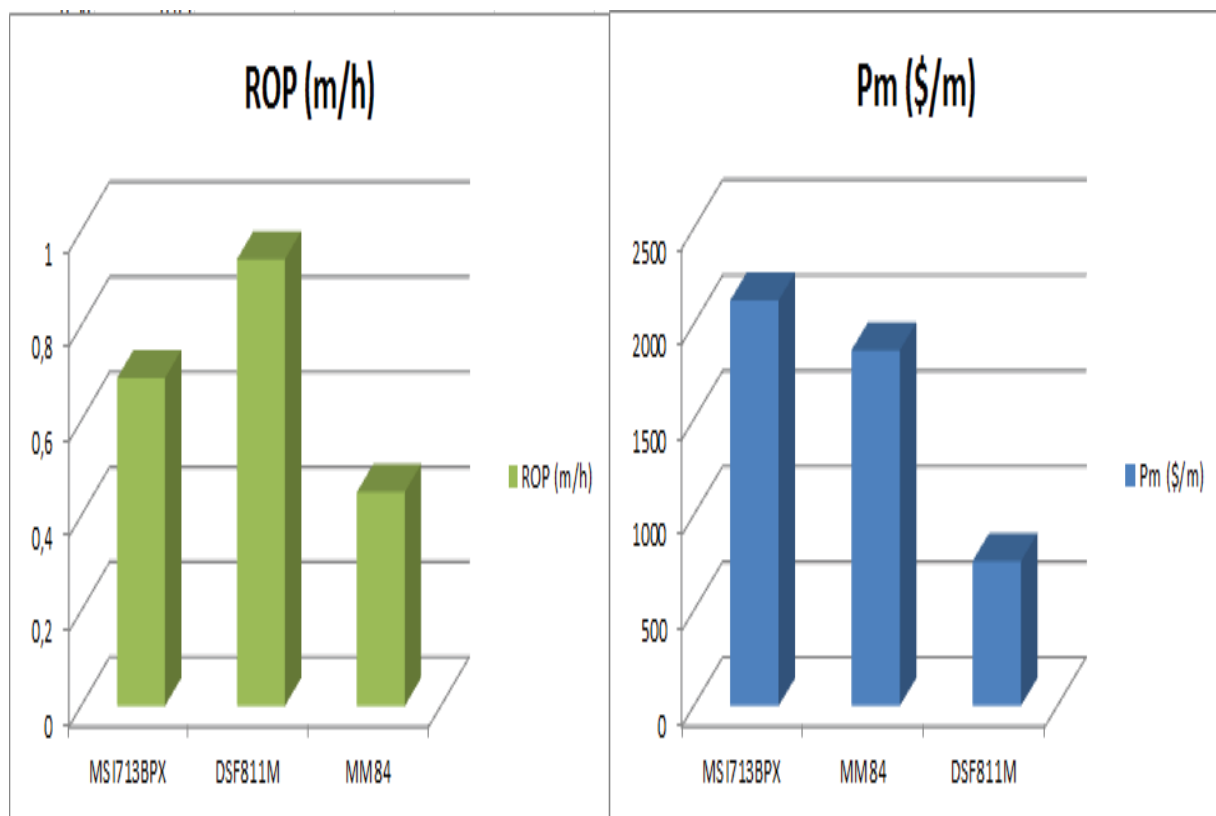


Figure IV.1: Graphs des ROP et Pm des outils PDC.

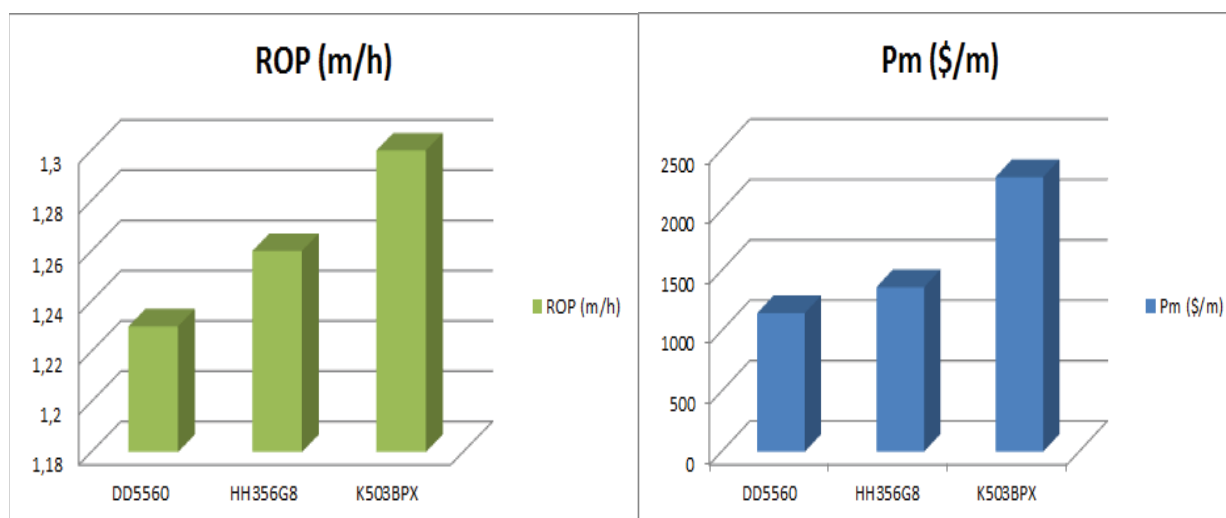
Analyse des résultats :

D'après les résultats des calcul de prix de mètres forés pour différents outils PDC présentés dans le tableau IV-1 utilisés dans plusieurs puits déjà forés dans la phase 8^{1/2"} (Ordovician Unité IV-3) on a trouvé que :

- Le prix de mètres forés varie entre 757,41 et 2122.43 \$/m.
- L'outil le moins rentable est MSI713BPX du prix du métrage foré 2122.43 \$/m avec une vitesse de pénétration (ROP = 0,69 m/h) représente un prix de mètres forés maximal.
- L'outil le plus rentable est DSF811M qui donne un prix de mètre foré 757.41 \$/m et vitesse de pénétration (ROP = 0.94 m/h).

III.2.Comparaison entre les outils IMP dans le Cambro-ordovician (unité IV-3) :**Tableau IV.5:** ROP et Pm des outils IMP.

	Outil	métrage	ROP (m/h)	P _m (\$/m)
IMP	DD5560	73	1,28	1346,55
		90	1,46	1077,95
		29	0,95	1019,41
	DD5560	64	1,23	1147,97
	HH356G8	49	1,26	1362,10
	K503BPX	25	1,3	2274,83

**Figure IV.2:** Graphs des ROP et Pm des outils Imprégnés.

Analyse des résultats :

D'après les résultats des calcul de prix de mètres forés pour différents outils imprégnés présentés dans le tableau IV-2 utilisés dans plusieurs puits déjà forés dans la phase 8^{1/2"} (ordovicien unité IV-3) on a trouvé que :

- ✓ Le prix de mètres forés varie entre 1147.97 et 2274.83 \$/m.
- ✓ L'outil le moins rentable est K503BPX du prix du métrage foré 2274.83 \$/m avec une vitesse de pénétration (ROP = 1.3 m/h) représente un prix de mètres forés maximal.
- ✓ L'outil le plus rentable est DD5560 qui donne un prix de mètre foré 1147.97 \$/m et vitesse de pénétration (ROP = 1.23 m/h).

III.3.Comparaison entre les outils IMP et PDC dans le Cambro-ordovician (unité IV-3) :

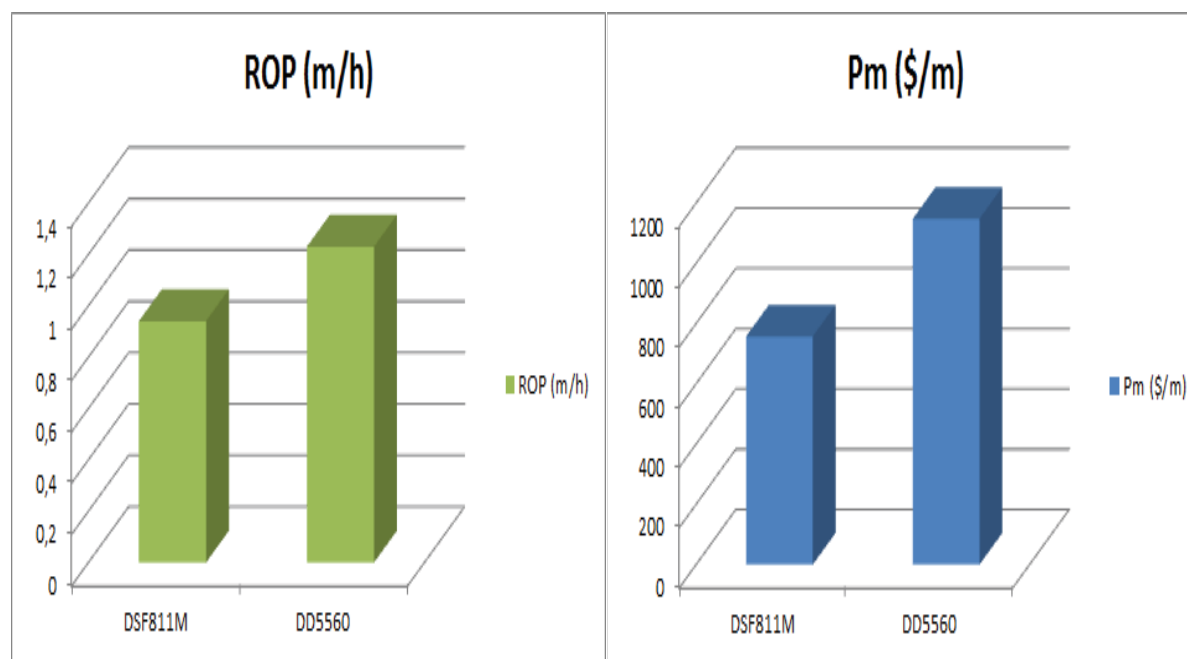


Figure IV.3: Graphs des ROP et Pm des outils DSF811M et DD5560.

Analyse des résultats :

D'après le graph précédent on remarque que :

- ✓ Le prix de mètre foré de l'outil DD5560 est plus grand que de l'outil DSF811M bien que la vitesse de pénétration de l'outil imprégné est mieux que de l'outil PDC à cause on a foré 66m dans le silurien argileux avec une vitesse de pénétration de 10.46 m/h par l'outil PDC c'est pour cette raison le prix par mètre foré est faible.

III.4.Comparaison entre les outils imprégnés dans (unités IV-2, III-3 et III-2) en mode rotary :

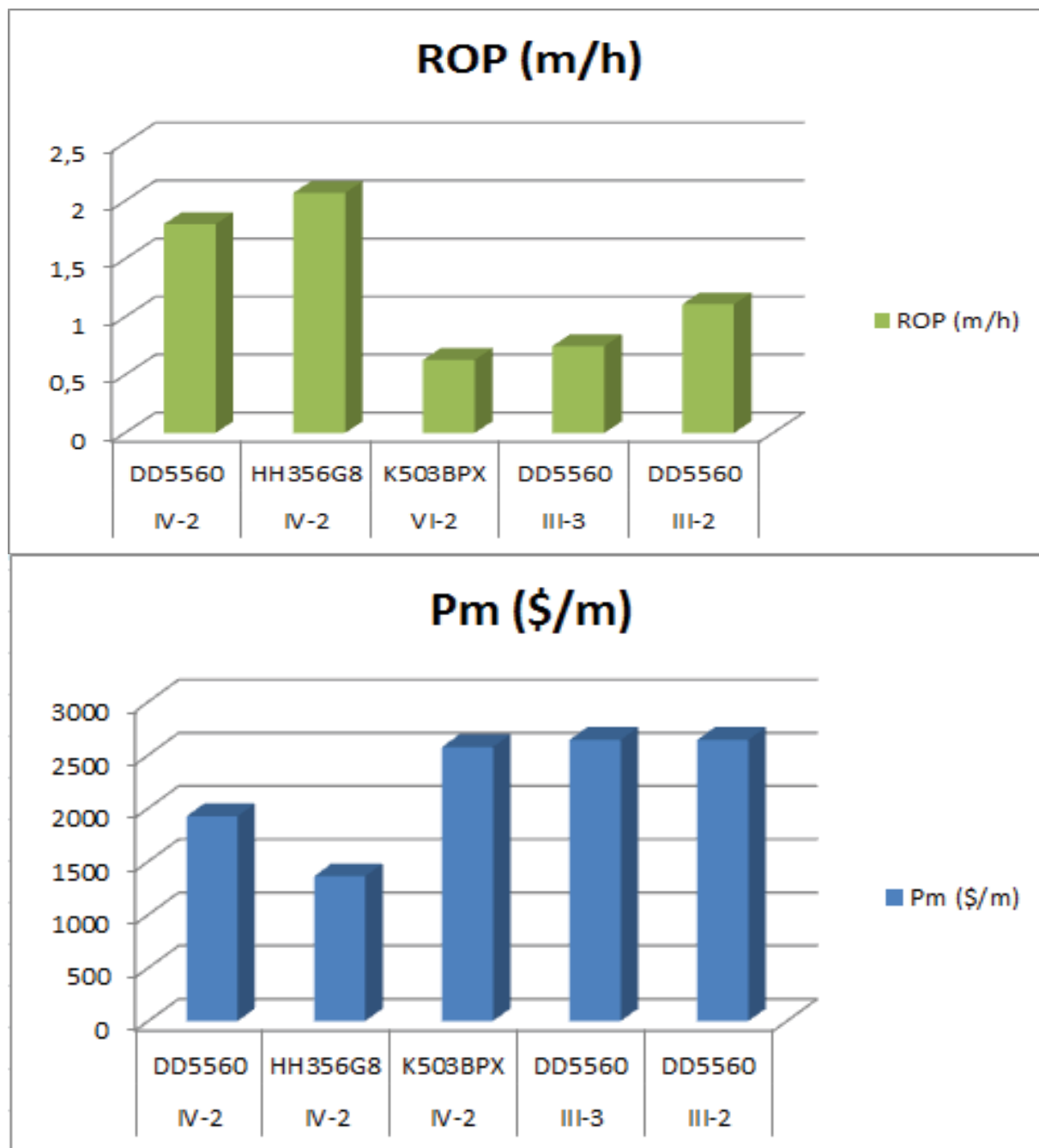


Figure IV.4: Graphs des ROP et Pm des outils imprégnés en mode rotary.

Analyse des résultats :

D'après les résultats des calcul de prix de mètres forés pour différents outils imprégnés présentés dans le tableau IV-2 utilisés dans plusieurs puits déjà forés dans la phase 8^{1/2"} (ordovicien unité IV-3) on a trouvé que :

- ✓ Le prix de mètres forés varie entre 1362.10 et 2643 \$/m.
- ✓ L’outil le moins rentable est DD5560, le prix de mètre foré est de 2643 \$/m qui représente un prix de mètres forés maximal. la vitesse de pénétration dans les différentes couches du réservoir varie entre 0.75 et 1.80 m/h.
- ✓ L’outil le plus rentable est HH356G8 qui donne un prix de mètre foré 1362.10 \$/m avec une vitesse de pénétration (ROP = 2.07 m/h).

III.5.Comparaison entre les outils imprégnés utilisés avec turbine dans les unités IV-2, III3 et III-2 du réservoir :

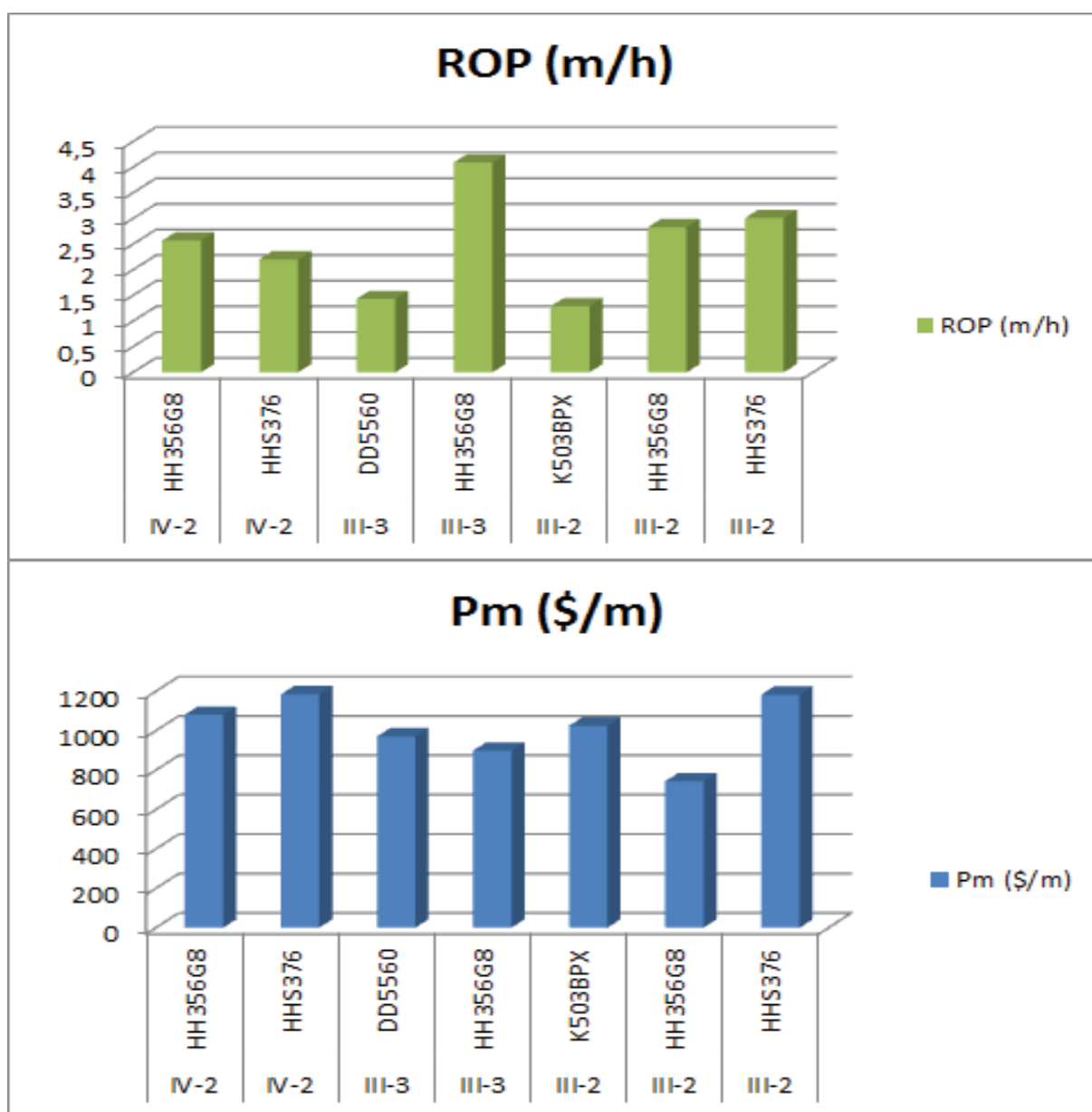


Figure IV.5: Graphs des ROP et Pm des outils imprégnés utilisés avec turbine.

Analyse des résultats :

D'après les résultats des calculs de prix de mètres forés pour différents outils imprégnés présentés dans le tableau IV-3 utilisés dans plusieurs puits déjà forés dans la phase 8^{1/2} (ordovicien unités IV-2, III-3, III-2) on a trouvé que :

- ✓ Le prix de mètres forés varie entre 742.91 et 1184.55 \$/m.
- ✓ L'outil le moins rentable est HHS376, le prix de mètre foré est de 1184.55 \$/m qui représente un prix de mètres forés maximal. La vitesse de pénétration dans les différentes couches du réservoir varie entre 2.2 et 3.01 m/h.
- ✓ L'outil le plus rentable est HH356G8 qui donne un prix de mètre foré 1080.64 \$/m avec un ROP = 2.57m/h dans la couche du réservoir IV-2, 898.21\$/m avec un ROP = 4.09 m/h dans la couche du réservoir III-3, 742.91 \$/m avec un ROP = 2.83 m/h dans la couche du réservoir III-2.

III.6. Comparaison entre les outils de forage imprégnés utilisés avec turbine pour forer le Cambrian unité II du réservoir :

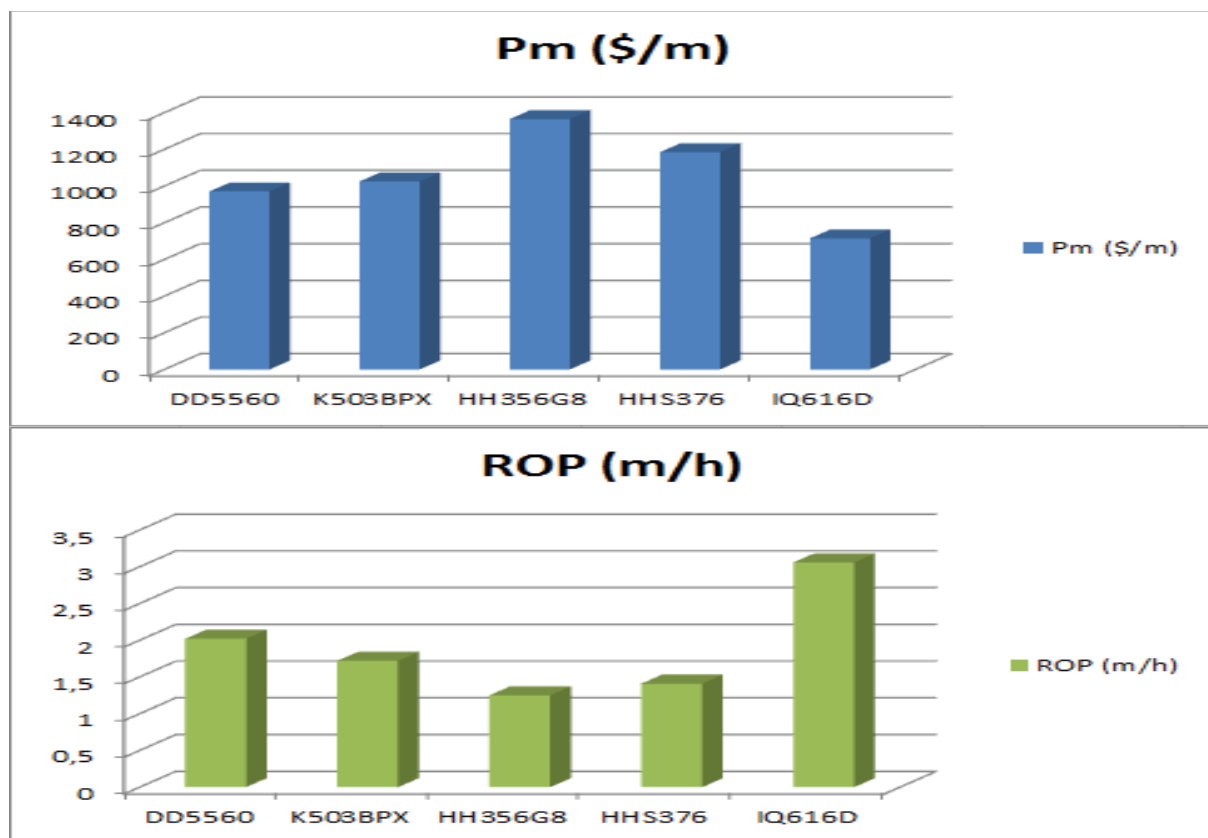


Figure IV.6: Graphs des ROP et Pm des outils IMP utilisé avec turbine.

Analyse des résultats :

D’après les résultats des calcul de prix de mètres forés pour différents outils imprégnés présentés dans le tableau IV-3 utilisés dans plusieurs puits déjà forés dans la phase 8^{1/2} (Cambrian unité II) on a trouvé que :

- ✓ Le prix de mètres forés varie entre 715.07 et 1365.22 \$/m.
- ✓ L’outil le moins rentable est HH365G8, le prix de mètre foré est de 1365.22 \$/m qui représente un prix de mètres forés maximal. La vitesse de pénétration dans cette couche du réservoir est de 1.25 m/h qui est la vitesse minimal en comparant avec les autres outils.
- ✓ L’outil le plus rentable est IQ616D qui donne un prix de mètre foré 715.07 \$/m avec une vitesse de pénétration (ROP = 3.06 m/h).

III.7 Comparaison entre les deux modes de forage rotary vs turbine :

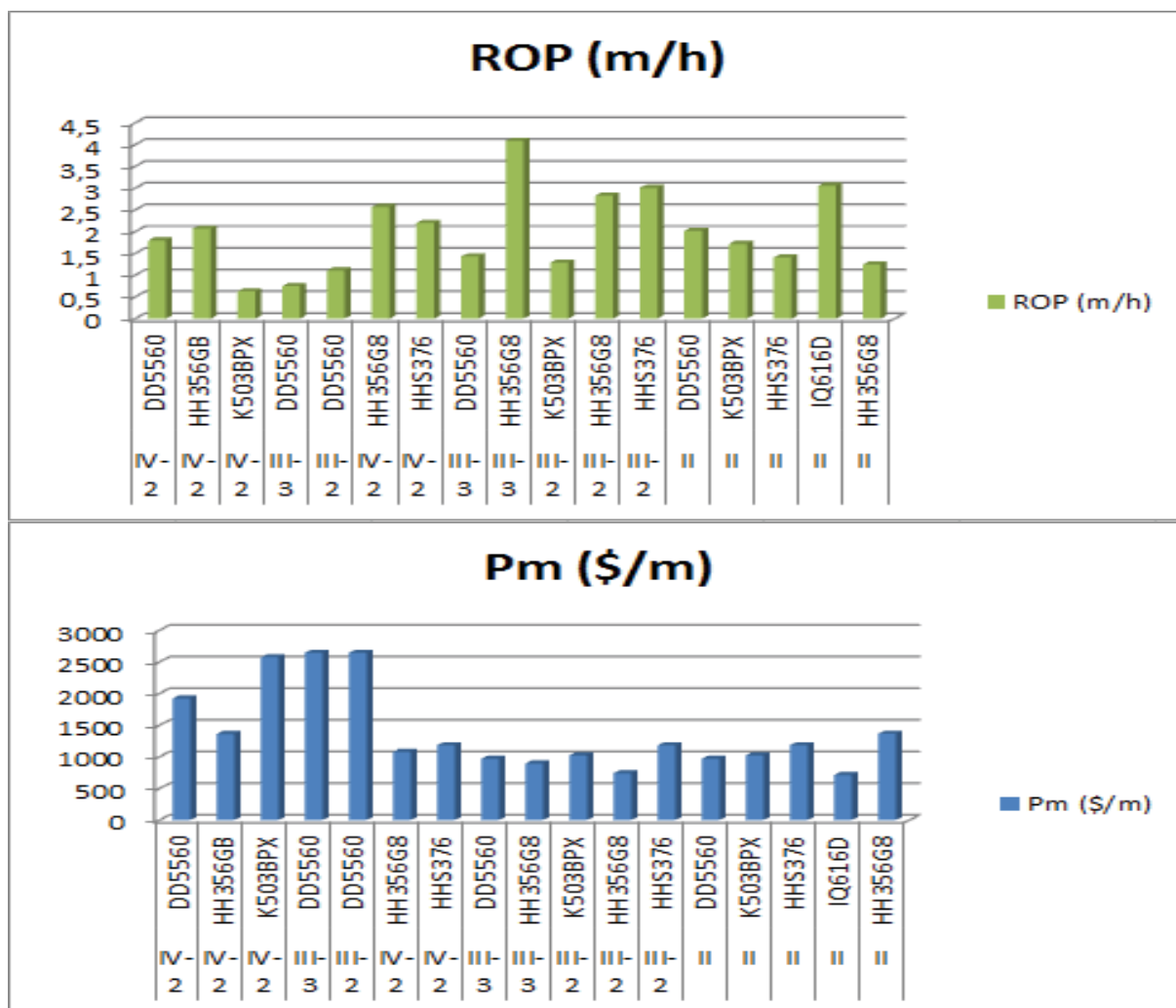


Figure IV.7: Graphs des ROP et Pm des outils en différent mode de forage.

Analyse des résultats :

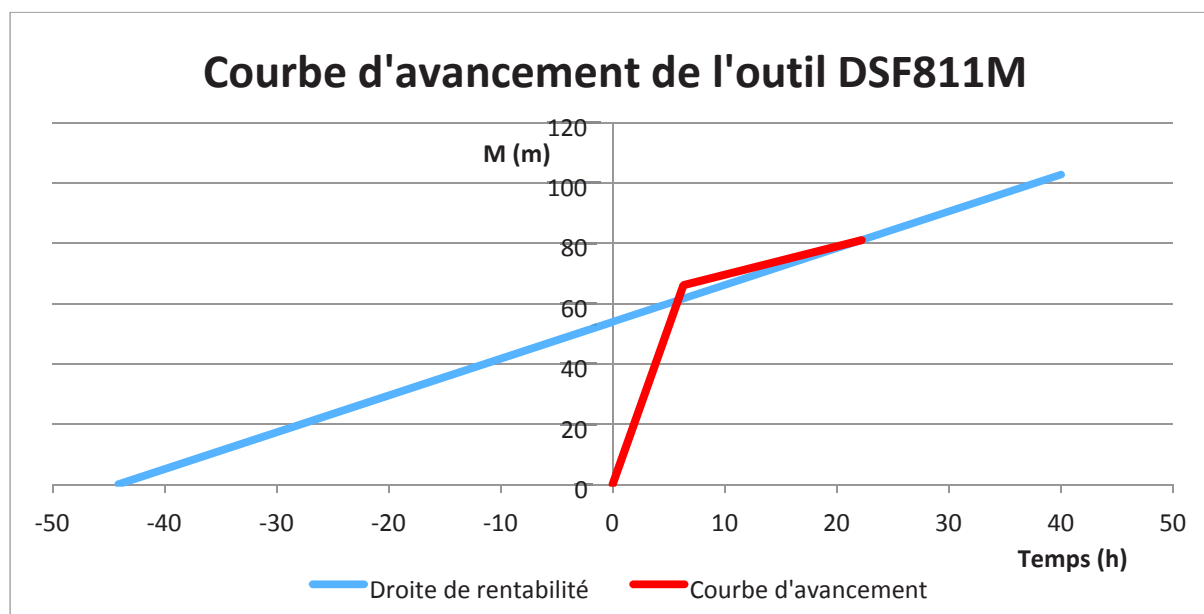
D'après le graph précédent on remarque que l'utilisation de la turbine avec l'outil HH356G8 donne un bon résultat de point de vue prix de mètres forés minimal et une vitesse de pénétration maximale.

IV. Les courbes d'avancement des outils :**IV.1. La Courbe d'avancement de l'outil DSF811M :****Tableau IV.6:** Données pour l'outil DSF811M.

	M(m)	ROP (m/h)	Tf (h)	Tm (h)	Ph (\$/h)	Po (\$)	Pm (\$/m)
Silurien argileux	66	10.46	6.31	20	925	22296.7	757.41
IV-3	15	0.94	15.91				

L'équation de la droite de rentabilité de cet outil s'écrit :

$$M=1,22T_f+53.86$$

**Figure IV.8:** Graph courbe d'avancement de l'outil DSF811M.

L'outil atteint le seuil de rentabilité en moins de 6 heures de forage à cause de la vitesse de pénétration élevée ROP= 10.46m/h dans le silurien argileux, après forage de 64 m dans le silurien on remarque le chute d'avancement dans l'ordovician IV-3.

IV.2.La Courbe d'avancement de l'outil DD5560 :

Tableau IV.7: Données pour l'outil DD5560.

	M(m)	ROP (m/h)	Tf (h)	Tm (h)	Ph (\$/h)	Po (\$)	Pm (\$/m)
IV-3	64	1.23	52	22.5	925	25001.42	1147.97
IV-2	106	1.54	68.64				

L'équation de la droite de rentabilité de cet outil s'écrit :

$$M=0,8T_r+39.5$$

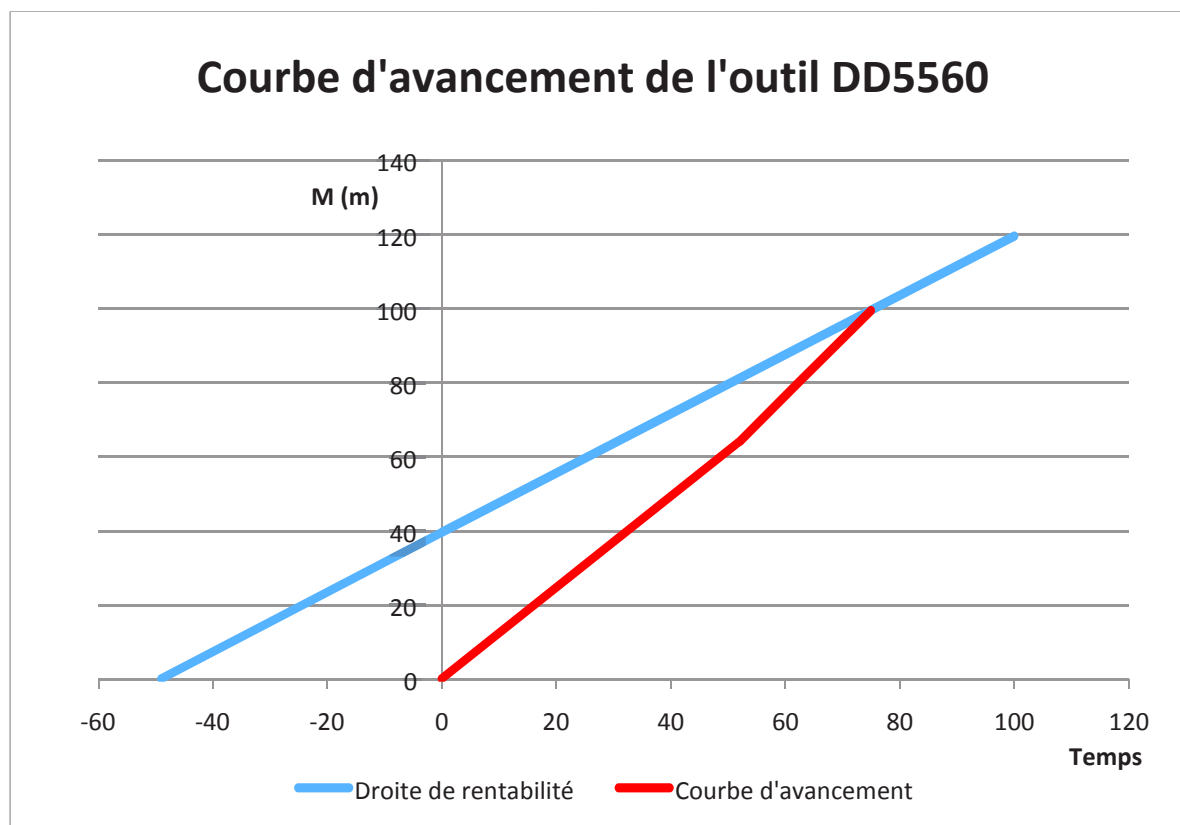


Figure IV.9: Graph courbe d'avancement de l'outil DD5560.

L'outil atteint le seuil de rentabilité après 75 heures de forage dans l'ordovician IV-3 et IV-2.

D'après les deux courbes d'avancement des outils DSF811M et DD5560 et les prix de mètre foré de chaque outil on constate que l'outil DD5560 est mieux que l'outil PDC pour forer l'unité IV-3 de réservoir cambro-ordovician.

IV.3.Comparaison de la rentabilité l'outil HH356G8 par rapport à l'outil DD5560:

- ✓ L'outil HH356G8 descendue dans le puits OEB-2.
- ✓ L'outil DD5560 descendue dans le puits BRTS-4.

Les données sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.8: Données pour l'outil HH356G8.

	M(m)	ROP (m/h)	Tf (h)	Tm (h)	Ph (\$/h)	Po (\$)	Pm (\$/m)
IV-3	49	1.26	38.88	16.5	925	19179.41	1362.1
IV-2	4	2.07	1.93				

L'équation de la droite de rentabilité de cet outil s'écrit :

$$M=0,9Tf+33,78$$

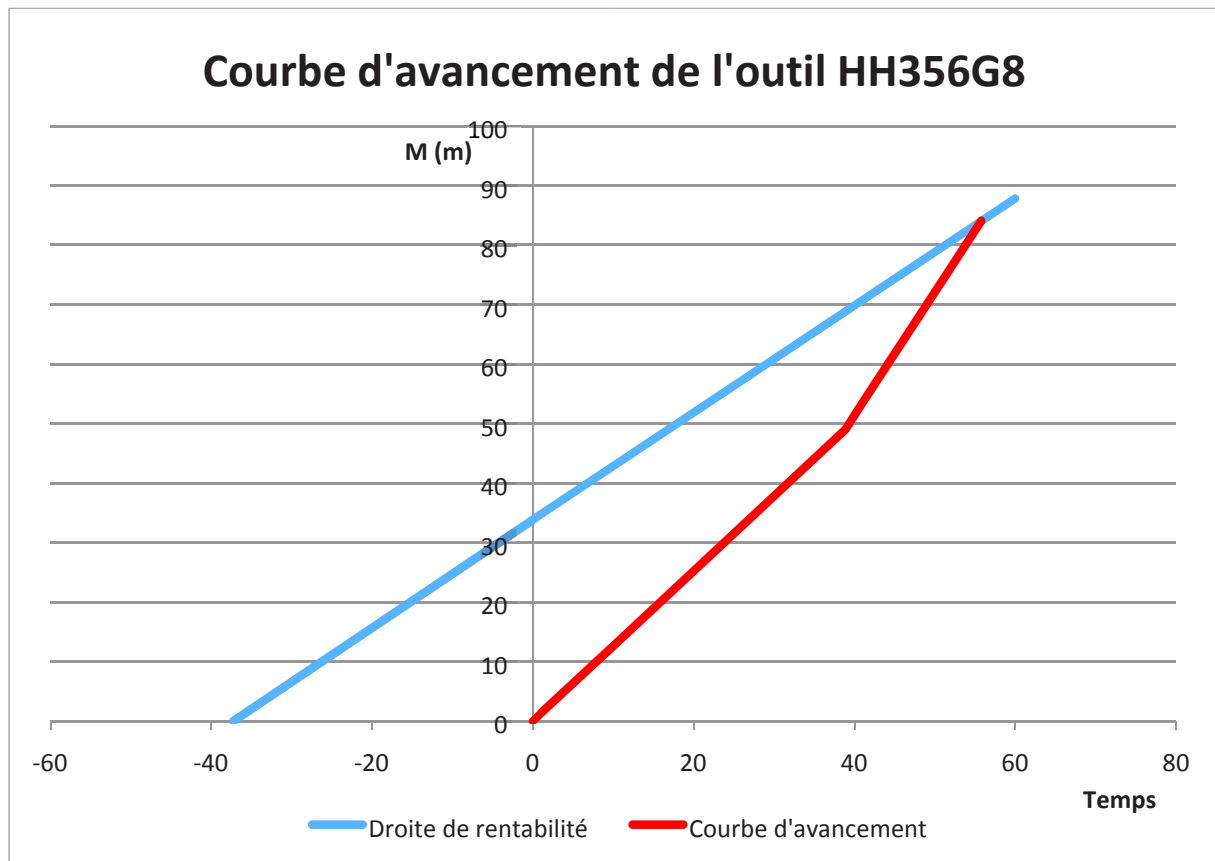


Figure IV.10: Courbe d'avancement de l'outil HH356G8.

D'après le graph l'outil atteint le seuil de rentabilité après 55.81 heures de forage et effectué un métrage de 84 m.

CONCLUSION



CONCLUSION

D'après nos analyses, on a trouvé que les performances du même type d'outil se diffèrent d'un puits à un autre dans la même région. Ces différentes performances sont dues au prix du mètre foré qui est influencé par la vitesse d'avancement (plus la vitesse d'avancement est grande, plus le prix du mètre foré est faible).

L'étude globale sur les outils de forage utilisés dans les différents puits forés dans le champs de Bourarhat phase 8^{1/2} nous permet de tirer les points de conclusion suivants :

- Une grande variété d'outils (PDC, Imprégnés).
- Les PDC ne sont pas très performants vu la dureté du réservoir cambro-ordovicien.
- Les ROP des différents outils de forage varient de puits à l'autre.

Les résultats pratiques nous montrent que :

- ✓ Les outils imprégnés associés à une turbine sont les plus rentables dans les formations de cambro-ordovicien du point de vue ROP et le prix de mètre foré.
- ✓ L'Outil imprégné HH356G8 est le plus rentable avec la turbine.

Cette étude nous a également permis d'enrichir nos connaissances sur les outils de forage à travers une documentation plus large.

Le prix de mètre foré est un critère qui peut être utilisé pour déterminer à quel moment l'outil peut être remonté du point de vue économique et aussi pour la comparaison des performances des différents outils.

RECOMMANDATION



RECOMMANDATION

- Avec les outils diamant, il est très important de maintenir la température des taillants la plus basse possible pour éviter leur détérioration. Le débit de forage doit être suffisant pour refroidir correctement les taillants.
- A la reprise du fond avec un nouvel outil, il est important que cet outil "fasse son empreinte", avant d'appliquer le poids WOB et la vitesse de rotation RPM prévus (Si le profil de l'outil est différent du précédent, seule une petite surface du nouvel outil sera en contact avec le front de taille et si l'on applique trop rapidement le poids prévu, la pression aux points de contact peut être très élevée et endommager les structures de coupe.)
- Pour avoir une meilleure vitesse d'avancement, il est recommandé d'effectuer des tests de forabilité (Drill Off Test) qui détermine le couple poids-vitesse de rotation optimum pour chaque formation.
- L'usure de l'outil est un moyen dont dispose le personnel de chantier pour choisir l'outil et les paramètres de forage les mieux adaptés à la formation à forer. D'où l'intérêt d'avoir une description la plus précise et la plus objective possible de l'usure spécifique aux outils et des conditions dans lesquels ils ont été descendu (moteur, turbine, reaming éventuel, vibrations...); ceci permettra de déceler de façon indiscutable les points faibles et les causes de défaillances ainsi que les problèmes de forage indépendants de l'outil (dull grading sheets).
- Analyse détaillée du "Bit Record" (feuille d'outils) à la recherche d'élément d'information pouvant donner une idée sur la forabilité (durée de vie des outils, degré et type d'usures constatées, opérations anormales et instrumentations...) afin d'optimiser les plages des paramètres de forage (WOB, RPM et LPM).
- Suite au confinement qui pénalise l'avancement de l'outil, on recommande de forer cette phase en "Underbalance Drilling" afin d'augmenter la ROP et protéger le réservoir du phénomène de colmatage.

BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- [1]. A.SLIMANI et M. DADOU- Module F1- Formation JDF.
 - Division de forage, Edition mai 2006.
- [2]. A.SLIMANI -Module F3 -Formation JDF.
 - Division de forage, Edition 2001.
- [3]. Bit records pour les puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [4]. Document Self-Learning Package- DRILL BIT.
 - December 2001.
- [5]. F.GRONDIN-Les outils de forage.
 - Sonatrach, Edition Janvier 2004.
- [6]. Jean –Paul NGUYEN -Technique d’exploration pétrolière (Le forage).
 - Edition technip 27 Rue Ginoux 75737 Paris cedex 15, année 1993.
- [7]. Master log pour les puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [8]. Programmes de forage des puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [9]. Rapports fin des puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [10]. Rapports d’implantation des puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [11]. Rapports journalier pour les puits (BRTS2, BRTS3, BRTS4, OEB2, OEB3).
- [12]. Web site www.drilling formulas.com

ملخص

ان الغاية من عملية التنقيب هو استخراج اكبر ثروة ممكنة سواء كانت بترول غاز او ماء في احسن الظروف مع مراعات عامل السلامة, هذه الدراسات من اجل تخفيض ميزانية التنقيب و ذلك من خلال تحديد نوع أداة الحفر في كل مرحلة في العملية. في هذا الملحق سنحاول دراسة كفاءة أداة الحفر في عملية التنقيب على مستوى الخزان الكمبر و- اردوفيسي حيث سنقارن بين كل أداة مستعملة في هذا الاخير, وهذه المقارنة تعتمد بالضرورة على سرعة الاختراق و كذلك على سعر المتوسط لكل متر من عملية التنقيب. في الاخير و بعد دراستنا الشاملة لجميع ادوات الحفر المستعملة, يمكننا القول اننا توصلنا لايجاد الاداة الاكثر فعالة على مستوى الخزان الكمبر و- اردوفيسي.

الكلمات المفتاحية : التنقيب, سرعة الاختراق , الخزان الكمبر و- اردوفيسي , سعر المتوسط لكل متر, أداة الحفر.

SUMMARY

The goal of oil drilling is to reach the target in the best conditions possible, the highest possible value for money while respecting the aspects safe.

This study is a contribution to minimize the price of drilled meters, in particular by the judicious of bit selection in each layer of reservoir.

In this context, we will try to study the performance of drilling bits in the Cambro-ordovician reservoir based essentially on the comparison of ROP and the price of meter drilled between the drilling bits.

Key words : Drilling, rate of penetration, cambro-ordovician reservoir, cost per meter drilled, drilling bits.

RESUME

L'objectif de forage pétrolier est d'atteindre la cible dans les meilleures conditions possibles, rapport qualité prix le plus élevé possible toute en respectant les aspects sécuritaires.

La présente étude est une contribution pour minimiser le prix de mètre foré, notamment par le choix judicieux des outils de forage performants dans chaque couche de réservoir.

Dans ce contexte, on a étudié les performances des outils de Forage dans le réservoir cambro-ordovician on base essentiellement sur la comparaison de ROP et le prix de mètre foré entre les outils de forage.

Mots Clés : Forage, la vitesse de pénétration, réservoir cambro-ordovician, prix par mètre foré, les outils de forage.

