

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU



Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Thème

**ANALYSE DE PROCESSUS DE FABRICATION
ET DE FONCTIONNEMENT D'UN OUTIL DE
FORAGE (*Steel Body, Matrix Body*)**

Proposé par :

BOURAOU I Ali.

Encadré par : ,

MOHELLEBI Mouloud

Réalisé par : Mr. MOUSSAMRI Hanafi

Mr. CHETOUANI Fodil.

Promotion 2017-2018

Remerciements

En premier lieu, nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné la santé, le courage et la volonté pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur M.MOHELLEBI pour son aide, sa disponibilité et ses conseils pour l'aboutissement de ce travail, qu'il trouve ici notre profonde gratitude toute notre reconnaissance et notre respect.

Nous tenons à remercier aussi notre encadreur au sein du département fabrication au niveau de l'Enterprise ENSP, Mr A.BOURAOUI et son collègue FAYCEL pour leurs aides et leurs soutiens durant le stage, ainsi que le personnel du département fabrication de ALDIM surtout Melle N.BOUNABI.

En remerciant aussi tout personnel du département Génie mécanique, administrateurs, fonctionnaires, professeurs et surtout les enseignants de l'option FMP .en premier le responsable de la formation Mr BLAID.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail en ayant accepté la lourde tâche de l'examiner

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma chère famille, mes neveux et nièces.

A mes beaux frères sans oublier Arezki allah irahmou.

A mes cousins et tout mon village.

A Mr Hacene Amroune chef de division production SONATRACH

A tous mes collègues de l'ENSP : Nabil, Mehdi, Amar, Marzouk,

Larbi, M'nouer et Kfirallah.

A toute la famille Touam (Khouali)

A mes amis : Dr TOUAM, Cherif, Yazid, Athmane, Ahcene, Moula, idir

et fatah

A mon binôme Fodil et sa famille.

A tout le personnel ENSP opérant a El Merk groupement

SONATRACH ANADARKO.

Hanafi.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*A ma chère mère ainsi que mes chères tantes SAFIA,
NADIA, GHANIA, FARIDA et leurs familles ainsi que leurs enfants
chacun par son nom.*

*A ma deuxième famille la section FMP promotion 2018, mes frères
MOULOUD, SOUHIL, LYÉS,
FLOUSSA, KARIM, KAMAL, HAKIM, YOUNES, MOH TAHAAR, et
mes sœurs ANISSA, DJIDJI, DALILA.*

*A ma chère copine I. TINIHANANE qui m'a toujours soutenu, je lui
exprime ma profonde gratitude, et je le dédie à sa famille.*

A mon binôme M. HANAFI et toute sa famille.

*Aussi, je le dédie à tous mes amis (es), avec qui j'ai passé d'inoubliables
moments, et à tous ce qui ont participé de loin ou de près à ce travail.*

FODIL

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I Présentation de l'entreprise

I.1 Domaine d'activité de l'ENSP :.....	2
I.2-Organigramme du Groupe ENSP :	3
I.3.Les filiales & Participations.....	4
I.3.1 HESP :.....	4
I.3.2 BJSP :.....	4
I.3.3 BASP:	4
I.3.4 MESP :	5
I.3.5 WESP :.....	5
I.4.Les Directions opérationnelles ENSP.....	5
I.4.1 Direction SNUBBING	5
I.4.2 Direction Protection Environnement (DPE)	6
I.4.3 Direction Wire line & Well testing.....	6
I.4. 4 Direction Mudlogging :.....	7
I.4.5.Direction Well Services :	8
I.4.6 Direction Fabrication ALDIM :	8

Chapitre II Généralités sur le forage pétrolier

II.1-Classification :.....	12
II.2-Fonctions d'un appareil de forage :.....	12
II.2.1-Fonction rotation :	13
II.2.2-Fonction levage :	13
II.2.2.1 Le mouflage :.....	14
II.2.2.2 Le top drive.....	14
II.2.2.3 Le treuil [Drawworks] :	15
II.2.3-Fonction pompage :	16
II.3-Éléments principaux d'un équipement de fond.....	17
II.3.1 Le train de tiges :	17

Sommaire

II.3.1 1 Les tiges de forage :.....	18
II.3.2 Assemblage de fond BHA (Bottom Hole Assembly).....	18
II.3.2.1 Les masses-tiges Les masses-tiges :.....	18
II.3.2.2 Les stabilisateurs :	19
II.3.2.3 Les trépan :.....	19
II.4.1 Le poids sur l’outil WOB (Weight on bit) :.....	21
II.4.2 La vitesse de rotation :.....	21
II.4.3 Le couple exercé sur l’outil Ttob (torque on bit) :.....	22
II.5-Programme de forage et tubage.....	22
II.5.1 Programme de forage.....	22
II.5.2. Phases de tubage	24
II.5.2.1 Tube guide :	24
II.5.2.2 Colonne de surface :	24
II.5.2.3 Colonne intermédiaire :	24
II.5.2.4 Colonne de production :	24
II.5.2.6 Colonne perdue (liner) :.....	25
II.5.3. Phases de cimentation:.....	25
II.5.3.1. Buts de l’opération de cimentation.....	25
II.5.4 Régime de forage et programme d’outil.....	25

Chapitre III Les outils de forage

III.1 Les différents types des outils de forage :.....	30
III 1.1 Les outils à molettes :.....	30
III.2 Les outils à éléments de coupe fixes :.....	31
III.2 1 Les outils PDC : (Polycrystalline Diamond Compact)	31
III.2.2 Les TSP (Thermally Stable Polycrystalline).....	33
III.3 Désignation d'un outil PDC :.....	34
III.3.1 Le corps de l'outil :.....	34

Sommaire

III.3.2. Steel body :.....	35
III.3.2.1- Les avantages de steel body :.....	35
III.3.2.1 - Les inconvénients du steel body :	36
III.3.3. Matrix body :.....	36
III.3.3.1- Les avantages du Matrix body :.....	36
III.3.3.2- Les inconvénients de Matrix body :.....	36
III.4. Le profil :.....	37
III.4.1. Le profil plat :.....	37
III.4.2. Le profil double cône :	38
III.4.3. Le profil parabolique :.....	38
III.5. Densité des cutters :.....	38
III.5.1 Angles caractéristiques des pastilles PDC :	38
III.5.2 Longueur utile L_d :	39
III.6. Mode de travail des outils :.....	39
III.6.1 Mode de travail d'un outil Tricône :.....	39
III.6.2 Mode de travail d'un outil PDC :.....	39
III.7. Classification des outils à éléments de coupe fixes.....	40
III.7.1. Premier caractère.....	41
III.7.2. Deuxième caractère.....	42
III.7.3. Troisième caractère.....	43
III.7.4. Quatrième caractère.....	44
III.8. Choix des outils :.....	45
III.8.1. l'analyse de l'usure.....	46
III.8.2. Choix des outils par la méthode de break even :.....	47
III. 9 Étude comparative entre les caractéristiques des outils de forage :	50

Chapitre VI Processus de fabrication des outils

IV.1. les premières procédures (administratives) :.....	51
IV.1.1. la conception :	51
IV.1.2. la fabrication :	52
IV.2. Fabrication d'un outil à corps en acier (STEEL BODY) :.....	53
IV.2.1. Usinage de la tête en acier :.....	54
IV.2.2 Profilage des lames et ajustage des alvéoles :.....	55
IV.2.3 Sablage et graphitage :	55
IV.2.4. hardfacing et métallisation :	56

Sommaire

IV.2.5 Dégraphitage et alvéolage :.....	58
IV.2.6 Brasage des PDC sur la tête :.....	59
IV.2.6.1 Les étapes de brasage sont :.....	59
IV.2.6.2 Sablage après brasage.	59
IV.2.6.3 Ressuage :	59
IV.2.7 Finition :.....	59
IV.2.7.1 Rectification :.....	59
IV.2.7.2 Installation des duses :	60
IV.3. Fabrication d'un outil a corps en Carbure de tungstène (MATRIX BODY) :.....	61
IV.3.1.dèbitage graphite :.....	63
IV.3.2.tournage de graphite :.....	63
IV.3.3.plotting :.....	63
IV.3.4 Usinage et préparation de la monture en acier de l'outil :.....	64
IV.3.5 Remplissage et préparation du moule :.....	64
IV.3.6 Préchauffage :	65
IV.3.7 Passage au four :	65
IV.3.8 Dégraphitage et sablage :.....	65
IV.3.9 Alvéolage :.....	65
IV.3.10 Brasage des PDC au corps de carbure de tungstène :.....	66
IV.3.11 Ressuage :	66
IV.3.12 Finition :.....	66
IV.3.12.1 Rectification :.....	66
IV.3.12.2 Installation des duses :	66
IV.3.12.3 Peinture, codage et emballage :.....	66

Chapitre V Interactions roche/outil et efforts de coupe

V.1. Caractéristiques des roches en tant que matériaux à détruire :.....	67
V.1.1 La dureté :.....	67
V.1.2 Résistance à la pénétration statique :.....	68
V.1.3 Résistance à la pénétration dynamique :	70
V.1.4 Fragilité et plasticité :.....	71
V.1.4.2 Roches dites fragiles :.....	71
V.1.5 Abrasivité :	72
V.2 Attaque de la roche par l'outil :	73

Sommaire

V.2.1 Pénétration et écrasement :	73
V.2.2 Coupe :	73
V.2.3 Percussion :	74
V.2.4 Abrasion :	75
V.2.5 Érosion :	76
V.3. Attaque de l'outil par la roche :	76
V.3.1 Réactions de la roche sur l'outil :	76
V.3.2 Usures des parties actives de l'outil :	76
V.4. Adaptation des outils aux formations :	77
V.5. Adaptation des paramètres de forage aux outils et aux formations :	77
V.6. Les efforts exercés sur l'outil	77
V.6.1 Géométrie d'un outil PDC :	77
V.6.2. La performance énergétique :	79
V.6.3 Effort de coupe et de frottement :	80
V.7 Le prix de revient du mètre fore :	82
Conclusion générale	84

Bibliographie

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Classements des appareils de forage

Tableau 2 : Exemple programme de forage et du tubage

Tableau 3 : Programme d'outil et régime de forage

Tableau 4 : Type de profil

Tableau 5 : Type de d'usage

Tableau 6 : Type de taille d'élément

Tableau 7 : Type de taille d'élément

Tableau 8 : Échelle de dureté Mohs

Liste des figures :

Figure 1: Schéma d'un appareil de forage

Figure 2 : Appareil de forage

Figure 3 : Schéma de la table

Figure 4 : Table de rotation

Figure 5 : Fonction levage

Figure 6 : Le moufle

Figure 7 : Top drive

Figure 8 : Le treuil

Figure 9 : Pompe à boue

Figure 10 : Schéma de la pompe

Figure 11 : Circuit de pompage de boue

Figure 12 : Tiges de forage

Figure 13 : Masse Tiges

Figure 14 : Stabilisateurs

Figure 15 : Trépans de forage

Figure 16 : Application du poids sur l'outil

Figure 17 : Exemple d'architecture d'un puits.

Figure 19 : Différents types d'outils utilisés en forage

Figure 20 : Les outils à molettes (tricône)

Figure 21 : Les outils à diamant (PDC)

Figure 22 : Structure d'un PDC

Figure 23 : Outil TSP

Figure 24 : Les types d'outils en PDC

Figure 25 : Angles caractéristiques d'un PDC

Figure 26 : Longueur utile L_d

Figure 27 : Principe de fonctionnement d'un outil PDC

Figure 28 : Type de profil

Figure 29 : La courbe de rentabilité par la méthode de Break even

Figure 30 : Corps en acier "STEEL BODY"

Figure 31 : Usinage de la tête

Figure 32 : Bit shank

Figure 33 : L'opération de profilage

Figure 34 : Sablage

Figure 35 : Soudage de bit shank avec la tête

Figure 36 : L'opération hardfacing

Figure 37 : Métallisation

Figure 38 : Alveolage

Figure 39 : Corps en matrice (matrix body)

Figure 40 : Composant du moule pour la fabrication de l'outil de forage

Figure 41 : Plotting

Figure 42 : Moulage

Figure 43 : Préchauffage

Figure 44 : Résistance à la pénétration.

Figure 45 : Action de poinçon dans une formation fragile.

Figure 46 : Pénétration et écrasement.

Figure 47 : Ecrasement et coupe constituent le mode de travail des outils à lames.

Figure 48 : Action d'un outil de forage par percussion.

Figure 49 : Action d'un outil par abrasion.

Figure 50 : Action d'un outil par abrasion.

Figure 51 : Caractéristiques géométriques d'un outil PDC

Figure 52 : Efforts de coupe d'un outil PDC

Figure 53 : Effort de coupe et de frottement

Introduction générale

Le pétrole, aussi appelé or noir, huile de la roche, il joue un rôle fondamental dans l'économie nationale. Pour récupérer ces hydrocarbures, le forage d'un puits est le seul moyen pour l'extraire avec un prix de revient le plus bas possible et dans les meilleures conditions de sécurité.

Le forage est un secteur clé de l'industrie pétrolière, son coût total lorsque l'outil au fond est en train de détruire la roche, représente environ 30 % du coût global du puits. Il est donc important d'optimiser le moyen utilisé pour détruire la roche, ceci est lié directement au choix de l'outil le mieux adapté aux formations à forer.

La conception et la fabrication de ces outils se sont beaucoup améliorées, qui ont pour but d'augmenter la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil.

Toutes ces raisons ont entraîné une forte concurrence entre les grands fabricants afin d'apporter le développement continu de la technologie du trépan.

La direction fabrication et travaux de l'ENSP fait face à cette forte concurrence sur le marché orienté vers la performance, la réduction des coûts et des temps non productifs. Pour cela, elle a réalisé, dans un premier temps, des partenariats étrangers (Américain : Christensen, Belge : DDS) pour le transfert technologique et du savoir-faire, puis elle a décidé de compter sur ses compétences pour développer ses propres atouts de Recherche & Développement efficaces. C'est ce qui a motivé cette étude.

Dans cette optique, nous allons organiser et développer notre travail suivant cinq chapitres, en commençant par une introduction générale

Nous aborderons dans le premier chapitre une présentation de l'entreprise avec ses filiales et participants et leurs missions principales. Le deuxième chapitre sera consacré aux généralités sur le forage pétrolier. Le troisième chapitre consiste sur les différents types des outils de forage. Par la suite nous citerons les techniques de fabrications des outils de forage dans le quatrième chapitre. Le dernier chapitre, nous étudierons toutes les conditions et efforts de coupe de l'outil et les propriétés physiques et mécaniques de la roche, en fin nous concluons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I Présentation de l'entreprise

L'Entreprise Nationale de Services aux Puits « ENSP », filiale de SONATRACH à 100%, est un groupe représentant un important capital de savoir-faire et d'expérience accumulée depuis plusieurs années dans les services techniques utiles aux forages, à l'exploration et à la production des hydrocarbures.

L'ENSP Group fournit plus d'une trentaine de services. La diversité de ses activités a nécessité une organisation en unités économiques de services : directions opérationnelles, joint-venture et groupements.

L'ENSP est un groupe de services parapétroliers dont la mission est de satisfaire durablement, par l'innovation et l'action, les besoins de SONATRACH et de ses associés étrangers.

Au-delà de son professionnalisme, l'ENSP est un groupe animé par une volonté de dialogue et de transparence, il évolue autour des valeurs communes ci-après :

- Le professionnalisme
- Le respect des collaborateurs
- Le délai permanent de la sécurité et de la protection de l'environnement

L'ENSP est un groupe régi par des principes rigoureux et à une solide réputation en matière de conduite éthique et de responsabilités environnementales.

L'ENSP group a été créée le 1^{er} août 1981 dans le cadre de la restructuration du secteur des hydrocarbures, et hérité de l'entreprise SONATRACH les entités suivantes :

- Société Altest (Filiale) SH 51% Baker 49%.
- Société Alfluid (Filiale) SH 51% Milchen 49%.
- Société Aldia (Filiale) SH 51% Dresser Atlas 49%.
- Société Aldim (Filiale) SH 51% Christensen 49%.
- Direction Opérations Spéciales de l'ex.DTP SONATRACH.

I.1 Domaine d'activité de l'ENSP:

L'ENSP développe des activités opérationnelles suivantes :

- Réaliser la maintenance et l'entretien des puits ;
- Réaliser les opérations de slick line et welltesting ;
- Réhabiliter les installations pétrolières ;
- Réaliser les opérations de Well Services ;
- Acquérir les données de forage pétrolier ;
- Concevoir et fabriquer les outils de forage et carottage :
 - Des trépan en couronnes en diamants naturels
 - Des trépan en (PDC) polycristallin diamant compact
 - Des trépan en diamant imprégnés
 - Matériels pétrolier tels que ; les millingtools, flanges, adaptateur ; pènes de clés et cales.

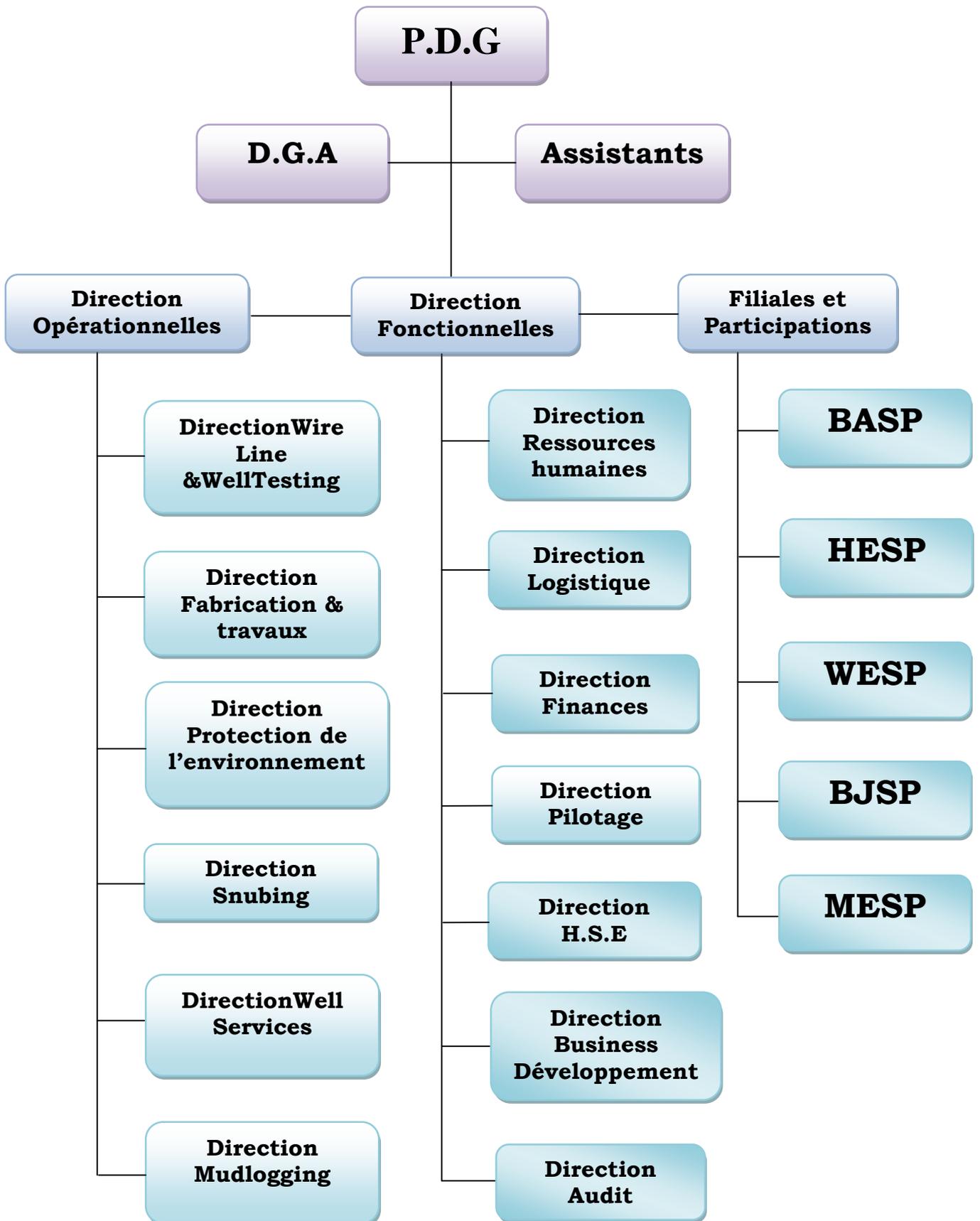
Le groupe ENSP est organisé, conformément à l'organigramme présenté, comme suit :

La Direction Générale et le Corporate Management.

Les Unités Opérationnelles : Snubbing, Wire line & welltesting, protection de l'environnement, fabrication, Well Services et MudLogging.

Les Filiales : BJSP, HESP, BASP, MESP et WESP.

I.2-Organigramme du Groupe ENSP :



I.3. Les filiales & Participations

I.3.1 HESP :

Cette filiale a été créée en 1999 entre **HalliburtonEnergy Service** et l'Entreprise Nationale de Services aux Puits, cette fusion entre ces deux sociétés à donner HESP Halliburton Entreprise Service aux Puits.

Cette entreprise de services qui a pour principale activité la réalisation d'opération de diaggraphie. Dans les puits verticaux et horizontaux.

I.3.2 BJSP :

BJSP, « Société Algérienne de stimulation de puits producteurs d'Hydrocarbure », BJSP est une société mixte créée en 1986 entre le groupe ENSP (Entreprise Nationale de Services aux puits), et **BJ services**, une compagnie internationale de droit U.S fournisseur de services.

Les services offerts par BJSP à l'industrie des hydrocarbures en Algérie comprennent :

- A- La cimentation
- B- La stimulation
- C- Le pompage
- D- L'azote
- E- Le Coiled tubing
- F- Les outils de fonds

I.3.3 BASP:

L'ENSP et Haliburton ont créé une deuxième société mixte de droit algérien. En effet, après HESP, créée en 1999 dans les activités de logging, c'est en janvier 2003 ou cette société dénommée BASP « BaroidAlgeria de Services aux Puits » a démarré, qui a pour vocation la conception, la fabrication et la régénération continue des fluides de forage pétroliers.

BASP est spécialisée dans les techniques suivantes :

- les différents systèmes pour boue à émulsion
- des équipements de traitement des solides

-une centrale pour la fabrication, la livraison et la régénération des boues

I.3.4 MESP :

Comme tous les partenariats, ENSP a préoccupé du l'environnement, alors elle a créé en 1998 le groupement MESP avec MEDES qui est une société italienne, spécialisée dans les services de protection de l'environnement et particulièrement dans le traitement des rejets pétroliers. MEDES est une société certifiée ISO 9001 :2000. En 2003, Ce groupement a été transformé en MESP est ENSP à 49% et MEDES 51%.

MESP est impliquée dans la protection de l'Environnement, Sa spécialité réside dans les services de traitement des rejets générés par l'industrie pétrolière et du gaz.

Sa présence intense dans le domaine du traitement des rejets pétroliers garantit une expérience consolidée par une innovation continue.

MESP se réfère au laboratoire CRD « Centre de Recherche et Développement (Boumerdes) » ainsi qu'au laboratoire international et indépendant SGS (SG Supervise S.A) pour mener les tests de conformité aux normes en vigueur .

I.3.5 WESP :

Créé en 1994 le groupement WSP appartient à la compagnie Weatherford et ENSP DOS dans la proportion de 50%.

Ce groupement fournit des prestations de services en clés de tubage exclusivement aux opérateurs étrangers associés à la SONATRACH dans les activités d'exploration et d'exploitation pétrolière en Algérie.

I.4. Les Directions opérationnelles ENSP

I.4.1 Direction SNUBBING

Le SNUBBING est une technique utilisée pour manœuvrer les tubes obturés, en utilisant des BOPs afin d'obtenir une étanchéité tout autour tout autour dans un puits sans pression.

La direction SNUBBING met à la disposition de ses clients un parc d'appareil assez important et varié composé de HRL et HRS dont la capacité de lavage peut aller de 120 000 Lbs à 230 000 Lbs pour une capacité de pousser 60 000 à 110 000Lbs.

HRS : Hydra Rig Short stroke.

HRL : Hydra Rig Long stroke.

Différentes opérations :

- Nettoyage du fond des puits par circulation en translation
- Opération de fraisage
- Repêchage on instrumentation
- La mise en place des tubings concentrique ainsi leur changement
- Neutralisation et démarrage des puits
- Acidification et nettoyage des perforations
- Descente et remontée des complétions
- Réalisation des opérations de Work Over
- Test de la formation

I.4.2 Direction Protection Environnement (DPE)

- Cette direction est destinée principalement aux traitements des problèmes environnementaux
- Elle dispose d'une variété très importante de matériels (citernes aspiratrices, compresseurs, water blastrecte) destiné aux nettoyages des bacs et à l'entretien des installations de surface (séparateurs, tête de puits ; collecteurs cte)

Différentes opérations :

- Sablage
- Dessalage des puits et installations
- Revêtement
- Nettoyage

I.4.3 Direction Wire line & Well testing

Cette activité couvre une large gamme des travaux au puits, cette technique permet d'intervenir dans les puits en exploitation ou en exploration.

Principales interventions :

- Contrôle et nettoyage du tubing ou du fond des puits.
- Réalisations des opérations de mesures BHP et d'échantillonnage.

Instrumentation : La mise en place ou le repêchage des outils..

WELL TESTING

Elle dispose d'un parc très important de séparateurs et d'améradas électronique.
Cette division assure les mesures de surface et les mesures de fond

BHP (BottomHole Pressure):

Opération qui consiste à réaliser des descente d'outils à mémoires électronique, dont le lent d'enregistrer sur un puits de pétrole ou du gaz des mesures d'une données pouvant être de quatre (04) à cinq (05) semaines, ou jusqu'à épuisement de l'énergie de la batterie d'alimentation.

Pour assurer un service complet (fond et surface), la Division WellTesting dispose actuellement des trains de test (string) de types MFE et PCT et les accessoires nécessaires pour réaliser les tests DST

I.4. 4 Direction Mudlogging :

Cette direction est spécialisée dans le domaine de forage dont les principales interventions sont les suivantes :

- Assurer La surveillance géologique des forages
- La reconnaissance des Séries géologiques traversées
- La mesure et l'enregistrement des paramètres physiques du forage
- Recueil, traitement et interprétation des données géologiques et des opérations de forages
- Activité carottage: Prélèvement d'un échantillon des puits de forage pétrolier obtenu à l'aide d'un tube appelé carottier que l'on fait pénétrer dans le puits. L'échantillon ainsi obtenu s'appelle une carotte

I.4.5.Direction Well Services :

Cette direction assure le bon déroulement des opérations liées aux installations de surfaces de puits tels que :

- Commissioning
- Monitoring
- Wellhead maintenance
- Maintenance des équipements de surface

I.4.6 Direction Fabrication ALDIM :

À compter du 01 janvier 2007 ALDIM a changée de dénomination pour devenir désormais Direction de fabrication, cette direction a évolué depuis sa création, son historique très riche se résume comme suit :

ALDIM a été créé en 1973ou 1976 sous forme de filiale entre la Sonatrach etChristensen - USA.

En 1982 ou 1983, vient l'époque des restructurations, Aldim intègre le groupeENSP qui décide le rachat des parts détenues par Christensen - USA.

Les capacités de production installées lui ont permis également d'élargir son marché en s'étendant aux entreprises des laboratoires de travaux public et hydraulique. A cela, s'est ajoutée une activité de fabrication de divers produits pétroliers.

Cette Direction assure la fabrication des outils de forage et de carottage, la fabrication des outils de sondage pour l'industrie minière et géotechnique, la fabrication de divers matériels pétrolier tel que:lesMilling Tools, flanges, adaptateurs, pènes de clé & cales. Ainsi l'assemblage et la livraison des centraliseurs.

- Des trépan et couronnes en diamants naturels
- Des trépan et couronne en PDC
- Des trépan et couronne en diamants imprégnés.

En 2003, l'ENSP-Aldim signe une alliance technique avec Diamant Drilling Services (DDS), une entreprise Belge spécialisée dans la fabrication des outils PDC et imprégnés.

Cette alliance a pour objectif de transformer l'unité de production deReghaia pour la rendre capable de produire des outils de forage performant. Ceci inclus la mise en place de l'outillage

avec notamment l'installation d'un four à Hydrogène ; la formation du personnel afin de maîtriser les dernières techniques de fabrication ; et l'implémentation de nouvelles procédures de contrôle et de qualité pour répondre aux normes actuelles.

La supervision des opérations de fabrication est réalisée par du personnel DDS afin de garantir la qualité des produits fabriqués et parfaire sur site la formation du personnel.

Cette phase de transfert technologique a duré plus d'un an et s'achève progressivement. Fin 2004, le premier outil « nouvelle génération » a été lancée en fabrication à Reghaia.

Le second objectif de cette alliance est bien entendu de reconquérir une part non négligeable du marché des outils de forage en Algérie. Et pourquoi pas, de vendre des outils de forage en dehors de l'Algérie.

Pour y arriver, du personnel DDS a été mis en place dans la base opérationnelle de HassiMessaoud. Car c'est à ce niveau que chaque application est étudiée pour déterminer l'outil à utiliser. La tâche n'est pas aisée car il s'agit de se faire une place là où la concurrence a pris position depuis de nombreuses années.

Plusieurs essais ont déjà pu être menés. Qui ont abouti à des résultats encourageants. Le fruit du travail continue ainsi notre écoute de leurs clients les à aider de réaliser avec Sonatrach un record en phase verticale 12"1/4 sur Hassi Messaoud (plus de 18.5 m/h) (Décembre 2004).

Leurs développement a continue pour offrir un meilleurs produits à leurs clients c'est là en Avril 2005 ou ils ont réalisé un autre record avec Sonatrach dans un puits en phase verticale 12"1/4 sur Hassi Messaoud (plus de 19.40 m/h).

Son atteinte à ces résultats ne veulent pas dire qu'ils ont atteint leurs objectif, ils continuent d'offrir à leurs clients un meilleurs produit de valeur économique, cela a permis de réaliser une deuxième performance dans le même type d'outils avec le même client d'une performance de 19.28 m/h.

Il est à noter que leurs outils sont de fabrication algérienne 100% et ils sont réparables en Algérie.

Chapitre II Généralités sur le forage pétrolier

L'opération de forage permet de relier la couche contenant du pétrole ou de gaz à la surface pour permettre l'exploitation de ces sources,

L'installation de forage est un complexe d'équipements mécanique comprenant des machines et des mécanismes liés entre eux pour accomplir une fonction bien déterminée.

Le principe de forage rotary consiste à mettre en rotation un outil sur lequel s'applique une force orientée dans la direction d'avancement. Ce procédé permet de creuser un trou de rayon égal à celui de l'outil. Les copeaux (cutting) générés au fond du trou suite à la destruction de la roche par l'outil remontent en continu à la surface grâce à la circulation du fluide de forage qui est généralement une boue à base d'eau ou d'huile. Ce fluide est pompé depuis la surface vers l'intérieur des tiges de forage pour être injecté au travers de l'outil sur le front de coupe.

La boue remonte ensuite dans l'espace annulaire entre les tiges et les parois du puits et entraîne ainsi les copeaux de roche vers la surface. Le poids sur l'outil (Weight On Bit : WOB) est obtenu par gravité grâce à l'introduction de tiges lourdes appelées masses tiges. Le couple de rotation est obtenu soit à partir d'un couple en surface transmis vers l'outil via un train de tiges soit à partir d'un moteur fond de trou au-dessus de l'outil et piloté en surface.

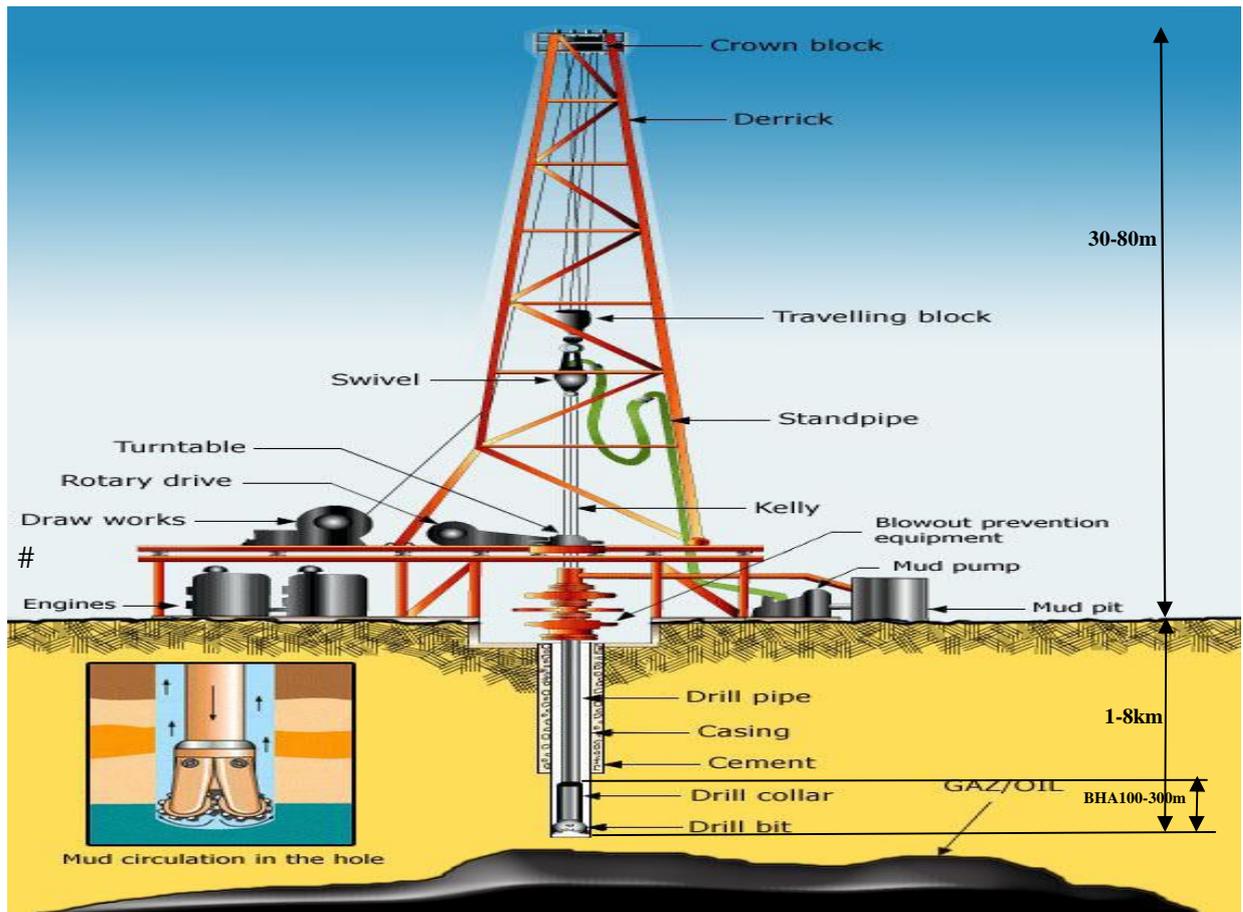


Figure 1: schéma d un appareil de forage



Figure 2 : Appareil de forage

II.1-Classification :

Deux caractéristiques relativement liées interviennent dans la classification d'un appareil de forage :

- **La capacité de profondeur de forage maximale**
- **La puissance au treuil**

La règle du pouce donne d'une manière pragmatique :

« Pour 100 foot de forage, il faut 10 HP de puissance au treuil »[2]

D'ou :

Appareil léger	4921 foot– 6561 foot	1500m – 2000m	650 HP
Appareil moyen	11482 ft	3500m	1300 HP
Appareil lourd	19685 ft	6000m	2000 HP
Appareil super lourd	26246 ft– 32805 ft	8000m – 10000m	3000 HP

Tableau 1 : Classements des appareils de forage

II.2-Fonctions d'un appareil de forage :

. Au cours de forage rotary d'un puits profond, à l'aide d'une installation de forage, on réalise les opérations suivantes :

- Descente de la colonne de tige de forage dans le puits.
- Rotation d'un outil de forage.
- Injection du liquide de forage dans le puits afin de remonter les déblais de terrain découpés, refroidir le trépan et consolider les parois du puits.
- Rallongement de la colonne de tiges de forage par la mesure de l'augmentation de la profondeur du puits.
- Montée de la colonne des tiges pour remplacer un outil de forage usé.
- Evacuation de déblais du terrain par le liquide de forage et préparation d'un nouveau liquide.
- Descente des colonnes de tubage.

L'ensemble de tous ces équipements qui travaillent au-dessus de la surface permettent d'assurer trois fonctions principales :

II.2.1-Fonction rotation :

Pour faire tourner l’outil, on visse au sommet des tiges, de forme cylindrique, une autre tige de section carrée ou hexagonale, appelée tige d’entraînement [Kelly], et on l’introduit dans un moyeu appelé table de rotation [rotary table].[1]

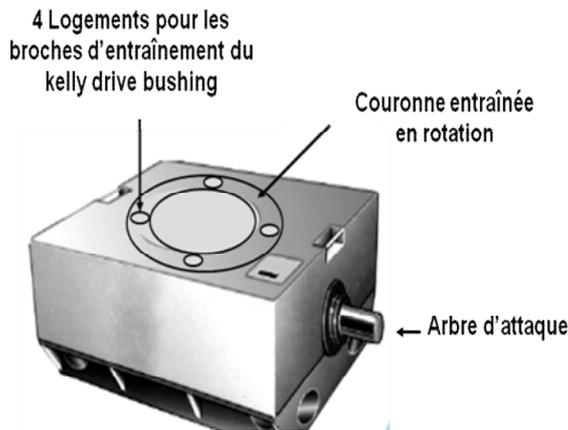


Figure 3 : schéma de la table



Figure 4 : table de rotation

II.2.2-Fonction levage :

Pour soulever la garniture de forage (ensemble tiges - tiges lourdes – masse-tiges), il faut utiliser une grue de grande capacité, car la garniture de forage peut atteindre un poids supérieur à 150 tonnes ou plus. Cette grue est constituée :

- d'un mât,
- d'un treuil,
- d'un palan comprenant les moufles fixe et mobile et le câble.

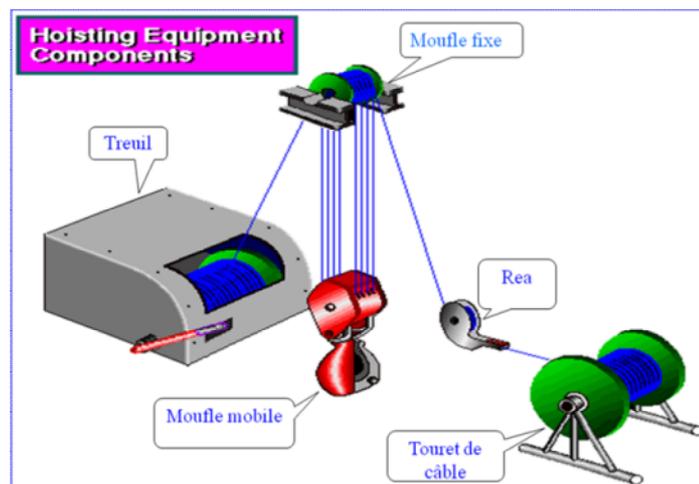


Figure 5 : Fonction levage

II.2.2.1 Le mouflage :

Le mouflage est l'enroulement du câble de forage entre les poulies des moufles fixe et mobile en plusieurs brins (jusqu'à 14 brins). Le mouflage permet de démultiplier le poids de la garniture de forage et diminuer la vitesse de son déplacement.

En négligeant les frottements, la charge au crochet est divisée par le nombre de brin.

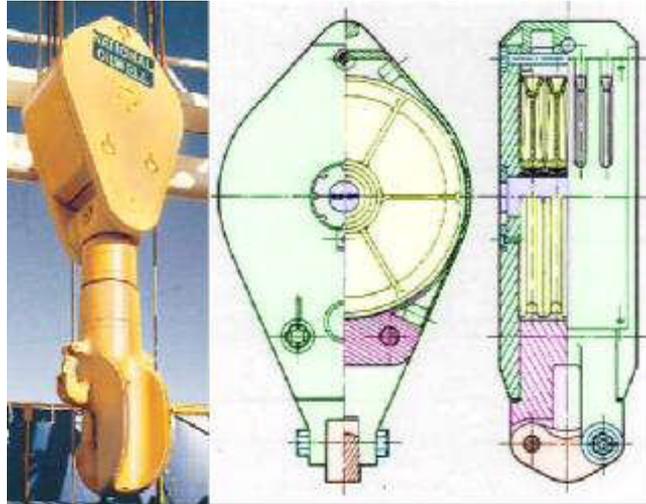


Figure 6 : le moufle

II.2.2.2 Le top drive

Le top drive est une sorte de tête d'injection motorisée énorme qui, en plus de l'injection, assure la rotation de la garniture de forage.

Ainsi, on n'a besoin ni de la tige d'entraînement ni de la table de rotation pour faire tourner la garniture, c'est le top drive qui s'en charge. En plus, pendant le forage, au lieu de faire les ajouts simple par simple, on peut les faire longueur par longueur.

Plusieurs autres options existent dans cet équipement : les bras de l'élévateur sont articulés hydrauliquement pour faciliter le travail de l'accrocheur et il possède une clé automatique et même une coulisse intégrées.

Des rails placés tout le long du mât le guident dans ses déplacements



Figure 7 : top drive

II.2.2.3 Le treuil [Drawworks] :

Le treuil de forage est l'organe principal de la sonde; par sa capacité il caractérise Le rig (sonde de forage) en indiquant la profondeur de forage que peut atteindre l'appareil de forage.

Le treuil regroupe un ensemble d'éléments mécaniques et assure plusieurs fonctions :

- Les manœuvres de remontée et de descente (levage) du train de sonde à des vitesses rapides et en toute sécurité, ce qui constitue sa principale utilisation.
- L'entraînement de la table de rotation quand celle-ci n'est pas entraînée par un moteur indépendant.
- les vissages et dévissages du train de sonde ainsi que les opérations de curage.

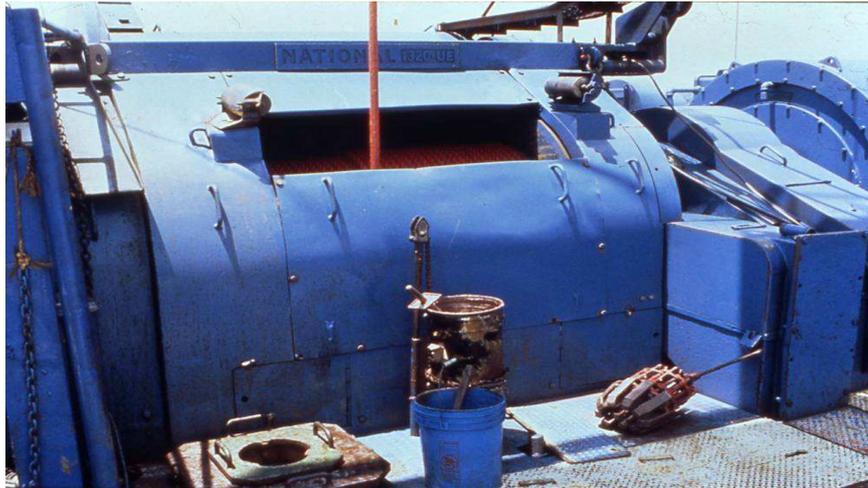


Figure 8: le treuil

II.2.3-Fonction pompage :

La fonction pompage assure l'acheminement du fluide de forage depuis l'aspiration de la pompe jusqu'au retour aux bassins.

La boue [mud] est fabriquée dans des bassins de grande capacité. Elle est ensuite aspirée par des pompes [mudpumps] et refoulée dans les tiges creuses. Elle descend le long de la garniture de forage, sort par les orifices de l'outil, remonte dans l'espace annulaire entre la garniture de forage et le puits jusqu'en surface. Là, elle est recueillie dans un tube vertical (tube fontaine), puis acheminée par un autre horizontal (goulotte) vers des tamis vibrants, pour être débarrassée des déblais [cuttings], avant d'être réinjectée dans le puits [well].



Figure 9 : pompe à boue

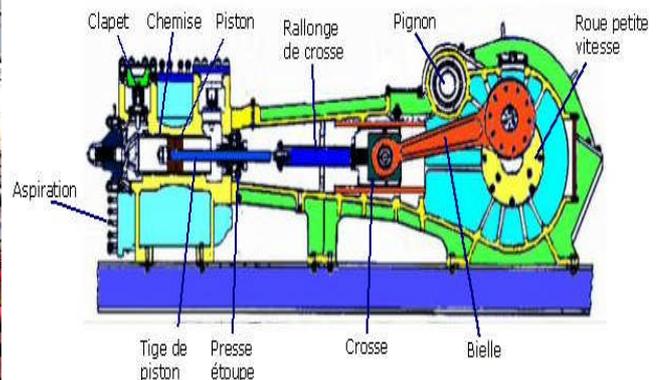


Figure 10 : schéma de la pompe

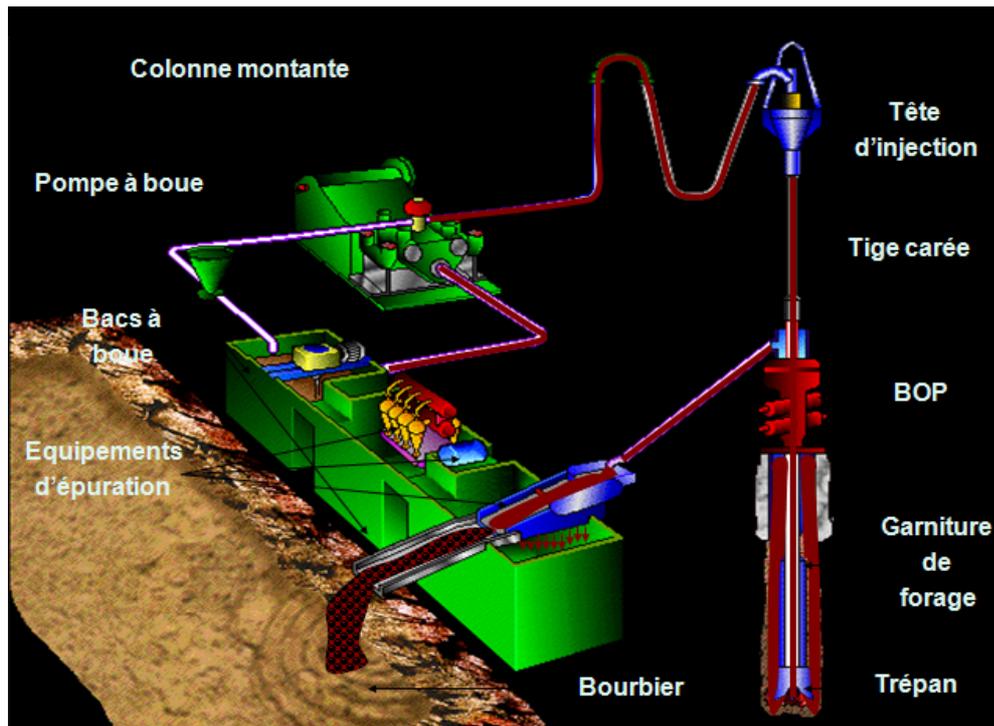


Figure 11 : circuit de pompage de boue

II.3-Éléments principaux d'un équipement de fond

Le forage en mode dit "rotary" consiste à entraîner depuis la surface, un train de tiges transmettant au trépan, situé au fond du puits, un effort longitudinal de compression en fonctionnement normal (WOB) et un couple (TOB). Une certaine énergie est produite en surface pour maintenir cette rotation et permettre le travail de désagrégation de la roche par les taillants du trépan.

II.3.1 Le train de tiges :

Cette partie de la garniture est constituée d'une série de tiges d'acier raccordées les unes aux autres par des joints filetés coniques. Le train de tiges permet de contrôler l'outil par la transmission du couple moteur fourni en surface, par l'intermédiaire de la table de rotation. En outre, il fournit la pression nécessaire pour percer dans la formation et abraser les roches avec une force WOB suffisante. Cet ensemble peut atteindre une longueur de plusieurs kilomètres (1 à 8 km).

II.3.1 1 Les tiges de forage :

C'est un ensemble de tiges d'acier légères d'environ 10 m de longueur, d'un diamètre extérieur pouvant aller de 9 à 15 cm et d'une épaisseur de 1 cm. L'ensemble des tiges de forage, entraîné à partir de la table de rotation est sollicité en traction et en torsion.



Figure 12 : Tiges de forage

II.3.2 Assemblage de fond BHA (Bottom Hole Assembly)

C'est la partie inférieure de la structure de garniture, constituée de l'outil, des stabilisateurs et des masses-tiges. La longueur de cet ensemble varie typiquement de 100 à 300 m en fonction de la pression recherchée.

II.3.2.1 Les masses-tiges Les masses-tiges :

Ce sont des tubes de fortes sections permettant d'exercer du poids sur le trépan. Les masses-tiges sont sollicitées en compression et en torsion. Les diamètres de ces tiges peuvent varier selon les puits, de 6 à 8 cm pour le diamètre intérieur et de 10 à 25 cm pour le diamètre extérieur pour une épaisseur de 6 à 16 cm, ce qui leur confère une bonne rigidité en torsion et en compression.



Figure 13:Masse Tiges

II.3.2.2 Les stabilisateurs :

Ce sont des tubes de longueur nettement plus faible que celle des masses-tiges et dont le diamètre extérieur est voisin de celui du trépan. Ils sont placés au niveau des masses tiges et parfois intercalés entre deux masses-tiges pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente sa performance.

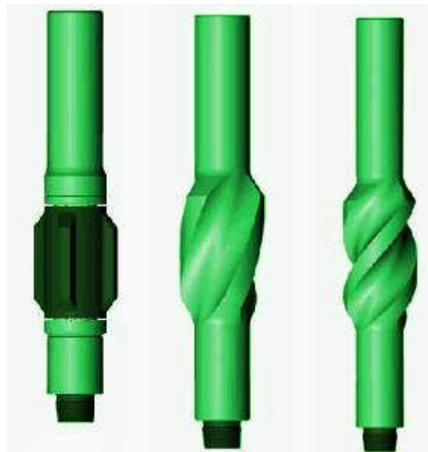


Figure 14:Stabilisateurs

II.3.2.3 Les trépan : :

Le trépan est monté à l'extrémité d'un train de tiges. C'est un outil qui sert à tailler et détruire la roche. Il existe différents types de trépan, chaque type étant choisi pour une opération de forage spécifique, en fonction de la nature de la formation (plus ou moins dure)

et de la résistance mécanique des terrains (forabilité, stabilité des parois, comportement des argiles..). La mécanique de l'outil de forage influence directement la vitesse de progression ROP. Les plus utilisés sont les trépan PDC (Polycrystalline Diamond Compact) qui contiennent des pastilles de diamant. Lorsqu'ils sont en bon état, ce mode de rupture est plus efficace et favorise l'extraction naturelle des débris rocheux. Ils s'avèrent plus performants lorsqu'ils sont bien utilisés, en d'autres termes bien commandés, sinon ces performances se dégradent. Les trépan P DC forent la formation par cisaillement, ce qui exige, de manière significative, moins d'énergie que la rupture de formation basée sur la compression. Les PDC sont stables pour des vitesses de rotation élevées mais instables pour des vitesses faibles

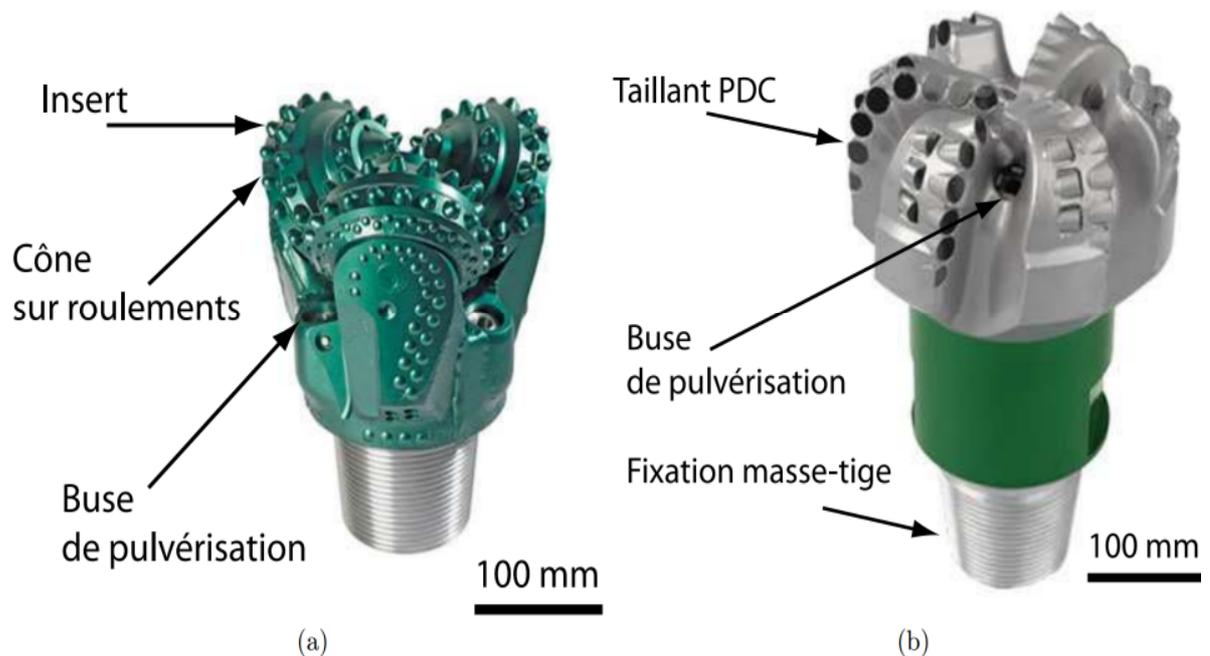


Figure 15 : trépan de forage

II.4-Parametre de forage :

Les paramètres de forage sont les différents facteurs mécaniques et hydrauliques pouvant agir sur la vitesse de progression notée ROP (Rate Of Penetration) ainsi que sur le comportement directionnel.

Le ROP correspond à la profondeur en mètre par heure. L'optimisation du ROP est un aspect très important dans l'analyse du processus de forage car c'est directement lié au temps passé sur une installation onshore ou offshore

Les principaux paramètres mécaniques sont :

II.4.1 Le poids sur l'outil WOB (Weight on bit) :

Ce paramètre désigne la force appliquée par la garniture sur l'outil suivant son axe de révolution. Cette force dépend du poids propre de la garniture, de la poussée d'Archimède due au fluide de forage et de la tension du câble de soutien de la garniture en surface.

Les grandeurs usuelles de WOB s'étendent typiquement entre 10kN et 10³ kN.

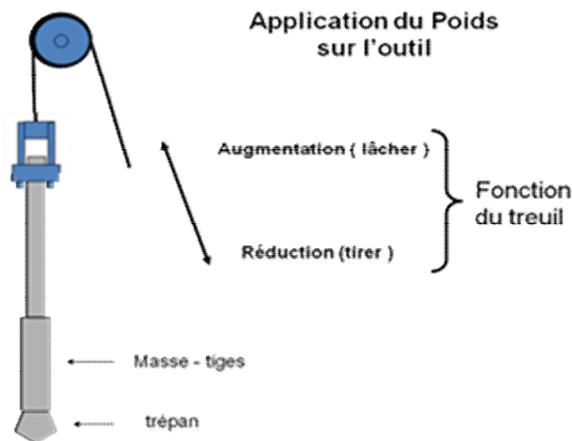


Figure 16 : application du poids sur l'outil

II.4.2 La vitesse de rotation :

Le choix de la vitesse de rotation dépend de celui de WOB. En surface, elle peut être précisément contrôlée mais elle peut être différente de la vitesse de rotation de trépan.

Les vitesses de rotation usuelles se situent entre 65 et 250 RPM (tour/minute).

II.4.3 Le couple exercé sur l'outil T_{tob} (torque on bit) :

Ce paramètre correspond au couple transmis par la garniture au trépan suivant son axe de révolution. Compte tenu des frottements du train de tiges contre la paroi du puits, ce couple est nettement inférieur à celui mesuré en surface. Ainsi le couple T_{tob} représente les effets combinés du couple réactif et des forces de frottement non linéaire sur la longueur de BHA.

II.5-Programme de forage et tubage

II.5.1 Programme de forage

Tout programme de forage s'établit selon des critères de bases essentiels correspondants aux différentes formations à traverser, citons :

- Les types et les pressions de formations prévues ;
- Localisation des zones aquifères ;
- Dégager formellement les zones susceptibles à hydrocarbures ;
- Localisation des zones pouvant risquer de problèmes techniques et détermination de leurs conditions.

Toutes ces conditions permettent de prévoir l'élaboration d'un programme et le matériel adéquat afin de réaliser l'exécution sans problème durant et après au préalable.

Le forage d'un puits pétrolier passe généralement par plusieurs phases (**voir Figure 17**).

Le passage d'une phase à une autre se traduit par la diminution du diamètre du puits qui devient de plus en plus petit. Le forage ayant été accompli à la profondeur prévue pour une phase donnée, la garniture entière est remontée en surface pour le changement de l'outil et de la **BHA** (équipement de fond) en vue de la prochaine phase

Mais avant le début de la nouvelle phase, la phase déjà forée doit être tubée et cimentée, le tubage consiste à faire descendre dans le puits des tubes en acier (casing) afin de consolider les parois du puits au fur et à mesure de l'avancement du forage et surtout de préparer l'infrastructure pour la production une fois la cible atteinte. Cette opération, périlleuse du fait du faible jeu tubage-trou et la quasi impossibilité de mettre en rotation la colonne de tubage, consiste en une manœuvre de descente par ajout unitaire de tubes.

D'une phase de forage à l'autre, les tubages sont empilés les uns dans les autres depuis la surface. A la fin de la descente et pendant chaque phase, c'est par circulation directe (c'est-à-dire injection du fluide par l'intérieur du tube et retour par l'annulaire) que l'on mettra en place le ciment dans l'annulaire (phase de cimentation).

La qualité de la cimentation dépend de la manière dont le ciment s'écoule dans l'annulaire. Un anneau de ciment ayant une épaisseur suffisante permet d'assurer un lien étanche et résistant entre le corps du tube et les parois du puits. Pour l'élaboration d'un programme de tubage, la considération du jeu entre le tubage et les parois du puits est très importante.

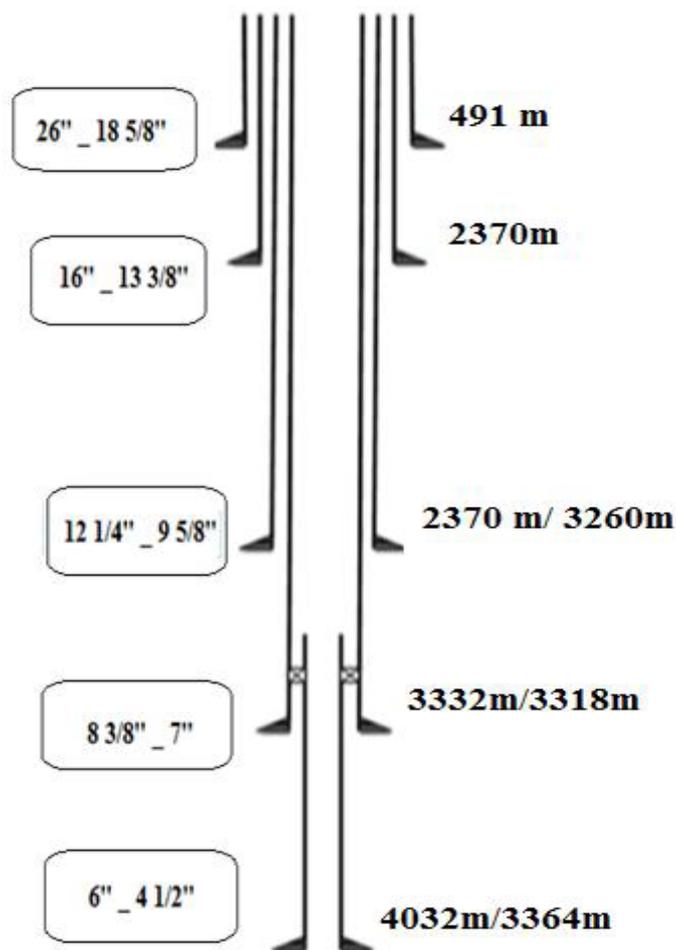


Figure 17 : Exemple d'architecture d'un puits

Phase de forage (pouce)	Diamètre de tubage (pouce)	Profondeur de forage (m)
26	18 5/8	491
16 1/2	13 3/8	491-2370
12 1/4	9 5/8	2370-3260
8 1/2	7 (liner)	3260-3332
6	4	3334-4032

Tableau 2 : exemple programme de forage et du tubage

II.5.2. Phases de tubage

Le tubage et la cimentation sont deux opérations indispensables à la consolidation d'un puits et elles se succèdent systématiquement. Il n'existe pas, en général, une mise en place d'un tubage dans un forage sans que celui-ci soit cimenté, même partiellement. Mais dans le domaine de forage le nombre de phases peut être de 2, 3, 4, ou 5. Dans tout les cas de programme on distingue :

II.5.2.1 Tube guide :

Ce dernier n'est souvent qu'un tube roulé de quelques mètres de longueur et descendu à une dizaine de mètres. Son rôle est d'assurer la verticalité du trou dans les premiers mètres forés et de canaliser la circulation de la boue vers les bacs

II.5.2.2 Colonne de surface :

Appelée encore 1^{ère} colonne technique ou colonne de fermeture des eaux, elle est destinée à :

- Isoler le sondage des nappes phréatiques d'eau douce contenues dans les couches supérieures;
- Maintenir les terrains de surface non consolidés, à l'aide des ancrages des dispositifs de sécurité en tête de puits (BOP).

II.5.2.3 Colonne intermédiaire :

Cette colonne descend à une profondeur variable selon les difficultés géologiques rencontrées. Elle permet :

D'éviter de poursuivre un forage dans un découvert présentant un certain nombre de dangers (éboulements) ;

D'isoler les formations contenant les fluides sous fortes ou faibles pressions (zones à pertes) en particulier elle permet le forage des zones de pressions incompatibles ;

D'éviter la rupture des terrains autour du sabot de la colonne de surface.

II.5.2.4 Colonne de production :

Elle est indispensable dans le cas d'un sondage de production. Elle permet :

- D'isoler la couche productive;
- La mise en œuvre du matériel de production fond du puits.

II.5.2.6 Colonne perdue (liner) :

Cette dernière suspendue par sa tête à la base de la colonne précédente elle peut jouer le même rôle qu'une colonne intermédiaire ou une colonne de production.

II.5.3. Phases de cimentation:

Cette opération consiste à mettre en place un laitier de ciment approprié à une cote donnée de puits ou dans l'espace annulaire entre le trou foré et le cuvelage en place.

Il existe différents types de cimentation répondant chacun à un problème particulier

II.5.3.1. Buts de l'opération de cimentation

Les buts de la cimentation des cuvelages ou du casing sont multiples :

- Isoler une couche productrice des couches adjacentes.
- Protéger ces tubages contre la corrosion due aux fluides contenus dans les couches traversées
- Fournir une base étanche aux équipements de contrôle et de sécurité installés en tête de puits.

II.5.4 Régime de forage et programme d'outil

Le régime de forage est un ensemble de facteurs qui exercent une action direct sur le processus de forage, cet ensemble est composé de :

- Outil de forage ;
- La vitesse de rotation (RPM) ;
- Débit de circulation (Q) ;
- Poids sur l'outil ;

Ces paramètres doivent être déterminés de façon plus précise et que l'opération de forage se passe sans problème. Alors, pour la détermination d'un régime optimale nous devons prendre en considération :

- La lithologie de la formation ;

- Les propriétés physico-mécaniques des formations ;
- Les diamètres de puits et les profondeurs.
- La charge axiale sur l’outil (WOB) : doit être suffisante pour la destruction de la roche par l’outil.
- Vitesse de rotation de l’outil (ROP) : dépend de type et de la dimension de trépan ; de la profondeur ; des propriétés mécaniques des terrains de la charge sur l’outil ; aussi que le caractéristique de l’appareil de forage.
- Quantité de fluide de circulation (Débit) : le balayage des déblais doit être assuré par le fonctionnement du système des événements du trépan et non par l’augmentation de débit.

phase	Type d’outil (Bit)	Profondeur forée [m]	Paramètres		
			WOB [T]	RPM [tr /min]	Débit Q [l/min]
26"	SB415 (IADC415)	0-491	1-25	80-120	1000-3400
Vertical					
16"	TFF913S	491-2370	5-23	90-230	2800-3000
Vertical					
12" ^{1/4}	PDC MI616LVpx (SMITH)	2370-3008	10-18	90-150	2500
Vertical					
12" ^{1/4}	HCM 408RR	3008-3277	10-20	90-170	2500
8" ^{3/8}	DSF713IQ616	3277-3362	4-10	80-130	1000
	D				
6"	XR40	3362-4435	5-10	80-130	< 1000

Tableau 3 : Programme d’outil et régime de forage

5.5 Programme prévisionnel de forage :

SONATRACH
HASSI MESSAOUD FIELD
HORIZONTAL DEVELOPMENT WELL ONMZ313 OBD
PROPOSED TD: 4368 mMD - 3473 mVD
TEMPORARY GEOLOGICAL PROGNOSIS le: 02/03/06

Stratigraphy		Tops m	Lithology	Description	Drilling Hazards	CASINGS	Bits	dboue sg	Diagraphie
SYS	SERIES								
TERTIARY	Mio-Pliocene	0		Sand, Calcareous & Sandy marl	Potential risk of complete loss in surface unconsolidated formations, Mud Weight to be kept at a minimum. Control ROP and maintain YP > 40	26" 18 5/8" CSG	EMS11CGK	Bentonitique 1,03 - 1,08sg	
	Eocene	234		Dolomite & Clay					
CRETACEOUS	SENONIAN	CARB SEN	340	Calcareous, Dolomite & Clay	Possible losses and differential sticking in the permeable sandstone of the Albian & the Barremian. Tight hole in Cenomanian formation & the Senonian Salt which can be avoided by using the proper Mud Weight and the maintenance of rheological properties.	494 m 0,00 °	DSX 92HF+	EMULSION INVERSE D= 1,25sg	GR - Caliper CBL/VDL (1/200 et 1/500)
		Lagunar SEN	454	Anhydrite, Dolomite & Salt					
		Salifère	578						
		TURONIAN	837	Limestone & Dolom.					
	CENOMANIAN	907	Anhydrite						
	ALBIAN	1052	Sandstone w/ Claystone Alternating						
	APTIAN	1370	Dolomite						
	BARREMIAN	1395	Sand & Sandstone						
	NEOCOMIEN	1659	Dolomite						
	JURASSIC	MALM		1856					
Argileux			2085	Clay, Anhydrite, Dolomite w/ fine passages of Sandstone					
Lagunaire			2195						
LIAS		LD1	2413	Dolom. & Anhyd.					
		LS1	2492	Salt & Anhydrite					
		LD2	2585	Dolomite					
TRIAS	TS	TS1	2754	Anhydrite & dolomite	Possible losses in the Triassic series inferior. Use proper LCM such as BARACARS to cure formation losses.	KOP= 3185 m 3344 m VD 3349 m MD 24,95 °	SE3841I	EMULSION INVERSE D=1,40sg	GRAY - Caliper CBL/VDL (1/200 et 1/500)
		TS2	2794	Salt & Anhydrite					
		TS3	2984	Salt w/ traces of Clay					
	Trias ARG (G10)	3185							
	Trias ARG G35	3222							
	ARGILO-GRESEUX & CARBONATE	3364	Clay w/ Sandstone & Dolomite						
	ANDESITIQUE	3414	Complexe volcano-sédimentaire						
	ORDOVICIEN	QUARTZITES DE HAMRA		Quartzites					
GRES D'EL ATCHANE			Sandstone						
ARGILES D'EL GASSI			Clay						
ZONE DES ALTERNANCES			Clay+Sandstone						
RESERVOIR RI			Sandstone/Quartz.						
CAMBRIEN	Ra	3457		Possibility for incurring losses. Cleaning sweeps must be used to ensure good hole cleaning.	3460 m VD 3561 m MD 85,00 °	HH372G8	HUILE P _g =220 kg/cm ²	GR / Neutron / Résistivité / Densité/Imagerie	
	R2	3550							
	R3		Sand & Clay						
	INFRACAMBRIEN								
	TD	3473							
	OWC	3524							



NB: Les côtes des formations figurant sur la coupe stratigraphique sont celles correspondant à la verticale de la tête de puits.

Chapitre III Les outils de forage

Parmi tous les organes d'un appareil de forage, le trépan reste l'élément indispensable pour réaliser un puits de forage pétrolier. C'est la première pièce à s'attaquer aux terrains. Quelle que soit sa forme, sa dimension, son type, sa configuration, l'outil de forage est indiscutablement obligatoire au creusement d'un puits de forage.

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.

L'une des tâches du superviseur de forage est de choisir l'outil le mieux adapté aux formations à forer. Il lui faudra choisir l'outil qui permet de forer pour un prix de revient minimum. 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, les temps de manœuvre ainsi que la qualité du puits réalisé (calibrage du trou, trajectoire réalisée, etc.)



Outil à dents



Outil à picots



TSP & Diamant



Imprégné



Couronnes
<PDC & TSP >



PDC Corps Acier



PDC corps Matrice

FIG. 19 : Différents types d'outils utilisés en forage

III.1 Les différents types des outils de forage :

Les outils se classent en deux catégories :

III 1.1 Les outils à molettes :

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

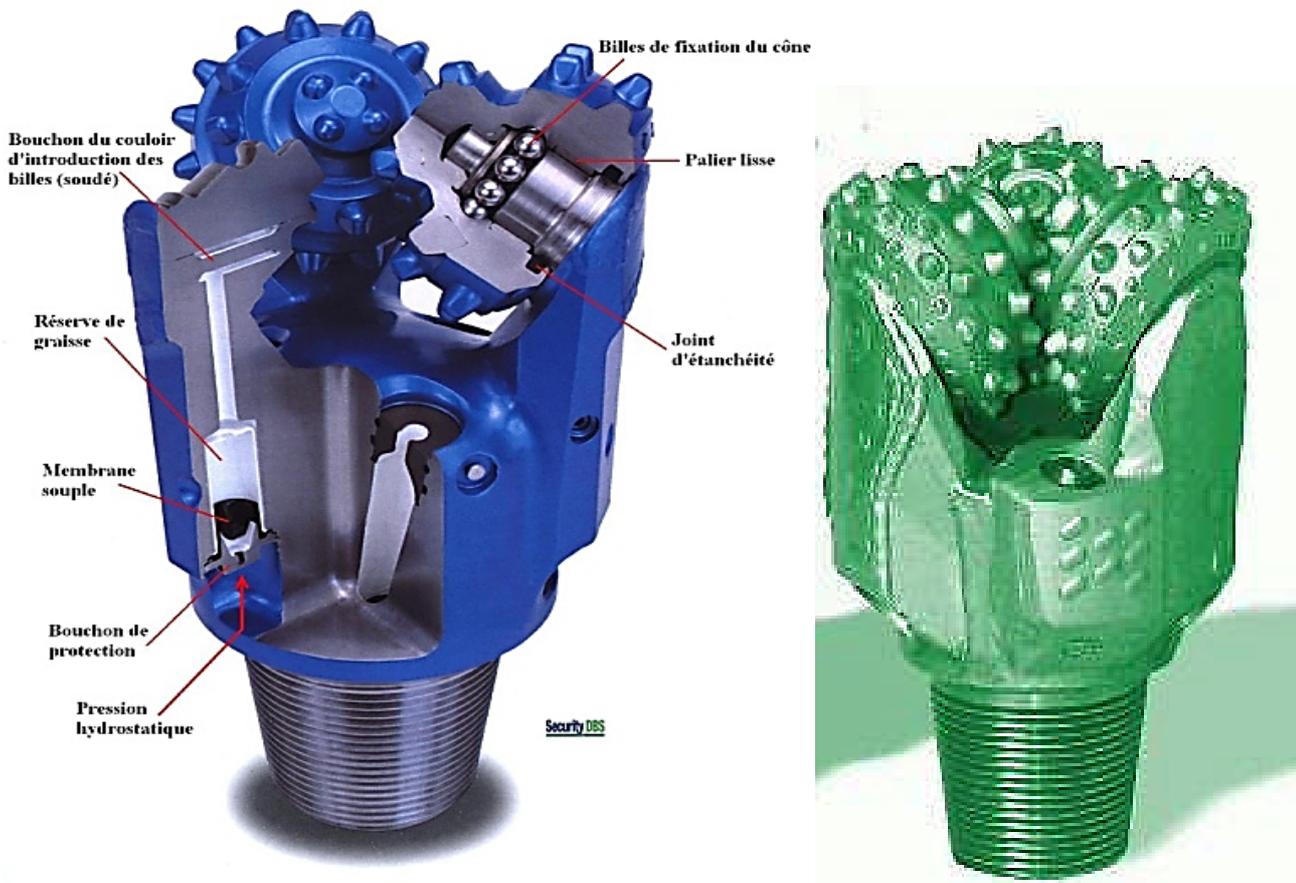


Figure 20 : Les outils à molettes (tricône)

III.2 Les outils à éléments de coupe fixes :

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.

III.2 1 Les outils PDC : (PolycristallineDiamond Compact)

En 1971, General Electric a réussi à faire la synthèse du diamant en laboratoire à partir d'un mélange de graphite, de nickel et de cobalt soumis à des conditions de pression et de température très élevées (100 000 bar et 1 500 °C). La fine couche de diamant, grâce à la présence de cobalt, peut être fixée sur un support en carbure de tungstène. Le produit obtenu est appelé **stratapax** ou compact

Les diamants obtenus par synthèse sont polycristallins (d'où le nom de **PDC** : Poly-cristalline Diamond Compact) : la couche de diamant ainsi formée est constituée de petits cristaux qui se sont développés dans des directions aléatoires (structure comparable à celle du carbonado). Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également de liant entre les cristaux. Cette structure poly cristalline confère au diamant synthétique une résistance à la compression et à l'usure plus élevée que celle du diamant naturel.

La couche de diamant s'use par micro-écaillage, ce qui entraîne un auto-affûtage du PDC qui maintient l'efficacité de l'arête de coupe. Les performances du taillant seront donc peu ou pas diminuées au cours de la vie de l'outil.



Figure 21 : Les outils à diamant (PDC)

Cependant, les coefficients de dilatation thermique du liant et du diamant sont très différents (coefficient du liant beaucoup plus élevé). A partir de 400 °C, la dilatation différentielle des différents constituants produit la rupture des liaisons entre cristaux et le PDC perd progressivement sa résistance, la structure n'est plus stable aux environs de 750 °C. Il est donc essentiel de maintenir le PDC à une température la plus faible possible.

Les premiers compacts à être synthétisés avaient un diamètre de 8 mm, actuellement on sait fabriquer des compacts de 2 pouces. Les diamètres les plus couramment utilisés sont 0.5", 0.75" et 1 pouce. Les compacts peuvent être brasés sur le corps de l'outil ou peuvent être fixés sur des supports cylindriques de carbure de tungstène (figure 15) emmanchés en force à chaud dans le corps de l'outil.

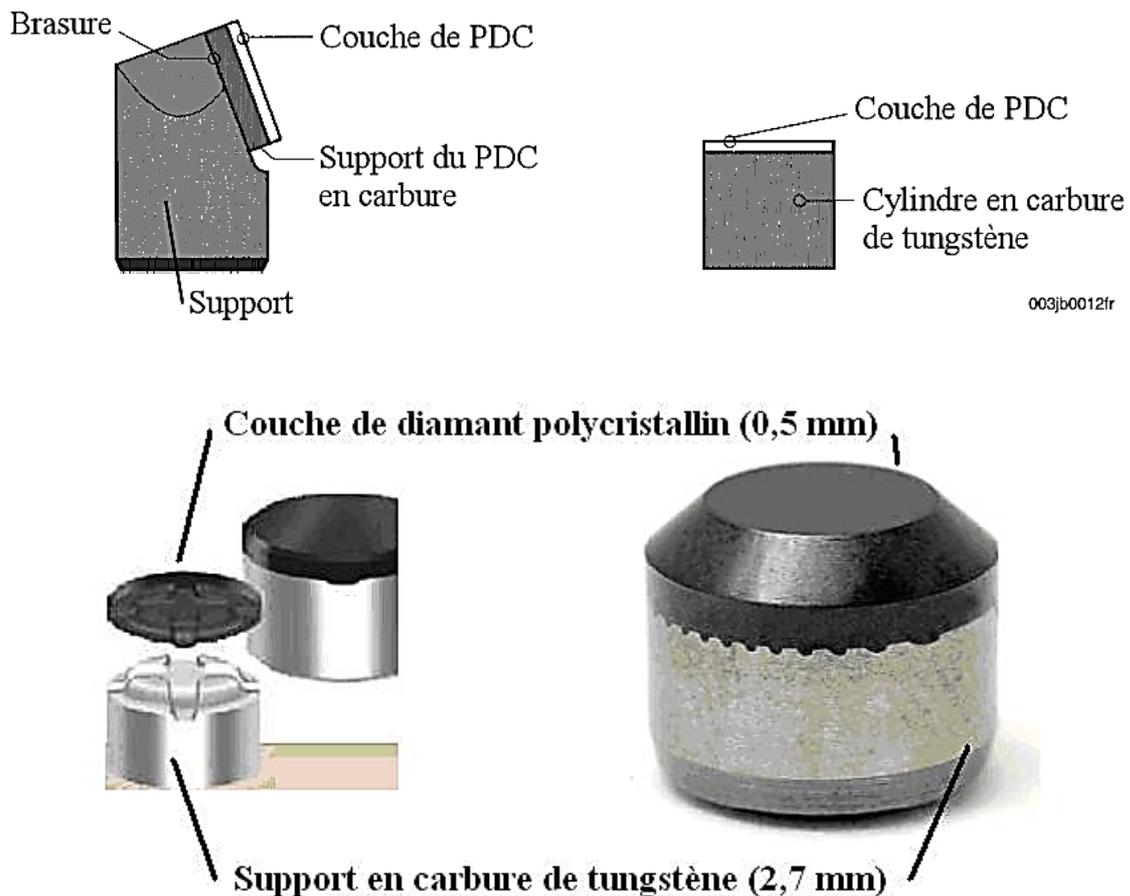


FIG. 22 : Structure d'un PDC

III.2.2 Les TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Pour pallier à l'instabilité thermique des PDC, General Electric a mis au point un diamant synthétique où le catalyseur est éliminé par acidification. Le produit obtenu est stable jusqu'à des températures de l'ordre de 1 200 °C. Cependant l'élimination du cobalt fait qu'il n'est pas possible de fixer le diamant obtenu sur un support quelconque. Le TSP devra être maintenu en place mécaniquement comme le diamant naturel.

Il existe un autre procédé de fabrication où le cobalt et le nickel sont remplacés par du silicium. Le produit obtenu est encore plus stable du point de vue thermique, mais comme dans le cas précédent, il ne peut pas être fixé sur un support.

Les TSP sont disponibles sous plusieurs formes :

Triangulaire dont la taille est de l'ordre de 3 pierres par carat. Il est utilisé pour forer des formations moyennement dures.

Disque dont la taille est de l'ordre d'une pierre par carat. Il est utilisé pour forer le même type de formation mais est plus performant dans les situations où une plus grande résistance à l'usure et au choc est demandée. Cette forme permet d'avoir une vitesse d'avancement et une durée de vie plus élevées dans des formations dures et abrasives ou fracturées.

Les TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïque de la dimension des PDC. Cette structure a permis d'augmenter la vitesse d'avancement et d'allonger la durée de vie de l'outil dans des formations tendres, abrasives et dans les intercalations d'argiles et de roche plus dures, là où les PDC n'étaient pas rentables.



Figure23 : outil TSP

Le TSP présente de nombreux avantages sur les autres types de diamant :

- Il résiste mieux à la température que le PDC.
- Grâce à sa structure polycristalline, il résiste mieux au choc que le diamant naturel (à l'exception du carbonado qui est également polycristallin).
- Son usure irrégulière produit des faces tranchantes alors que le diamant naturel s'émousse. De ce fait, les performances des TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil.

En définitive, le TSP a l'efficacité du PDC et la résistance à la température du diamant naturel.

III.3 Désignation d'un outil PDC :

On désigne un outil par :

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

III.3.1 Le corps de l'outil :

Il existe deux types de corps d'outils :

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



Corps en acier



Corps en carbure de tungstène

Figure 24 : les types d'outils en PDC

III.3.2. Steel body :

Les outils utilisent des cutters PDC type périscope qui est sortis directement dans le corps acier sans aucun brassage.

La protection du diamètre de l'outil se fait en sortant des studs en carbure de tungstène sur toute la hauteur de la cage extérieure.

III.3.2.1 Les avantages de 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.

III.3. 2.2 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.

III.3.3. Matrix body :

Les outils sont équipés de cutters cylindriques qui sont directement basées dans un évidage qui a été aménagé dans le corps d'outil.

III.3.3.1- 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.

III.3.3.2- Les inconvénients de 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.

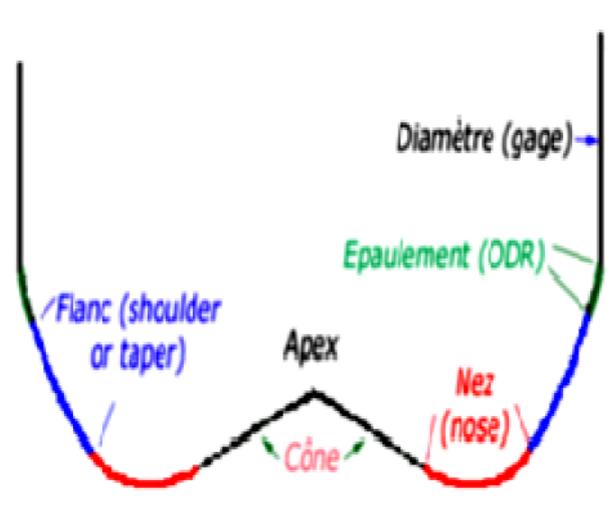
III.4.Le profil :

Une grande variété de profils d'outil existe.

Pour chacun de ces groupes, les variations de profil permettent d'associer le volume des taillants en rapport avec la dureté de la formation et la conception de l'hydraulique pour l'évacuation des déblais.

Le profil d'un outil a une influence directe sur :

- La stabilité de l'outil
- La manœuvrabilité de l'outil (steerability)
- Le nombre de taillants
- La durabilité de l'outil
- La vitesse d'avancement
- Le nettoyage et le refroidissement de l'outil



-Caractéristiques des Profils

Le profil de l'outil consiste en

- Apex (centre géométrique de l'outil)
- Cône
- Nez
- Le flanc (shoulder ou taper)
- L'épaulement (ODR)
- Le diamètre (gage ou gauge)

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.

III.4.1.Le profil plat :

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

III.4.2.Le profil double cône :

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

III.4.3.Le profil parabolique :

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

III.5.Densité des cutters :

Il est possible d'effectuer des mesures qualitatives 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.

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

III.5.1 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).

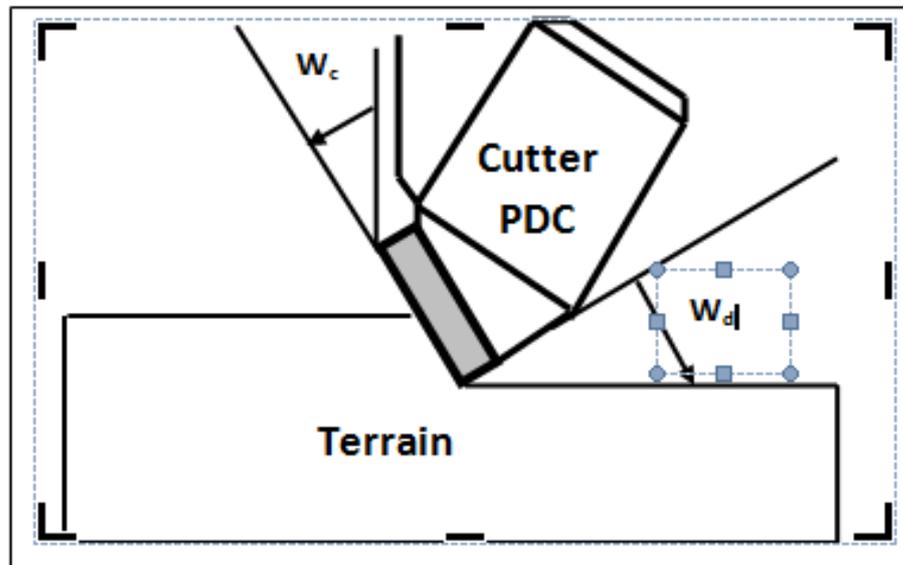


Figure 25 : Angles caractéristiques d'un PDC

III.5.2 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).

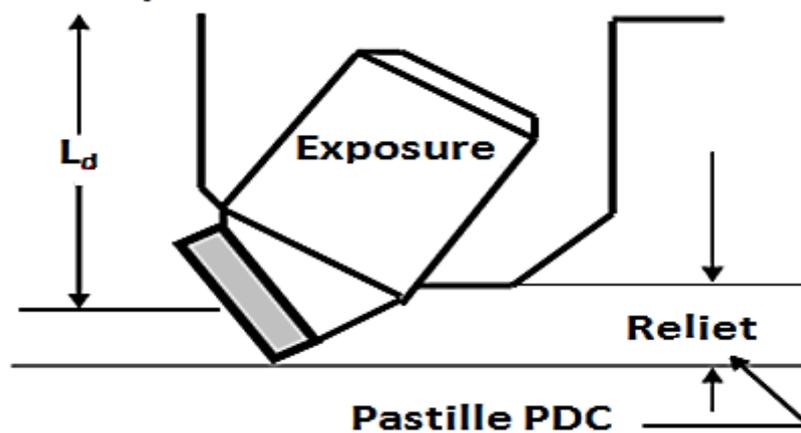


Figure 26 : Longueur utile L_d

III.6. Mode de travail des outils :

III.6.1 Mode de travail d'un outil 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.

III.6.2 Mode de travail d'un outil PDC :

Les efforts appliqués sur le cutter :

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

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

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

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

Tous les points de l'outil PDC décrivent dans son mouvement des cercles concentriques, en particulier chacun des éléments de l'outil, qui est maintenu enfoncé dans la roche sous l'effet de la charge verticale, repousse dans ce mouvement de rotation un élément de roche, dont

l'épaisseur est égale à la profondeur dont il s'est enfoncé, et à chaque instant il écrase un élément nouveau de roche vierge.

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

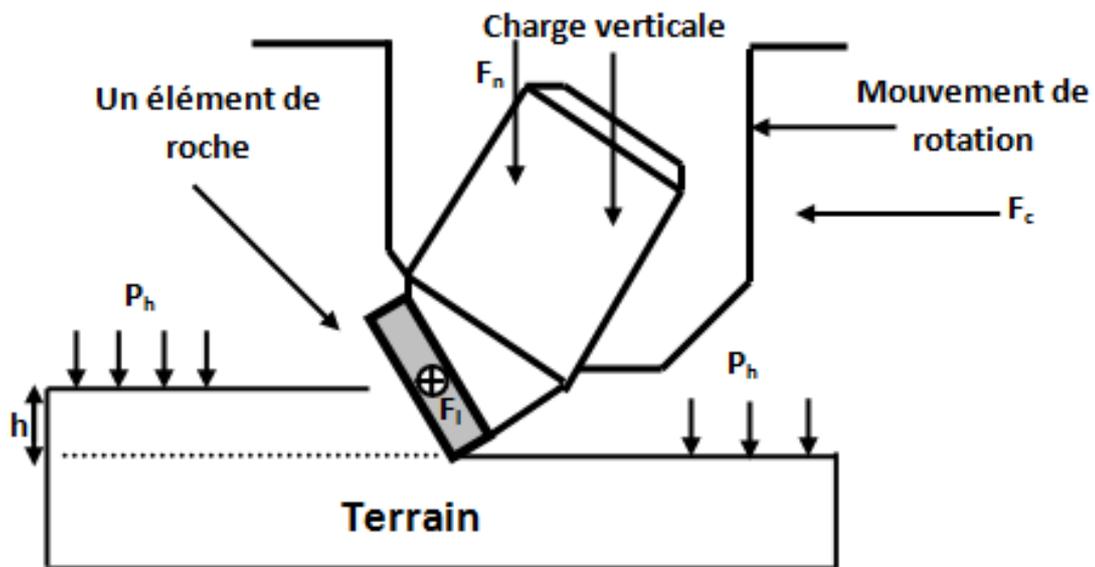


Fig.27:Principe de fonctionnement d'un outil PDC

III.7.Classification des outils à éléments de coupe fixes

Les fabricants des outils PDC produisent une grande gamme d'outils, de toutes dimensions, conçus pour différentes applications. L'institution d'un codage commun pour les outils de forage à éléments de coupe fixes est une aide à l'évaluation et la comparaison des outils au regard des conceptions, des pratiques opérationnelles et des performances. La classification facilite également la sélection du produit.

Sept critères de classement sont employés pour identifier un outil à éléments de coupe fixes :

- type de taillants (diamants, PDC, TSD)
- type de corps (acier, matrice)
- profil de l'outil
- caractéristiques hydrauliques

- position des taillants
- taille des diamants
- densité des taillants.

La classification est représentée par un code à quatre caractères:

1. **Une lettre** pour le type de taillant et de corps
2. **Un chiffre** pour le profil de l'outil. Ce chiffre indique le profil général de l'outil et varie de 1 (profil long) à 9 (profil plat).
3. **Un chiffre** pour le type d'hydraulique.
4. **Un chiffre** pour la dimension (cutter size) et la densité des taillants (cutter density).

III.7.1.Premier caractère

Le premier caractère est une lettre qui définit le type de diamant utilisé comme élément de coupe et le matériau constituant le corps de l'outil

- **D** : désigne un outil à diamants naturels à corps fritté (matrice en carbure de tungstène).
- **M** : désigne un outil PDC à corps fritté (une matrice en carbure de tungstène).
- **S** : désigne un outil PDC avec un corps en acier.
- **L** : désigne un outil TSD à corps fritté (une matrice en carbure de tungstène).
- **O** : désigne les autres types d'outils qui seront développés dans le futur.

Si l'outil comporte plusieurs types de diamants (naturels, PDC, ...), un seul type est élément de coupe, les autres ont en général une fonction de protection

III.7.2. Deuxième caractère

Le deuxième caractère est un chiffre allant de 1 à 9 qui définit le type de profil de l'outil.

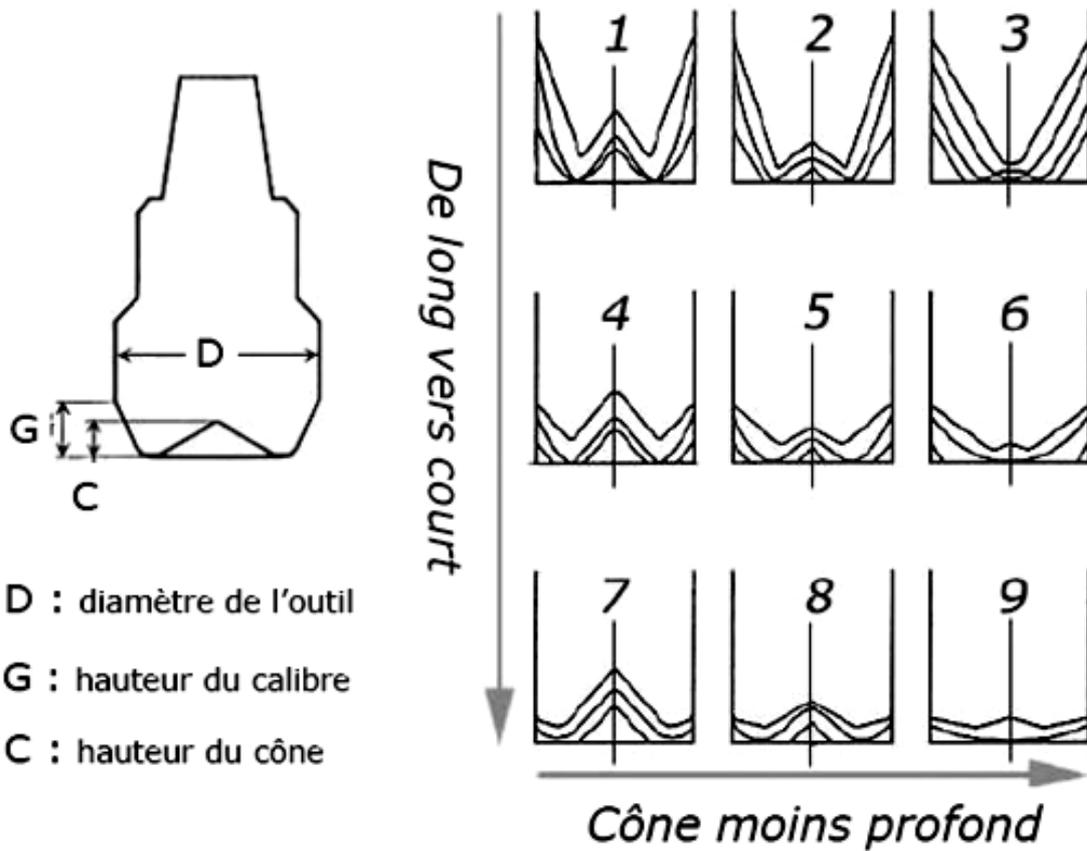


Figure 21 : type de profil

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

Tableau 4 : Type de profil

III.7.3. 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 d'usage ou le type d'écoulement et par le placement des éléments de coupe (voir tableau).

		Type de usage		
		Duses interchangeables	Duses fixes	Conventionnel
Placement des éléments de coupe	Lames (*) (Blades)	1	2	3
	Nervures (*) (Ribs)	4	5	6
	A plat (Random)	7	8	9

Tableau 5 : type d'usage

Alternativement aux codes 6 et 9 :

R : Écoulement radial

X : Écoulement transversal

O : Autre

Remarque : Ces codes s'utilisent préférentiellement aux chiffres 6 et 9 pour la plupart des outils à diamants naturels et TSD

* : La lame correspond à une surépaisseur supérieure à 25.4 mm (1 pouce) par rapport au corps de l'outil.

* : La nervure correspond à une surépaisseur inférieure à 25.4 mm par rapport au corps de l'outil.

III.7.4. Quatrième caractère

Le quatrième caractère est un chiffre qui définit la taille des éléments de coupe et leur densité.

Taille	Densité		
	Faible	Moyenne	Grande
Grande	1	2	3
Moyenne	4	5	6
Faible	7	8	9
0 : Imprégnés			

Tableau 6: Type de taille d'élément

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 à 7	3/8" à 5/8"
Faible	> 7	< 3/8"

Tableau 7: Type de taille d'élément

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.

Cependant, la dimension des éléments de coupe, leur densité et le profil de l'outil donnent une indication sur le type de formation que l'on peut forer :

- Les éléments de coupe de petite taille sont utilisés pour des formations plutôt dures (nécessité de bien couvrir le front de taille et d'avoir beaucoup de diamant en contact avec la formation), tandis que les éléments de grande taille (moins colmatables) sont utilisés pour des formations plutôt tendres.

- Les profils de type 1, 2 et 3 sont plutôt destinés aux formations homogènes (nez pointu) et abrasives forées à grandes vitesses ou à déviation importante, demandant donc plus de diamant en périphérie, tandis que les profils 7, 8 et 9 sont plutôt destinés aux formations intercalées et peu abrasives, permettant une bonne répartition des efforts de coupe lors des transitions de formations.

On peut trouver des outils chez des fabricants différents ayant les mêmes codes IADC mais destinés au forage de formations assez différentes ou au contraire des outils ayant des codes différents capables de forer le même type de formation.

Le système de codification actuel reste flou et présente quelques lacunes telles de ne pas spécifier le nombre de lames d'un outil, ou de ne pas renseigner sur le profil de la lame (droite ou spirale), ou encore le nombre de duses, les taillants de diamètres différents.

En définitive, cette classification a un intérêt limité. Dans tous les cas, il sera nécessaire de consulter les données du constructeur pour connaître les possibilités des outils car la technologie des outils à éléments de coupe fixe évolue chaque jour.

III.8. Choix des outils :

En raison de la grande variété de dureté des formations, de la trop grande variété des types d'outils, il n'est pas facile de choisir le meilleur outil pour le terrain que l'on traverse.

Dans les forages d'exploration, le terrain est un facteur inconnu et les variations souvent brusques qu'il présente ne permettent guère (sauf conditions exceptionnelles) d'adapter parfaitement l'outil à la roche. On ne peut faire que des suppositions et encore sont-elles souvent démenties par le fait. Une coopération est nécessaire à ce sujet entre le géologue et le foreur. Le géologue est en effet qualifié pour interpréter tout changement de terrain et prévoir l'importance de la nouvelle formation. De ces précisions dépend entièrement l'approvisionnement en outils ; celui-ci doit néanmoins être assez large pour parer à tout imprévu.

Par contre, dans les forages d'exploitation, les formations sont connues. On peut alors prévoir avec assez de rigueur la nature et l'épaisseur des couches à traverser et il peut y avoir une adaptation de l'outil à la roche.

Il peut exister, pour une formation donnée, plusieurs types d'outils capables d'assurer un bon service. Une étude comparative effectuée au cours des premiers forages permettra d'effectuer les autres forages d'exploitation dans des conditions excellentes de rapidité et d'économie. Le

meilleur outil est celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré le plus bas, dans de bonnes conditions techniques.

III.8.1.l'analyse de l'usure

Un outil peut être usé pour l'une des raisons suivantes :

- usure des dents à un degré tel qu'aucune action sur la formation n'est plus possible,
- perte de diamètre, qui indique une roche abrasive,
- arrondi des dents de talon de la molette ce qui diminue l'avancement et indique une roche moins abrasive que le cas précédent,
- détérioration des roulements par broyage, résultant d'une charge trop élevée (molette coincée).

Chaque type de formation a pour effet d'accentuer sensiblement l'une ou l'autre de ces causes d'usure. On peut valablement admettre :

- qu'un outil dont seuls les roulements sont usés demande à être remplacé par un outil de nuance plus tendre,
- qu'un outil dont l'avancement décroît rapidement et remonte avec des dents complètement usées, mais sans jeu excessif dans les molettes, demande à être remplacé par un outil de nuance plus dure,
- qu'un outil remonte avec une perte importante sur le diamètre, mais une usure normale au point de vue dents et roulements devra être remplacé par un outil à inserts.

Les remarques et codifications des usures vont orienter nos choix pour les outils suivants et/ou pour le programme outil du prochain puits.

Il est à noter qu'une erreur d'estimation de la dureté du terrain, c'est à dire choix d'un outil peu ou pas adapté, se traduira par une performance moyenne ou mauvaise et donc un surcoût plus ou moins important.

Plus le tricône évolue vers une application aux roches dures, plus ses caractéristiques évoluent vers une réduction progressive de l'offset jusqu'à devenir nul, et une augmentation du renforcement du talon jusqu'au regroupement des dents entre elles par des palmes.

L'observation de l'usure des outils est une bonne méthode pour adapter le programme outils aux formations forées. Actuellement, l'étude des performances se traite par zone de forabilité. Un break-even par zone de forabilité regroupant des tricônes sera alors habillé avec les usures caractéristiques à ce type de formations.

L'essai d'un autre tricône ou d'un autre outil de forage (outil diamant) se fera sur les critères suivants : longueur à forer, temps de rotation, vitesse de pénétration minimale et forme de l'usure. On se référera au tableau de décision pour choisir l'outil le mieux adapté pour le puits suivant. L'analyse des performances de cet outil ainsi que son usure pourront encore modifier le programme.

III.8.2. Choix des outils 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.

Principe :

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

$$C = [B + H (T + t)] / F$$

Avec : C = prix du mètre foré,

B = prix de l'outil,

H = prix horaire de l'appareil,

T = temps de forage,

t = temps de manœuvre (descente et remontée),

F = 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 a effectué 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 $CB < CA$.

Pour B, le seuil de rentabilité sera atteint lorsque $CB = CA$, donc :

$$CA = [BB + H (TB + tB)] / FB$$

$$FB = [BB + H (TB + tB)] / CA$$

$$FB = H TB/ CA + (HtB+ BB) / CA$$

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

$y = FB =$ longueur forée par l'outil B au seuil de rentabilité,

$$a = H / CA$$

$x = TB =$ temps de forage par l'outil B au seuil de rentabilité

$$b = (HtB+ BB) / CA.$$

Dans un repère cartésien où figurent en ordonnée la longueur forée (F) et en abscisse le temps (T), de forage le seuil de rentabilité d'un outil par rapport à un autre est donc une droite. Pour définir une droite, deux points suffisent :

$$\text{Point X : } y = 0 \quad x = -b/a = - (HtB+ BB) / H$$

$$\text{Point Y : } x = 0 \quad y = b = (H tB+ BB) / CA$$

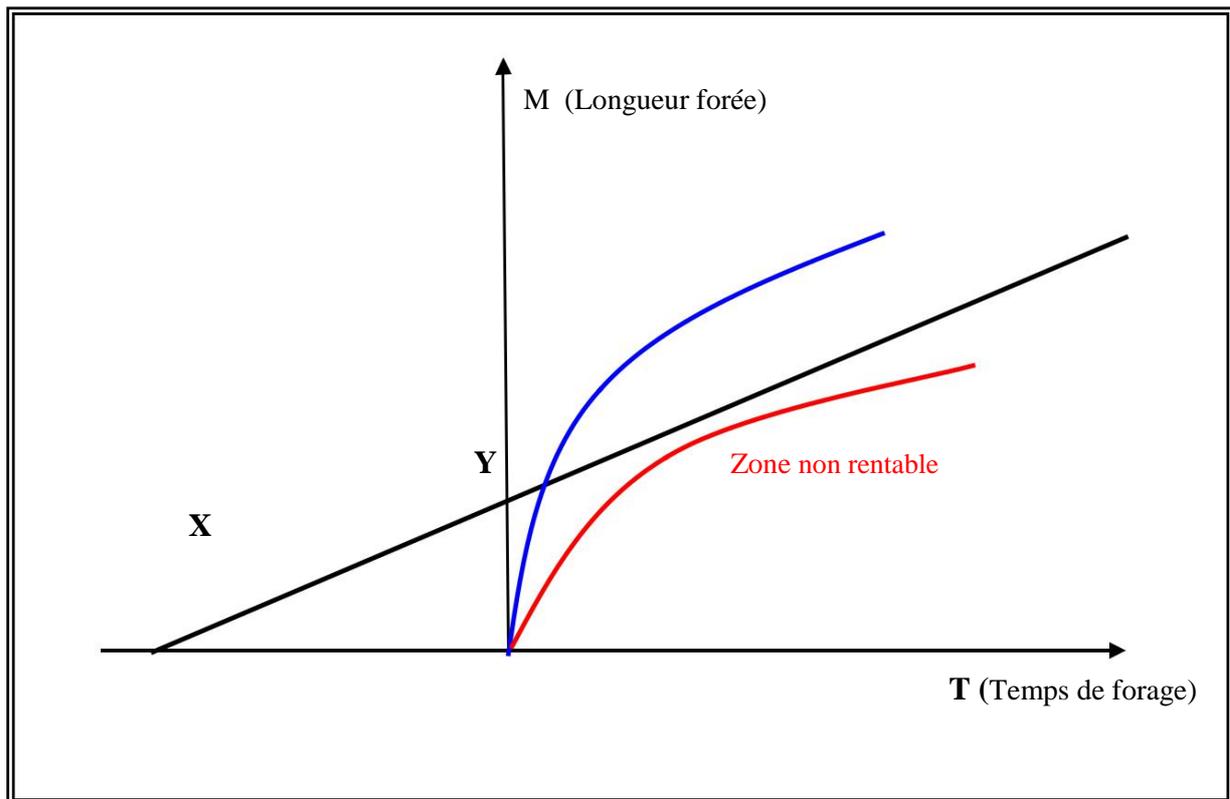
Droite de rentabilité :

Fig. 28: la courbe de rentabilité par la méthode de Break even

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 graphique, 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.

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.

III.9 Étude comparative entre les caractéristiques des outils de forage :

Caractéristique des outils tricônes	Caractéristique des fixes cutters
<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 des formations très abrasives comme le sable ou les grés. - En cas d'abrasivité, les tricônes doivent avoir le pourtour des molettes protégées (inserts éventuellement recouvert de diamant) et les bras renforcés - 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. - Il est 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 VI Processus de fabrication des outils

L'ENSP fabrique des outils en acier(Steel) et des carbure de tungstène (matrix), le produit fabriqué a toujours un document de démarrage de la fabrication qui est constitué de :

- Un bon de commande interne (BCI) avec sans plant.
- L'ordre de fabrication (OF).
- Un bon de sortie stock(BS).

Pour fabriquer un outil de forage il faut passer par plusieurs étapes :

IV.1. les premières procédures (administratives) :

Avant lancement de fabrication il faut d'abord passer par la consultation et la validation de procédures suivantes :

- Cahier de charges
- Vérification de la faisabilité
- Pacification des ordres de fabrication et confirmation

IV.1.1. la conception :

La conception se fait au niveau du bureau d'études, ils réalisent la conception d'un nouveau produit ou la rétro conception d'un outil.la première étape consiste à travailler avec logiciel 3Dcomme SolidWorks, ce dernier permet de situer le contexte dans lequel travaillera l'outil, donc il faut savoir :

- La nature des roches : dureté, type, plasticité.
- Confinement qui prend en considération la pression de la boue de pores.

La seconde étape concerne la définition de l'outil, c'est pour cela il faut savoir :

- Le diamètre de l'outil.
- Le profil.
- Les lames(le nombre des lames, les positions angulaires)
- PDC (leurs diamètres, leur positionnement).

Après on passe à la simulation sur solides Works, c'est une phase qui constitue le traitement de la forme de l'outil, la simulation des contraintes (mécanique, thermique et hydraulique) et ce model sera validé par trois types d'analyse :

- Analyse de la résistance des matériaux (RDM) par CamWorks.
- Analyse hydraulique avec cosmos Works.
- Analyse des fluides par flou Works.

IV.1.2. la fabrication :

Dans la fabrication des outils à pastilles diamantées poly cristallines(PDC), on distingue qu'il existe deux principales méthodes :

- Soit outil avec un corps acier.
- Soit outil avec un corps en matrix (à base de carbure de tungstène)

Les outils diamantés sont classés selon le diamant utilisé, et ce dernier est choisi selon l'endroit d'application de cet outil (formation du sol).le classement est comme suite :

- A diamants naturels : pour la formation tendre, dure et pour un forage rapide ; car il travaille par écrasement
- A diamants synthétique a taillants PDC (poly cristalline diamant compact), a taillants TSP (diamant poly cristallins thermostable) : pour la formation très dure et consolidées ; car il résiste à l'impact et à l'abrasion.
- A blocs imprégnés : pour les roches abrasives et non abrasives très dur, formation très fracturées

IV.2.Fabrication d'un outil à corps en acier (STEEL BODY) :

Désignation de l'outil :SP619A ϕ 8''^{1/2}

- SP : Lames spiralées.
- 6 : 6 Lames.
- 1 9 : diamètre des PDC 19mm.
- A : Acier (Steel Body).
- ϕ 8''^{1/2} : Diamètre extérieur

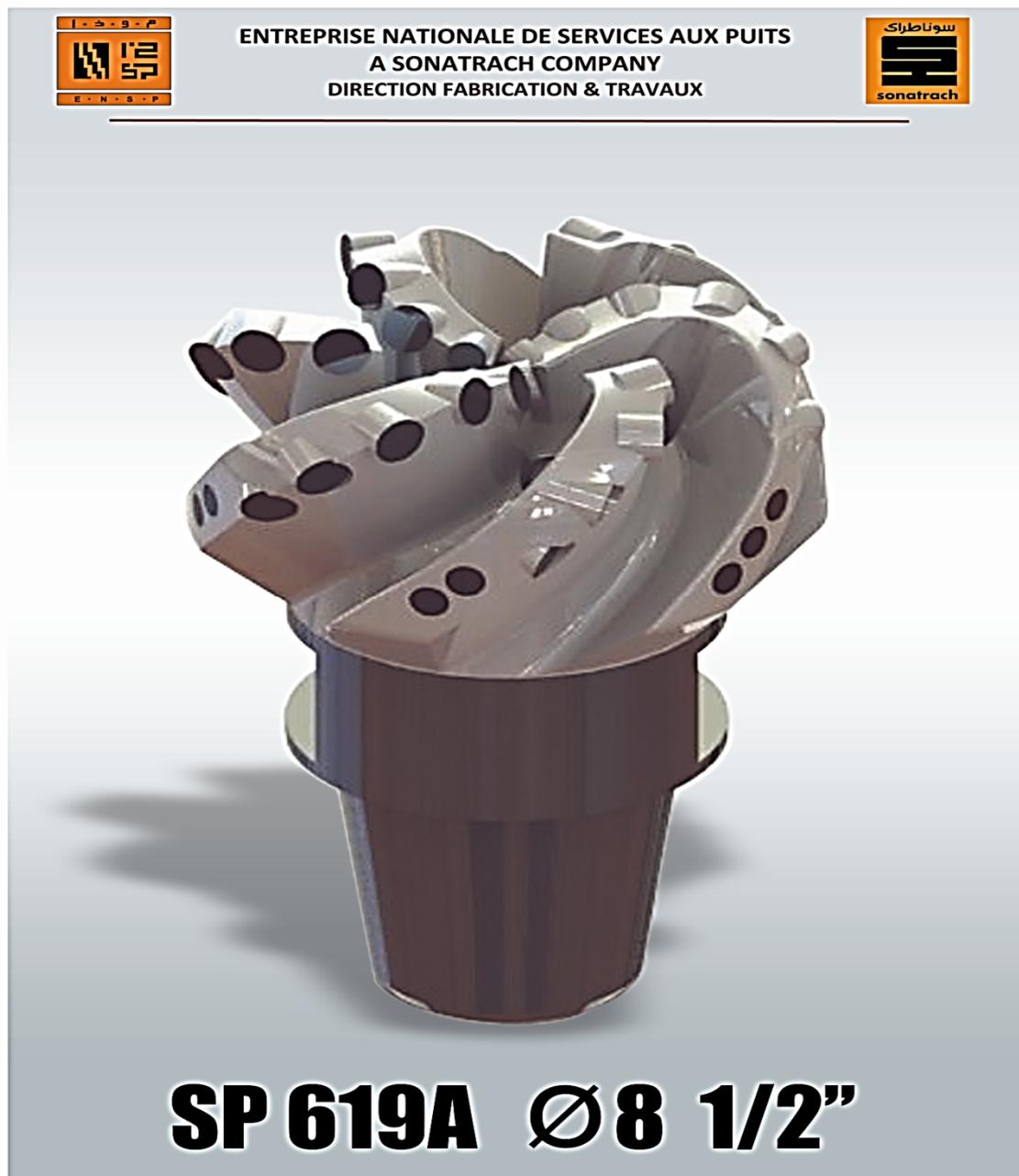


Figure 30 :corps en acier "STEEL BODY"

IV.2.1. Usinage de la tête en acier :

L'usinage de la tête de l'outil de forage pétrolier, nécessite un centre d'usinage 5 axes.

Un brut d'acier est usiné sur un tour numérique pour préparer la tête de l'outil afin de l'usiner sur le centre d'usinage.

A ce stade, le filtrage mâle API est usiné ainsi que le diamètre intérieur du passage principal du fluide.

Les machines 5 axes usinent la géométrie du corps, y compris les canaux d'irrigation (water way), les lames, les logements des dents (cutter pockets), les trous de duses et filtrages.

Le bit shank, lui-même, est usiné sur un tour numérique.



Figure 32: bit shank



Figure 31 : usinage de la tête

IV.2.2 Profilage des lames et ajustage des alvéoles :

Dans le but de donner le profil demandé par les concepteurs, casser des angles vifs des arêtes des lames.



Figure 33 : l'opération de profilage

IV.2.3 Sablage et graphitage :

Le sablage est une technique de nettoyage des surfaces en utilisant un abrasif (sables corindon) projeté à grande vitesse.

Mise des plots de graphite (Dans les logements des PDC et des duses) servant à protéger toutes les alvéoles et les trous de nez contre la métallisation.

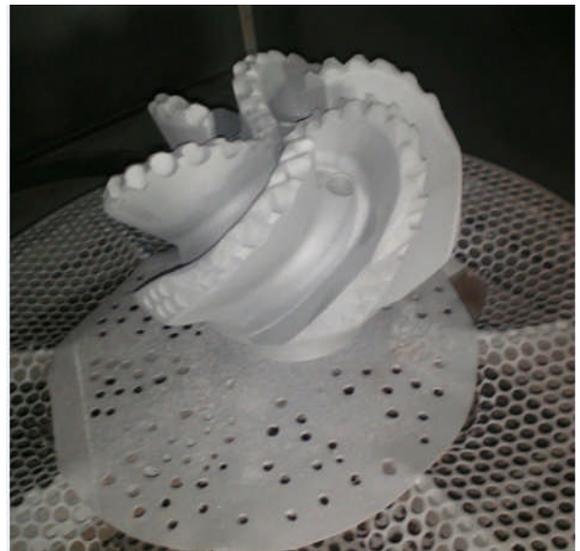


Figure 34 : sablage

IV.2.4. hardfacing et métallisation :

a)- Soudage du bit shank et rectification du cordon

Les étapes de soudage et rectification sont :

- Effectuer un préchauffage préalable lent à 150°C.
- La torche MIG (métal inerte gaz) est placée à fleur de la gorge, ensuite on fait déposer le fil de soudure par rotation.
- Vissage des sleeves (tiges filetées) du dispositif de centrage dans les duses.
- Vissage de l'outil à la main sur l'emprunt du four
- Soudage des têtes de tiges filetées sur le plateau après réglage de la hauteur des tiges filetées
- Rectification jusqu'à la bonne cote.



Figure 35 : soudage de bitshank avec la tête

b)-Projection thermique :

Pour assurer une bonne adhérence du rechargement dur à base de carbure de tungstène, il est nécessaire de déposer par projection thermique une poudre (base Nickel) ; L'opération est réalisée en deux étapes ; chauffage et dépôt de poudre d'accrochage avec une température moyenne variante entre 150°C et 300° C.



Figure36 :l'opération hardfacing

c)- Le rechargement dur (hardfacing) :

C'est le dépôt de particules de carbures de tungstène sur la tête dans le but d'améliorer sa résistance à l'abrasion en utilisant le fil de métallisation. On chauffe le fil enrobé jusqu'à fusion de l'élément Nickel constituant l'âme de la baguette renforcée par un flux, puis dépose la goutte contenant le carbure de tungstène. Le matériau utilisé : fil hardfacing 4mm type CN (WC/Ni-Cr)..



Figure 37: métallisation

IV.2.5 Dégraphitage et alvéolage :

Le dégraphitage et le nettoyage des alvéoles sont effectués à l'aide d'une micro-meule diamantée. Pour enlever les plots de graphite utilisés pour protéger les différentes parties concernées par l'opération de brasage ultérieur des PDC.

Alvéolage : contrôle au go-no go, ce dernier peut éventuellement rentrer mais pas tourner.



Figure 38: alveolage

IV.2.6 Brasage des PDC sur la tête :

Le brasage est l'opération d'assemblage des différents taillants en PDC sur les alvéoles (Logements des PDC).

IV.2.6.1 Les étapes de brasage sont :

- ❖ Préparation des PDC dans l'ordre du nez à la garde et lame par lame.
- ❖ Préparation des baguettes de brasure, en les enduisant de flux.
- ❖ Chauffer la lame en même temps sur le dos jusqu'à atteindre le rouge vif cerise.
- ❖ Remplissage de chaque alvéole de brasure et positionnement des PDC dans leurs alvéoles.
- ❖ On fait fondre la brasure au contact des bords de l'alvéole en réchauffant et en faisant tourner le pdc
- ❖ Nettoyage des excès de brasure à la meulette.

IV.2.6.2 Sablage après brasage.

IV.2.6.3 Ressuage :

- Vérifier si les PDC ne sont pas brûlés, cassés ou fissurés.
- Vérifier si les PDC sont bien positionnés.

Produit utilisés :

- Bouteille cleanerremove SKC S
- Bouteille pénétrant fluorescent ZL-60C
- Bouteille révélateur SKD-S2

IV.2.7 Finition :

Les opérations de finition de l'outil après brasage sont la rectification et l'installation des duses et la peinture

IV.2.7.1 Rectification :

- Positionnement sur la rectifieuse, entre emprunt et contre poupée.

Rectification à la meule diamantée sous arrosage (l'outil et la meule sont en rotation opposée)

- Vérification de diamètre à l'aide de bague go no go.

IV.2.7.2 Installation des duses :

- Préparation de l'outil, des sleeves, des duses et de la selle, vérification de la chambre pour duses (dégraissée et propre)
- Placer les duses dans leurs logements.
- Visser les duses à fond au moyen de la clé manuellement.

IV.2.7.3 Peinture, codage et emballage :

Cette opération consiste principalement à coder l'outil pour identifier ses performances lors de son utilisation dans les conditions de forage désignées

IV.3.Fabrication d'un outil a corps en Carbure de tungstène (MATRIX BODY) :

Les corps en carbure de tungstène sont fabriqués par moulage, un composé de poudre à base de carbure de tungstène et avec des liants sont moulés autour d'un manchon en acier. Les liants lient les particules en poudre et facilitent l'adhésion métallurgique entre le carbure de tungstène et le manchon en acier.

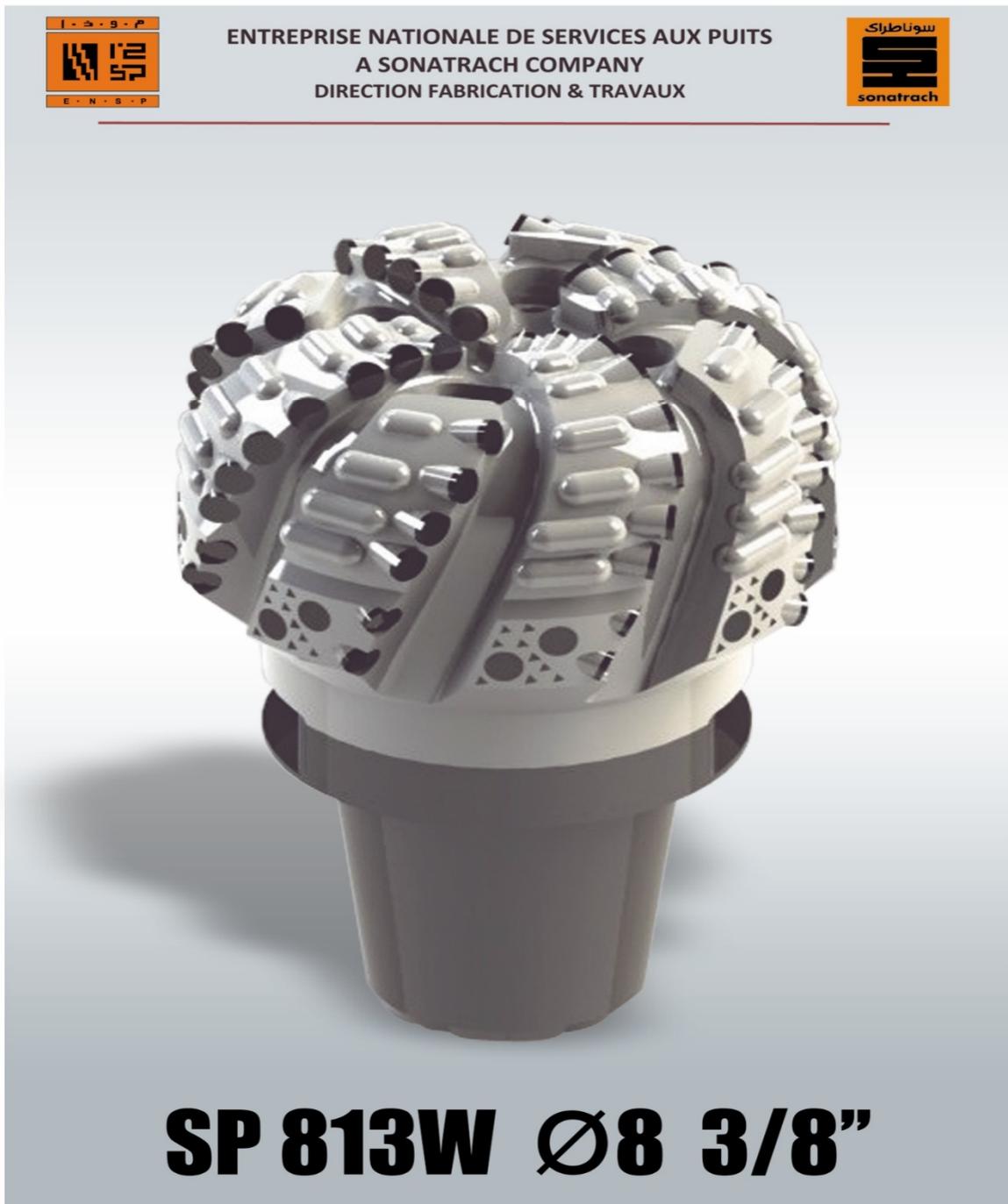


Figure 39 : corps en matrice (matrix body)

- SP : Lames spiralées.
- 8 : 8Lames.
- 13 : diamètre des PDC 13mm.
- W : Tungstène (MATRIX BODY)
- $\phi 8''1^{3/8}$: Diamètre extérieur 8.375inch

C'est un outil de forage pétrolier, dont le corps est un carbure de tungstène, contenant 8 lames droites et 33 blocs imprégnés, destiné à creuser verticalement entre 2477m jusqu'à 2528m

la fabrication d'un outil de forage 8 pouces se fait en plusieurs étapes successives, elles se résument à la fabrication du moule de l'outil et les parties en aciers complémentaires



Figure 40: composant du moule pour la fabrication de l'outil de forage

L'outil se compose de deux parties de composants : des composants en graphite (la cuve, water ways, crowfoot, l'anneau) et des composants en acier (blank et bitshank)

IV.3.1. débitage graphite :

La fabrication commence par le découpe des lingots de graphite de différents diamètres lesquels sont achetés et stockés dans un parc, pour l'outil **SP 813WØ8 3/8"**, on utilise un diamètre de 180mm, et cela pour confection des éléments du moule

IV.3.2. tournage de graphite :

Après le troçonnage du brut, la réalisation du profil du moule se fait par tournage. Pour ce qui est de l'outil de forage **SP 813WØ8 3/8"**, la préparation de la cuve, la bague, l'anneau, ainsi que le blank et bitshank nécessitent une opération de tournage et de filetage, le blank présente un filetage extérieur et le bitshank un traudage (filetage intérieur), et ces deux parties s'emmanchent lors de l'assemblage des parties de l'outil de forage.

IV.3.3. plotting :

La partie plotting consiste à fixer les éléments en graphite dans la cuve (water ways et leurs rallonges, crowfoot), elle procède également au sertissage des blocs imprégnés puis à l'assemblage.

- **Les outils utilisés :** - une colle (adhésive)
 - Une pâte argileuse
 - Une scie électrique



Figure 41 : plotting

IV.3.4 Usinage et préparation de la monture en acier de l'outil :

- Usinage au tour numérique du "Blank Body" appelé aussi "steelblank".
- Fixation des lames par soudure sur le corps.
- Mise en place du blank dans le moule

IV.3.5 Remplissage et préparation du moule :

- Remplissage de la partie frontale (face d'attaque) du moule en graphite par le carbure de tungstène de type HARD Réf P265 qui est de la poudre métallique pré-mélangée type dure, quantité utilisée=20.14 Kg.



Figure 42 : moulage

- Remplissage de la partie supérieure (face destinée à former le diamètre) par une poudre de tungstène moins dure que celle de la face d'attaque, type poudre métallique SOFT Réf P170, quantité=2 Kg.
- On utilise la poudre Hard (dure) sur la face d'attaque car c'est elle qui est en contact direct avec la formation, et qui est soumise aux contraintes (Frottement, abrasion ...) tant dit que la partie de la garde est moins exposée à ces contraintes donc une poudre moins dure (SOFT) suffit, qui facilite aussi l'opération de tournage lors de la rectification de l'outil.
- Ajout d'un liant (BINDER) et afin d'agglomérer en masse solide la poudre de carbure de tungstène. Quantité utilisé=10 Kg.

- Le moule est posé sur un support vibreur, et au moment du remplissage on soumet ce dernier à des vibrations qui permettent de faire pénétrer et homogénéiser le remplissage.

IV.3.6 Préchauffage :

Un préchauffage est effectué avant le passage au four et ce afin d'éliminer les impuretés



Figure 43 :préchauffage

IV.3.7 Passage au four :

- Le mélange est passé dans un four à hydrogène jusqu'à 985°C , et est maintenu à cette température pendant 20min.
- ensuite le refroidissement jusqu'à 880°C , puis maintenu aussi à cette température pendant 01 min.
- Après refroidir l'ensemble lentement jusqu'à la température ambiante.

IV.3.8 Dégraphitage et sablage :

Après la sortie du four, on enlève le moule en graphite avec un marteau piqueur et un marteau, puis l'outil est mis au sablage pour nettoyer la surface.

IV.3.9 Alvéolage :

On procède à l'alvéolage des logements des PDC à l'aide d'alésoir en diamant.

IV.3.10 Brasage des PDC au corps de carbure de tungstène :

Le brasage est l'opération d'assemblage des différents taillants en PDC sur les alvéoles (Logements des PDC).

IV.3.11 Ressuage :

- Vérifier si les PDC ne sont pas brûlés, cassés ou fissurés.
- Vérifier si les PDC sont bien positionner.

IV.3.12 Finition :

Les opérations de finition de l'outil après brasage sont la rectification et l'installation des duses.

IV.3.12.1 Rectification :

- Positionnement sur la rectifieuse, entre emprunt et contre poupée.
- Rectification a la meule diamantée sous arrosage (l'outil et la, meule sont en rotation opposée)
- Vérification de diamètre à l'aide de bague go-no go.

IV.3.12.2 Installation des duses :

- Préparation de l'outil, des sleeves, des duses et de la selle, vérification de la chambre pour duses (dégraissée et propre)
- Placer les duses dans leurs logements.
- Visser les duses à fond au moyen de la clé manuellement.

IV.3.12.3 Peinture, codage et emballage :

Cette opération consiste principalement à coder l'outil pour identifier ses performances lors de son utilisation dans les conditions de forage désignées.

Chapitre V Interactions roche/outil et efforts de coupe

La connaissance des propriétés des roches, en tant que matériaux à usiner, est à la base de l'étude des modes de destruction de celles-ci : elle est aussi à la base de l'étude des modes de détérioration des outils. Elle est également très utile dans la recherche des facteurs de rendement dans les opérations de forage.

V.1. Caractéristiques des roches en tant que matériaux à détruire :

V.1.1 La dureté :

La notion de "dureté" d'une roche, sur un chantier de forage, traduit en fait pour l'opérateur la résistance que celle-ci offre à l'avancement de l'outil et ceci de façon tout à fait empirique.

Il existe cependant une définition de la dureté des roches : celle de l'échelle de MOHS, telle que chaque minéral de roche soit rayé par le minéral de roche de degré supérieur. Dans cette échelle, le quartz qui est l'une des roches les plus dures que l'on rencontre effectivement dans les forages, a le degré de dureté 7 alors que le diamant a le degré le plus élevé égal à 10. (Voir tableau 8)

La dureté suivant MOHS traduit une résistance de la roche à la pénétration, par rayage. Il est rare qu'un outil réel détruise la roche uniquement par rayage (sauf parfois avec l'emploi d'outils diamant). Il est rare également qu'une roche soit pratiquement composée d'un seul minéral, la notion de rayage devient beaucoup plus compliquée dans le cas de roches constituées de plusieurs minéraux de duretés différentes.

La dureté d'une roche suivant MOHS ne peut donc traduire la résistance à la pénétration d'un outil, par contre la dureté MOHS d'un minéral de roche a une influence directe sur l'effet abrasif de la roche sur l'outil.

Echelle de dureté Mohs			
Dureté	Minéral	Dureté	Minéral
1	le talc	6	l'orthose
2	le gypse	7	le quartz
3	la calcite	8	la topaze
4	la fluorine (ou fluorite)	9	le corindon
5	l'apatite	10	le diamant

Tableau 8: Echelle de dureté Mohs

V.1.2 Résistance à la pénétration statique :

Pour un métal, la dureté est mesurée par la déformation plastique provoquée dans ce dernier par l'enfoncement, sous une charge déterminée, d'un poinçon en matériau très dur et de forme déterminée : par exemple sphérique, ou conique, ou pyramidale.

Lorsqu'on présente sur une roche un poinçon que l'on charge à sa partie supérieure lentement avec des poids croissants (figure 48), on remarque que le poinçon, à partir de sa mise en contact avec la roche ; s'enfonce d'abord imperceptiblement, puis au-delà d'un certain seuil de la charge, d'une façon beaucoup plus importante lorsque la charge croît, et à peu près proportionnellement à celle-ci ; si l'on continue à accroître la charge, l'accroissement de la pénétration ralentit et la profondeur de pénétration reste à peu près invariable quelle que soit la charge que l'on continue à exercer.

On voit ainsi qu'il y a une charge critique, au-dessous de laquelle il n'y a plus de pénétration possible. La valeur de cette charge critique caractérise la résistance à la pénétration du poinçon dans le matériau.

L'expérience montre que pour une roche déterminée et des poinçons différents la charge critique ne dépend que de la pression de contact du poinçon avec le matériau : celui-ci est donc caractérisé par une résistance critique à la pénétration, qui a les dimensions d'une pression.

De plus on peut définir, pour un couple poinçon-roche, la notion de rigidité par le rapport des accroissements de charge aux accroissements de pénétration, à partir du seuil de résistance critique à la pénétration ; la rigidité d'un couple poinçon-roche traduit la loi de pénétration du poinçon dans la roche à partir de la charge critique. Plus elle est faible et plus la pénétration du poinçon sera importante pour une charge donnée.

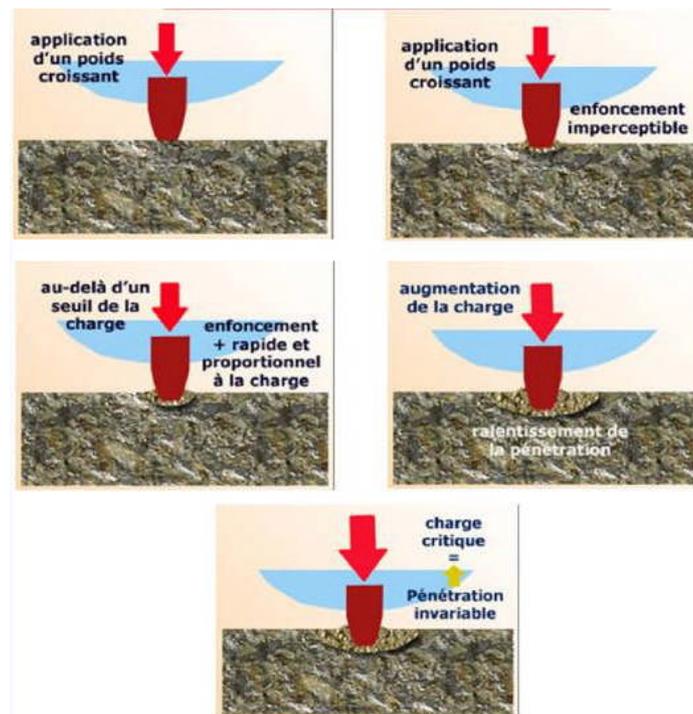


Figure 48 : Résistance à la pénétration.

Si l'on considère en première analyse qu'un outil est assimilable à un ensemble de poinçons solidaires entre eux, on conçoit que les notions de résistance critique à la pénétration et de rigidité d'un poinçon au contact d'une roche puissent être étendues aux outils eux-mêmes. La

dureté d'une roche, considérée comme résistance à la pénétration statique d'un poinçon, est donc très intéressante en tant que propriété liée aux conditions de destruction de ce matériau par forage.

V.1.3 Résistance à la pénétration dynamique :

Dans la définition précédente de la résistance de la roche à la pénétration statique du poinçon, on a supposé que la charge était appliquée lentement et progressivement de la valeur zéro à la valeur finale P supérieure à la résistance critique. Si on suppose maintenant que la charge P est appliquée instantanément au poinçon en contact avec la roche, le poinçon, sous l'effet de cette charge, pénétrera avec une certaine vitesse dans la roche, jusqu'à une certaine profondeur.

L'expérience montre que la profondeur de pénétration est plus importante, pour un même couple poinçon-roche et une même valeur de P lorsque cette charge est appliquée instantanément que lorsque la charge est appliquée lentement et progressivement de la valeur zéro à la valeur P . Dans le cas de l'application instantanée de la charge P , la durée de pénétration est fonction de la valeur de la charge P et de la rigidité du couple poinçon-roche, telle qu'elle a été définie dans l'essai de la charge P et avec la profondeur de pénétration ; elle diminue quand elle augmente la valeur de la rigidité du couple poinçon-roche.

Comme l'outil, assimilé à un ensemble de poinçons, se déplace de façon continue au fond du trou, de telle sorte qu'en chacune de ses positions son contact sous charge avec la roche ne se fait que pendant une durée finie, on peut penser a priori que la résistance à la pénétration de l'outil dans la roche est fonction de la vitesse de ses déplacements.

La pénétration statique d'un poinçon dans une roche s'accompagne d'un écrasement des éléments de roche situés sous le poinçon. On est ainsi amené à penser que la résistance critique de la roche à la pénétration statique est égale à la résistance d'écrasement, c'est à dire à la compression, et que l'on peut mesurer cette résistance par des essais mécaniques sur éprouvettes.

Si l'on procède effectivement à des mesures de résistance à l'écrasement, par exemple sur éprouvettes cylindriques, au moyen d'une presse, et que l'on classe diverses roches par résistances à l'écrasement croissantes, on obtient une bonne corrélation avec le classement obtenu dans des essais de résistance à la pénétration statique d'un poinçon. Les roches les plus

résistantes à l'écrasement sont également, en général, celles qui présentent les plus grandes résistances critiques à la pénétration.

Cependant il n'est pas possible de relier d'une façon formelle ces deux caractéristiques. La raison en est essentiellement la suivante : le contact sous charge du poinçon avec la roche engendre au voisinage de la surface de contact de celle-ci un régime de contraintes tri-axiales, alors que l'essai d'écrasement d'éprouvettes cylindriques ne fait intervenir que les contraintes uni-axiales. Du fait des différences qui existent entre les paramètres élastiques des différentes roches, il ne peut y avoir de relations formelles entre ces deux régimes de compression.

V.1.4 Fragilité et plasticité :

L'essai de pénétration statique effectué au moyen d'un même poinçon dans les diverses roches met en évidence, en dehors des valeurs respectives des résistances critiques à la pénétration et de celles des profondeurs de pénétration en fonction des charges, deux régimes de pénétration qui diffèrent suivant les roches par le caractère continu ou discontinu de celles-ci, par l'aspect des destructions qui se manifestent dans la roche au cours et à la fin de la pénétration du poinçon.

V.1.4.1 Roches dites plastiques :

Pour certaines roches - dites plastiques - la pénétration du poinçon, au fur et à mesure que la charge croît lentement, se fait de façon continue ; la destruction de la roche, sous le poinçon, se fait par écrasement ; lorsque la charge augmente, les particules écrasées peuvent être écartées latéralement, normalement à la pénétration du poinçon. Le volume de roche détruite par l'enfoncement du poinçon n'excède pas sensiblement celui de la partie du poinçon qui a effectivement pénétré dans la roche. Dans cette catégorie entrent aussi bien des roches tendres (c'est-à-dire qui offrent peu de résistance à la pénétration du poinçon), telles que des argiles ou des marnes, que des roches très dures telles que certaines dolomies.

V.1.4.2 Roches dites fragiles :

Pour d'autres roches, très nombreuses, dites fragiles, la pénétration du poinçon se fait par saccades, alors que la charge croît d'une façon continue ; chaque saccade correspond à un éclatement d'éléments de roches situés sous le poinçon, éclatement qui est suivi d'un

écrasement des éclats ainsi détachés. Lorsque le poinçon atteint sa position finale, de nombreuses fissurations latérales ont pu se produire et en général le volume de roche détruite est beaucoup plus important que celui de la partie du poinçon qui s'est enfoncé dans la roche.

Si la pénétration du poinçon, au lieu d'être produite par une charge statique est provoquée par un choc, le volume de matériau détruit, dans le cas de roches fragiles, peut être considérablement accru; la dimension des éclats augmente avec l'énergie de choc (figure 49). Au contraire, dans le cas de roches plastiques les conditions de pénétration par choc ne diffèrent pas des conditions de pénétration statique.

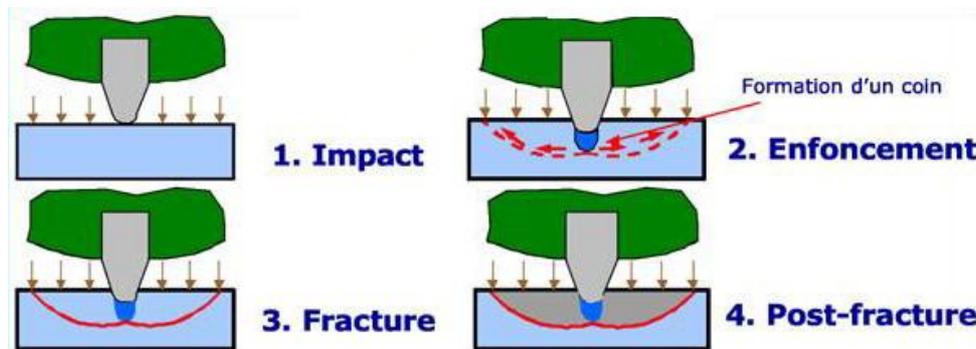


Figure 49: Action de poinçon dans une formation fragile.

V.1.5 Abrasivité :

L'abrasivité d'une roche est liée en premier lieu à la dureté minéralogique des éléments qui la constituent. Le caractère abrasif d'une roche n'intervient pas dans le processus de pénétration d'un élément d'outil dans la roche, mais intervient par le fait des modifications par usure, dans le temps, des caractéristiques géométriques ou mécaniques de celui-ci.

Cette usure peut se produire de deux façons : si la dureté minéralogique des éléments constituant la roche est plus grande que la dureté des éléments de l'outil il y aura destruction volumétrique de ceux-ci; si la dureté des éléments de roche est plus faible que celle des éléments de l'outil il y aura usure superficielle par frottement. L'usure par frottement dépend de la valeur du coefficient de frottement de la roche au contact de l'outil.

Dureté, c'est-à-dire résistance à la pénétration, fragilité ou plasticité, abrasivité constituent les propriétés essentielles qui caractérisent les roches en tant que matériaux à détruire par les

outils. De nombreuses autres caractéristiques interviennent en pratique, telles que la porosité, la perméabilité, la structure et l'orientation des différents plis constituant les formations, les contraintes que supportent les roches aux diverses profondeurs. Mais il s'agit là de caractéristiques liées plus à la technique qu'à celle de la conception et de la réalisation des outils eux-mêmes.

V.2 Attaque de la roche par l'outil :

V.2.1 Pénétration et écrasement :

La pénétration de l'outil dans la roche est une première condition de destruction volumétrique des éléments de roche ; l'analyse précédente a permis de déterminer les conditions nécessaires pour obtenir cette pénétration : il faut que la pression de contact des parties actives de l'outil avec la roche soit supérieure à un seuil, qui caractérise la roche ; la profondeur de pénétration de l'outil dans la roche augmentera avec la valeur de la charge ;

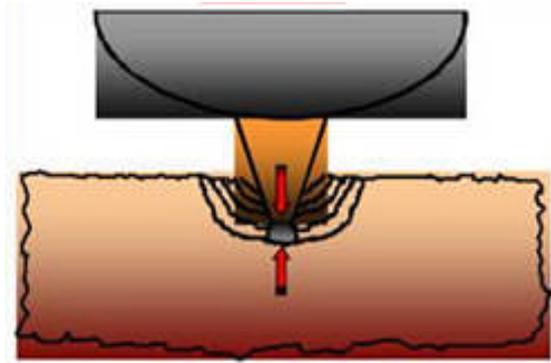


Fig 50: Pénétration et écrasement.

pour une charge donnée elle sera d'autant plus grande que la rigidité du couple roche-outil est plus faible.

Dans le forage rotatif, la force qui permet la pénétration de l'outil est le poids d'une partie du train de tiges. Ce poids est nécessairement limité. Pour avoir une pénétration effective de l'outil il est donc nécessaire que les surfaces de contact de l'outil avec la roche soient elles-mêmes d'autant plus limitées que la résistance de la roche à la pénétration est plus grande.

Par ailleurs la charge qui s'exerce sur l'outil est, si on néglige les vibrations longitudinales du train de tiges, une charge continue.

V.2.2 Coupe :

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

Si l'outil est monobloc, tous les points de l'outil décrivent dans ce mouvement des cercles concentriques ; en particulier chacun des éléments de l'outil, qui est maintenu enfoncé dans la roche sous l'effet de la charge verticale, repousse dans ce mouvement de rotation un élément de roche, dont l'épaisseur est égale à la profondeur dont il s'est enfoncé, et à chaque instant il écrase un élément nouveau de roche vierge. Si la vitesse de rotation de l'outil et la résistance de la roche sont uniformes, chaque élément d'outil, en contact avec le fond du trou, aura une trajectoire hélicoïdale dont le pas sera égal à l'avancement de l'outil par tour.

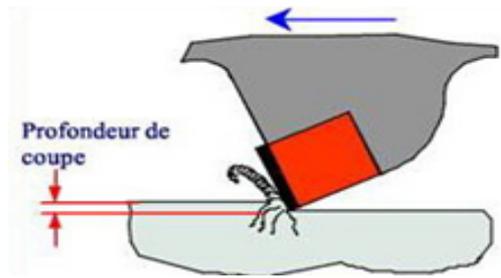


Fig.51 : Écrasement et coupe constituent le mode de travail des outils à lames.

V.2.3 Percussion :

Dans le forage rotatif l'attaque de la roche par percussion, particulièrement favorable pour la destruction des roches fragiles, ne peut être réalisée que par un agencement particulier de l'outil ; celui-ci ne peut plus être monobloc et ses parties actives doivent avoir un mouvement rotatif, par rapport au fond du trou, différent de la rotation autour de l'axe de forage ; elles doivent donc avoir un mouvement propre, générateur de percussions.

Ces conditions sont réalisées par les outils à molettes ; ces outils sont constitués d'un corps qui porte un certain nombre de tourillons, sur lesquels sont montées folles, par l'intermédiaire d'éléments roulants, des molettes munies de dents.

Lorsque l'outil appuyé sur le fond du trou par la charge verticale est entraîné dans le mouvement de rotation d'ensemble, les molettes roulent sur la roche et les dents viennent frapper celle-ci, l'écrasent, et en se dégageant font éclater des éléments.

Chaque dent travaille ainsi à la fois par burinage, par écrasement et par arrachement (**figure 52**)

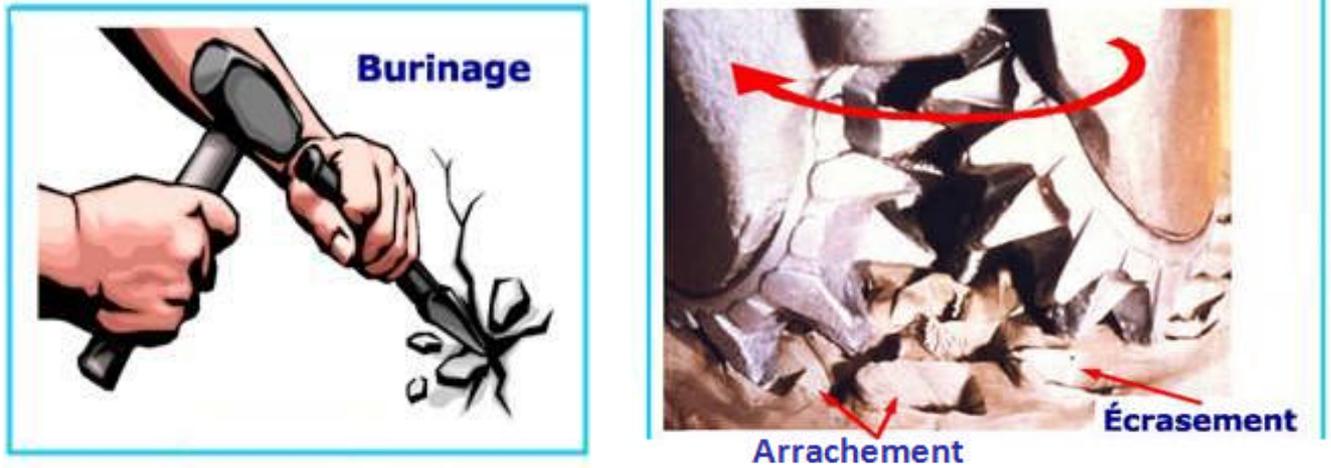


Figure 52 : Action d'un outil de forage par percussion.

V.2.4 Abrasion :

Les contacts sous charge et en mouvements relatifs de l'outil avec la roche peuvent provoquer, même si cela n'est pas recherché, une destruction volumétrique ou superficielle par abrasion et frottement aussi bien d'éléments de roche que d'éléments d'outil ; en particulier ce mode d'attaque de la roche vient très souvent s'ajouter aux modes d'attaque par écrasement, coupe et percussion.

Les frottements peuvent également faire intervenir des phénomènes thermiques, susceptibles d'accroître l'effet de destruction.

Les outils diamant sont conçus pour attaquer la roche par abrasion

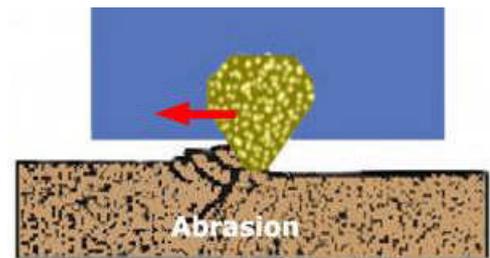


Fig. 53: Action d'un outil par abrasion.

V.2.5 .Érosion :

Bien qu'il n'existe en pratique que peu de roches qui puissent être détruites uniquement par érosion, la circulation de boue à grande vitesse, qui dans la plupart des forages rotatifs évacue les déblais de forage, peut accroître les effets de destruction des roches par l'action des outils.

Certains outils, soit à lames, soit à molettes, dits outils à jets, sont également adaptés dans ce but (figure 54).

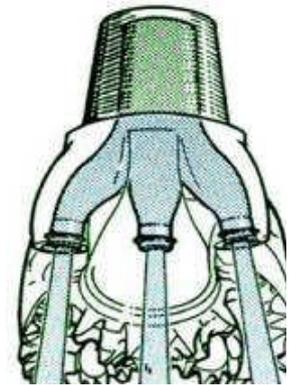


Fig. 54: Action d'un outil par abrasion.

V.3. Attaque de l'outil par la roche :

V.3.1 Réactions de la roche sur l'outil :

A un instant donné l'outil est en équilibre sous l'action des forces extérieures constituées par la charge et le couple moteur et sous l'action du système de réactions que la roche oppose à l'outil.

La connaissance de ces réactions est nécessaire pour la détermination des contraintes auxquelles sont soumis les divers éléments constituant l'outil; la connaissance de ces contraintes est elle-même très utile pour le choix des formes et dimensions, et des caractéristiques mécaniques des différentes parties de l'outil.

Toute percussion provoquée volontairement pour mieux détruire la roche doit pouvoir être supportée par la partie de l'outil qui la transmet.

En particulier les outils à molettes, qui comportent des roulements, auront à supporter des phénomènes de fatigue, qui interviennent dans le fonctionnement des paliers à roulement du fait des variations périodiques des charges et des contraintes.

V.3.2 Usures des parties actives de l'outil :

Comme déjà indiqué, le contact sous charge et un mouvement relatif de la roche et de l'outil provoquent des usures par abrasion et frottement des parties actives de celui-ci.

D'autres usures peuvent intervenir du fait du maintien en contact des parties actives de l'outil avec les déblais de forage, antérieurement détachés de la roche vierge ; ces usures dépendent ainsi des conditions d'évacuation et de remontée des déblais de forage. La boue de forage peut elle-même user par érosion certaines parties de l'outil.

V.4. Adaptation des outils aux formations :

La réalisation et l'utilisation de l'outil le mieux adapté à la destruction d'une roche donnée constituent le facteur de rendement le plus important.

Les constructeurs présentent toute une gamme d'outils de types différents dont il importe de bien connaître les caractéristiques particulières. Il importe également d'avoir bien présent à l'esprit le fait qu'un mauvais choix d'outil peut conduire, en même temps qu'à une moins bonne attaque de la roche, à une destruction soit plus rapide, soit accidentelle de l'outil.

V.5. Adaptation des paramètres de forage aux outils et aux formations :

L'adaptation des paramètres de forage aux outils et aux formations est une affaire de méthode de forage ; mais les caractéristiques géométriques et mécaniques des outils limitent nécessairement les intervalles de charges et de vitesses de rotation dans lesquels ils peuvent être utilisés ; de même l'usure des divers éléments constituant un outil est fonction des charges et des vitesses de rotation.

La vie d'un outil dépend des paramètres de forage, au même titre que son avancement.

V.6. Les efforts exercés sur l'outil

V.6.1 Géométrie d'un outil PDC :

Le taillant attaque la roche avec un angle de coupe de l'ordre de 15° (**Fig55**), et la réaction de la roche a généralement deux composantes : l'effort de coupe F_c qui est colinéaire à la direction d'avance et l'effort normal F_n qui est perpendiculaire au fond de saignée. Afin de mieux évacuer la roche abattue, on donne parfois à certains taillants un angle latéral ($<10^\circ$) qui génère une troisième composante d'effort (non représentée). Les taillants PDC sont généralement cylindriques, ce qui génère des saignées de formes irrégulières et souvent asymétriques.

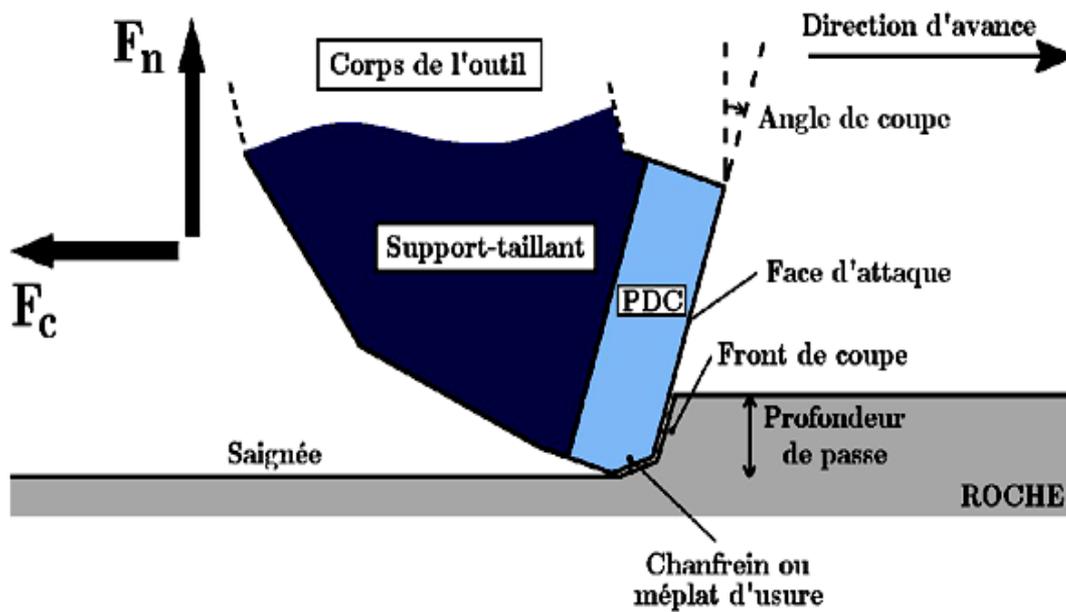


Figure 55:Caractéristiques Géométriques d'un Outil PDC

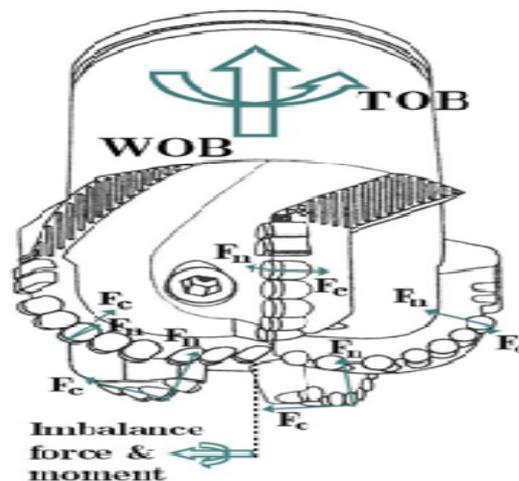


Fig. 56 : Efforts de coupe d'un outil PDC

La réponse mécanique nominale d'un outil PDC se déduit de la somme des réponses individuelles de ses taillants et se réduit à quelques grandeurs cinématiques et quasi statiques :

- la vitesse d'avance, ROP, exprimé en m/h
- l'avancement par tour de l'outil, DOC, exprimé en mm/tr ;
- la vitesse de rotation, RPM, exprimée en tr/min ;

- le couple à l’outil, TOB, exprimé en daN·m ;
- le poids à l’outil, WOB, exprimé en tonnes

V.6.2. La performance énergétique :

Au niveau d’un chantier, Altindag [Altindag 2004] identifie trois grands paramètres qui influent sur la forabilité de la roche :

- Les paramètres géologiques dont les types de roches forées, leurs propriétés physiques et mécaniques, l’orientation de la foliation, les discontinuités et la composition minérale
- Les paramètres machine dont le type de machine de forage utilisée, l’effort de poussée sur l’outil, la vitesse de rotation, le type d’outil et les jets de boue ;
- Le processus opératoire avec les méthodes de forage, les opérations et la maintenance de la machine, l’expérience de l’opérateur et le support logistique.

Concrètement, un outil est qualifié de performant s’il permet d’obtenir des vitesses d’avance élevées ainsi que des coûts d’exploitation modérés.

La vitesse d’avancement est essentiellement liée à l’évolution de l’énergie mécanique nécessaire pour détruire un volume unitaire de roche. Le rapport entre cette énergie E_m et ce volume V_R , à un instant donné, définit l’énergie spécifique d’excavation E Miller 1968.

$$E = E_m / V_R$$

Cette énergie spécifique dépend du couple fourni par les moteurs et de la poussée sur l’outil. Ceux-ci sont liés au design de l’outil, à l’agressivité des formations rocheuses rencontrées (e.g. duretés, températures et pressions de confinement, etc.) et à la dégradation de l’outil (e.g. usure, fracture, etc.).

Le design est étudié afin d’homogénéiser la contribution des dents sur l’ensemble de l’outil et l’optimisation de la circulation des boues de forage afin d’éviter l’agglomération de débris collants (ou bit balling) pouvant limiter l’excavation.

Au regard d'une dent isolée, la contribution du design va concerner la forme de celle-ci ainsi que son orientation. L'agressivité des roches est évaluée par des diagrapies du sol et l'outil le mieux adapté est alors sélectionné pour le forage. Mise à part l'agressivité et la variation des formations rocheuses, le facteur ayant un impact direct sur l'évolution d'un forage est la dégradation de l'outil.

Le développement de l'usure sur l'outil lors d'un forage entraîne une augmentation de l'énergie spécifique, ce qui engendre un effort de poussée et un couple croissants et provoque au final le changement de l'outil en raison de trop faibles vitesses d'avance.

V.6.3 Effort de coupe et de frottement :

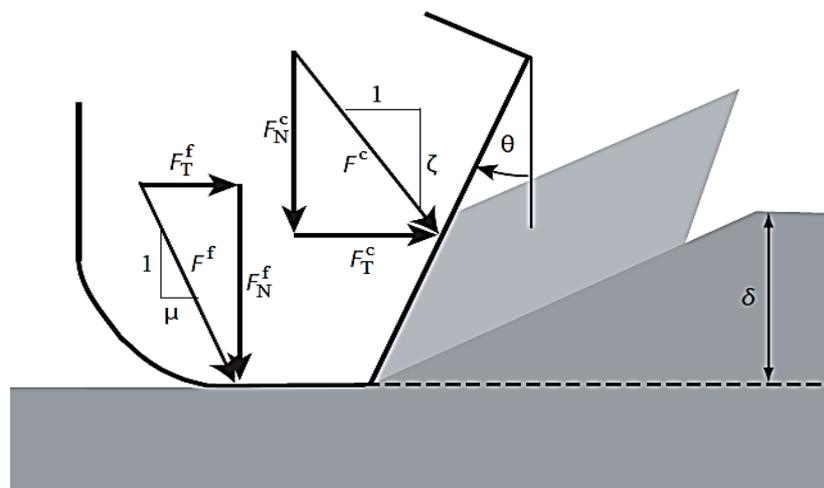


Figure 57 : Effort de coupe et de frottement

Concernant les efforts exercés sur l'outil, Fairhurst et Lacabanne Fairhurst 1956, à l'image de l'étude de Merchant Merchant 1944 sur les outils d'usinage pour les métaux, décomposent les efforts de coupe F_c appliqués en front de taillant et les efforts de frottement F_f situés au niveau du méplat d'usure. Ils introduisent une hypothèse forte en considérant que le frottement et la coupe sont indépendants. Par conséquent, l'effort normal total F_N sur le taillant, par principe de superposition, peut être déterminé par la somme de la composante normale de l'effort de coupe F_{Nc} et celle de l'effort de frottement F_{Nf} . La même chose s'applique à l'effort transversal total F_T sur le taillant qui est alors déterminé par la somme de la composante transversale de l'effort de coupe F_{Tc} et celle de l'effort de frottement F_{Tf} .

$$F_N = F_f N + F_c N$$

$$F_T = F_f T + F_c T$$

A partir de cette hypothèse, Detournay et Defourny [Detournay 1992a] établissent une relation affine entre l'effort normal et transversal totaux sur le taillant :

$$F_T = \mu F_N + A_c(1 - \mu\zeta)\varepsilon.$$

Cette relation fait apparaître quatre autres paramètres :

- **le coefficient de frottement μ** issu du rapport entre la composante transversale et la composante normale de frottement ;
- **le coefficient de coupe ζ** étant le rapport entre la composante normale et la composante transversale de coupe ;
- **l'énergie spécifique intrinsèque ε** qui, selon les auteurs, quantifie un processus complexe de la destruction de la roche. Ce coefficient dépend de plusieurs facteurs comme le type de roche, l'angle de coupe et la pression en surface des roches.

En laboratoire et à paramètres contrôlés (e.g. roche homogène et angle de coupe fixe), ε , qui est homogène à une contrainte, peut se rapprocher de la résistance en compression de la roche – **la surface active de coupe A_c** qui est fonction de la profondeur de passe et dans une moindre mesure de l'état d'usure du taillant.

Les auteurs introduisent alors dans cette relation les paramètres d'énergie spécifique de coupe E et de résistance au forage S . Ce dernier est le rapport entre l'effort normal sur l'outil et l'aire active de coupe. L'énergie mécanique E_m représente ici le travail de coupe qui est alors le produit entre l'effort transversal et la distance parcourue par l'outil L .

$$E = \mu S + (1 - \mu\zeta)\varepsilon$$

Au niveau expérimental, le tracé de diagrammes E en fonction de S montre que le modèle est clairement pertinent et qu'il vérifie une relation affine. Au début d'un essai, le taillant est neuf et seul les composantes de coupe sont à considérer ; la coupe est dite pure avec $\mu = 0$. Dès les premiers instants de l'essai, un méplat d'usure se forme et les points de mesure

vérifient alors la relation précédente entre E et S. Ces auteurs définissent aussi l'efficacité de coupe η afin d'évaluer le rendement énergétique d'un taillant. Ce rendement est calculé par le rapport entre l'énergie spécifique de coupe initiale, autrement dit l'énergie spécifique intrinsèque, et l'énergie spécifique mesurée au cours de l'essai

$$\eta = \varepsilon E$$

Par conséquent, au début d'un essai, η est égale à 1 (ou 100 %) puis décroît au cours de cet essai avec l'usure du taillant et la nécessité d'augmenter les efforts appliqués au taillant pour maintenir une profondeur de passe constante

V.7 Le prix de revient du mètre fore :

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.

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

$$P_m = \frac{P_o + P_h (T_r + T_m)}{m}$$

- Avec : P_m : prix de revient du mètre foré exprimé en \$/m
 P_o : prix de l'outil exprimé en \$
 P_h : prix horaire de l'appareil de forage exprimé en \$/h
 T_r : temps de rotation de l'outil exprimé en h
 T_m : temps de manoeuvre exprimé en h
 m : longueur forée avec l'outil exprimé en m.

Ou

$$P_m = \frac{P_o + P_{hm} T_m + P_{hf} T_r}{m}$$

- Avec : P_{hm} : prix horaire de l'appareil de forage en cours de manoeuvre exprimé en \$/h
 P_{hf} : prix horaire de l'appareil de forage en cours de forage exprimé en \$/h.

La deuxième formule est utilisée lorsque le prix de l'appareil est différent en forage et en manœuvre (différence due par exemple au coût du moteur de forage).

Conclusion générale

Dans le domaine du forage, le prix du mètre foré est le point le plus important à prendre en considération,

Les outils de l'ENSP sont les plus performants du point de vue avancement moyen (ROP) et plus rentable dans la phase 12 "1/4 sur le champ de Hassi Messaoud, ce qui engendre une réduction du prix de mètre foré (m/h) par rapport aux outils des autres fabricants.

Nous pouvons dire que cette étude aura des retombées positives multiples pour l'ENSP et son client SONATRACH, elle nous a permis des nouvelles piste d'innovations par la compréhension du forage et ses paramètres qui sont le domaine d'applications de ces outils, et par la connaissance des propriétés des roches qui est très utile dans la recherche des facteurs de rendement dans les opérations de forage .

Durant notre stage de fin d'études, nous avons étudié et appliqué les différents procédés de fabrication mécaniques issus de notre formation académique tels que : l'usinage, le moulage, le soudage, le brasage, le surfaçage et la rectification, dans le secteur pétrolier particulièrement le forage.

La première partie de notre travail est consacré au fonctionnement des outils dans le forage avec ses régimes et paramètres de coupe, la deuxième partie a l'analyse de processus de fabrication des outils PDC en corps acier et en corps matrice

Espérant que les objectifs escomptés ont été atteints et que notre étude permettra une amélioration de performance pour l'ENSP et soit intéressante par l'acquisition de nouvelles connaissances dans le secteur pétrolier pour les promotions à venir du département génie mécanique de l'université de Tizi Ouzou.

Bibliographie

- [1]Thèse doctorat : Comportement tribologique de diamants polycristallins et de carbures cémentés WC-Co avec traitements de graduation Application aux inserts et taillants d'outils pour le forage de formations rocheuses fortement abrasives .Malik YAHIAOUI INP Toulouse 2013
- [2]L'INFORMATION BREVET AU SERVICE DE L'INDUSTRIE PÉTROLIÈRE : CAS DE CONCEPTION ET D'OPTIMISATION DES TRÉPANS PAR INGÉNIERIE INVERSEE Abdelkader BAAZIRSIC Laboratory, Aix-Marseille Université, Marseille, France 2014
- [3]Formation JDF Module M2 Tome 2 Division Forage SONATRACH A.SLIMANI et C.SOUSSE 2004
- [4]Appareil de forage ENSPM formation industrie France 2007.
- [5] Les outils de forage ENSPM formation industrie France 2004.
- [6]Les outils de forage SONATRACH Division de Forage DF F.GRONDIN Edition Janvier 2004
- [7]Revue ENSP group 2011.
- [8]"Le forage" : J.P. NGUYEN : Editions Technip 1993