N° d'ordre : ……. / Faculté / UMBB / 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

MEGHAOURI Idris

Filière : Hydrocarbures.

Option : mécanique des chantiers pétroliers.

Thème

Analyse de performance de l'outil ONYX 360 rolling cutter sur la phase 6" dans le champ de IN SALAH.

Devant le jury :

		UMBB	**Président**
BOUZID Rachid	**MCB**	**UMBB**	**Encadreur**
		UMBB	**Examinateur**
		UMBB	**Examinateur**
		UMBB	**Examinateur**

Année universitaire 2015 / 2016

REMERCIEMENTS

Toute la gratitude et le merci à Dieu notre créateur qui nous a donné

La force pour effectuer et achever ce travail.

Ainsi nos parents qui nous aident.

Nous tenons à remercier en premier lieu et très

chaleureusement

Notre promoteur ***BOUZID RACHID***

Pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses

précieux conseils,

Pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui,

Notre travail s'est déroulé.

Nous remercions aussi :

Les travailleurs de SCLUMBERGER (Smith bits)

B-RACHA & D-SALIM & M-BILAL

Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés

de près ou de loin à la finalisation de ce travail, nous tenons à

leur exprimer notre vive gratitude.

Enfin nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous

feront l'honneur de juger notre travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

❖ *A ma très chère* ***Mère*** *et mon très cher* ***Père*** *qui ont beaucoup sacrifié à mon bonheur, qui ont partagés mes malheurs et qui n'ont jamais cessé de prier pour moi.*

❖ *A mes très chères sœurs OUMAIMA & HANA.*

❖ *Ma fiancée KHAIRA.*

❖ *A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions, en particulier DEBBA FARES & LAGGOUN AYOUB*

❖ *A tous mes camarades du Groupe MACP11.*

Meghaouri Idris

SOMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.

Introduction I

Objectif du l'étude II

CHAPITRE I : presentation de l'entreprise.

II .1.Présentation de Schlumberger 1

CHAPITRE II : partie geologique.

II .1. Présentation de zone d'étude..... 2

1.1. Région d'In Salah 2

a. Situation géographique 2

b. La Structure Géomorphologique..... 3

II .2. Caractères lithologiques et sédimentaires 3

a. Gédinnien 3

b. Barre supérieure ou Siégénien 4

c. Emsien..... 4

CHAPITRE III: theorie et conception des outils de forage.

III.1. Introduction 5

III.2. Les outils a molettes..... 7

2.1. Structure de coupe..... 9

2.2. Les éléments de coupe 10

2.3. Principe général 12

2.4. Géométrie des cônes 13

2.5. Conception des paliers 14

2.6. Système de lubrification..... 15

2.7. Mode de destruction de la roche..... 15

2.8. L'hydraulique à l'outil 16

III.3. Les outils a diamants..... 18

3.1. Le diamant..... 18

a. Qualité des diamants 18

3.2. Types d'outils diamantés..... 18

3.3. Les outils à diamants naturels..... 19

a. Utilisation des outils à diamants 19

3.4. Les diamants synthétiques..... 21

a. Les diamants PDC (polycristalline diamond compact)..... 21
b. Les TSP (Thermally Stable Polycristalline) 22
3.5. Mode de destruction de la roche par les outils à diamant 22
a. Les diamants naturels..... 22
b. Les outils PDC 23
c. Les outils TSP..... 23
3.6. Conception et fabrication des outils a diamants 24
a. Nature du corps de l'outil..... 24
b. Fabrication des outils..... 27
c. Profils des outils..... 28
III.4. Classification IADC (International Association of Drilling Contractors) 30
4.1. Classification IADC des outils à molettes..... 30
a. Premier chiffre..... 30
b. Deuxième chiffre..... 30
c. Troisième chiffre..... 30
4.2. Classification IADC des outils à diamant (PDC) 33
a. Premier caractère 33
b. Deuxième caractère 33
c. Troisième caractère..... 35
d. Quatrième caractère..... 35
III.5. Détermination de l'usure des outils 38
5.1. L'analyse de l'usure..... 43
CHAPITRE IV: description de la nouvelle thechnologie des outils.
IV.1. Introduction 44
1.1. La technologie de Rolling Cutter..... 45
IV.2. Plate-forme de simulation sur IDEAS 48
2.1. Le rôle de IDEAS..... 48
2.2. Principe de fonctionnement..... 48
CHAPITRE V: analyse vibratoire par IDEAS.
VI.1. introduction..... 48
VI.2. La section étudiée 48
VI.3. Lithologie de la formation (masterlog) 49
1.1. MASTERLOG : puits 01..... 49

1.2. MASTERLOG : puits 02 50
VI.4. Base de donnée de l'étude 51
4.1. Compositions de la garniture de forage 51
4.2. Informations sur les paramètres de forage 52
4.3. Les résultats de calcul 52
a. Analyse sur les Grès (15-20kpsi) 52
b. Analyse sur les Argiles (20-30kpsi) 54
4.4. Observations 55
4.5. Conclusion 55
CHAPITRE VI: influence des parametre de forage.
VII.1. Introduction 56
VII.2. Paramètres mécaniques 57
a. Type de l'outil 57
b. Vitesse de rotation 57
c. Poids sur l'outil 58
1.1. Influence de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement 58
1.2. Influence du poids sur la vitesse d'avancement 60
1.5. Optimisation du couple poids - vitesse de rotation (Drill Off Test) 61
a. Drill Off Test 61
b. Optimisation du poids sur l'outil 62
c. Optimisation de la vitesse de rotation 62
VII.3. Paramètres hydrauliques 63
3.1. Débit 63
3.2. Influence des caractéristiques de la boue : 64
d. Densité 64
e. Filtration 65
f. Viscosité 65
g. Teneur en solides 65
h. Nature de la boue 67
CHAPITRE VII: analyse de performance.
VIII.1. Introduction 68
VIII.2. Déroulement de l'opération du forage 68
1.1. Paramètres de forage 69

1.2. Graphe du Paramètres de forage 70
1.3. Détermination de la vitesse d'avancement moyenne : 71
VIII.3. Usure de l'outil : 72
VIII.4. Les offset 75
VIII.5. Conclusion 76
CONCLUSION GENERALE .
RECOMMANDATIONS.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II : presentation de l'entreprise.

Figure 1: fondation de l'entreprise en 1926. 1

CHAPITRE III : partie geologique.

Figure 1: Situation géographique de d'In Salah. 2

CHAPITRE IV : theorie et conception des outils de forage.

Figure 1: Conception d'un outil bicône. 5
Figure 2 : dent fraisée. 8
Figure 3: insert en carbure de tungstène. 8
Figure 4: Nomenclature des différents éléments 8
Figure 5: Outil à dents fraisées. 9
Figure 6 : Outil à picots. 10
Figure 7 : Différents types de picots. 11
Figure 8: Avancée et écartement de dents. 13
Figure 9: Arrangement pour formation tendre. 13
Figure 10: Arrangement pour formation dure. 14
Figure 11: Roulement à rouleaux, rétention par billes 14
Figure 12: Palier lisse, rétention par billes. 14
Figure 13: Système de lubrification des paliers. 15
Figure 14: Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche. 16
Figure 15: Duses interchangables 17
Figure 16: Outils à diamants naturels. 19
Figure 17: Nomenclature des éléments des outils à diamants. 20
Figure 18: Structure d'un PDC. 21
Figure 19: Action d'un outil à diamant naturel. 23
Figure **20** : Action d'un taillant PDC. 23
Figure 21: Terminologie outil PDC - Matrix body. 25
Figure 22: Terminologie outil PDC – Steel body. 26
Figure 23: Fabrication des outils a diamant naturel. 28
Figure 24: Différents types de profils des outils PDC. 29
Figure 25 :Classification IADC des outils à molettes. 32

Figure 26: Code des profils. 34
Figure 27: Classification IADC des outils à diamant (PDC)..... 37
Figure 28: Description de l'usure des outils. 38
Figure 29: Codification de l'usure des dents. 39
Figure 30: Mesure de la perte de diamètre. 42

CHAPITRE V : description de la nouvelle thechnologie des outils.

Figure 1:l'outil ONYX 360 Rolling PDC Cutter. 46
Figure 2: Rolling PDC Cutter 47
Figure 3: les essais de durabilité. 48
Figure 4: Outil PDC avec rolling cutter 49
Figure 5: IDEAS simulation pour un outil PDC. 50

CHAPITRE VII : influence des parametre de forage.

Figure 1: Effet de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement. 59
Figure 2 : Effet du poids sur la vitesse d'avancement. 60
Figure 3: Effet de la pression différentielle sur la vitesse d'avancement. 64
Figure 4: Effet de la viscosité sur la vitesse d'avancement. 66
Figure 5: Effet de la teneur en solides sur la vitesse d'avancement. 66

CHAPITRE VIII : analyse de performance.

Figure 1: masterlog de la phase étudier. 68
Figure 2: l'usure sur les rolling cutter. 73
Figure 3:l'usure sur les taillants fixes. 74

Introduction

Le pétrole et le gaz jouent un rôle fondamental dans l'économie nationale, ils constituent la source la plus importante d'énergie qui a une valeur inestimable. Pour exploiter ces richesses souterraines, on procède au forage qui est une opération très délicate et la plus coûteuse du processus d'exploitation de cette énergie.

L'objectif prioritaire des foreurs est la réalisation d'un trou, conformément au programme qui leur a été fourni, au meilleur coût possible dans les meilleures conditions techniques ; le trou devant bien évidemment servir à quelque chose : mise en production d'un réservoir, test d'un horizon inconnu, etc.

La répartition des coûts pour un forage à terre, généralement peut se répartir de la façon suivante :

1. Emplacement (génie civil...) : 8 à 12 %
2. Coûts fixes (déménagement, tubages, compagnies de service,...) : 23 à 27 %
3. Coûts proportionnels au temps passé au forage : 55 à 65 %
4. Complétion : 4 à 6 %

Les points 1, 2 et 4 sont fonction du programme et sont difficiles à minimiser ; par contre la plus grande partie du point 3 (le point le plus lourd dans la répartition des coûts) est liée aux travaux d'avancement.

Le coût total de l'opération de forage 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, sans occulter le volet économique dans tel choix.

Une meilleure combinaison des moyens et des techniques nécessite aussi une bonne connaissance géologique et géophysique des formations à traverser. C'est-à-dire d'avoir la chronologie stratigraphique et la coupe lithologique de la zone de forage afin de savoir à quelle profondeur on rencontre une couche et de connaître la nature des minéraux la constituant (la dureté, l'abrasivité) et les caractéristiques des milieux environnants (la pression, la densité et perméabilité, etc.). Ces renseignements permettent de définir le mode de forage et l'outil le mieux adapté aux formations et l'ordre de grandeur des différents paramètres nécessaires à la conduite d'un tel processus dans les meilleures conditions techniques et économiques.

Objectif du l'étude

Le forage des formations dures et abrasives est très difficile à cause de l'usure rapide des taillants des outils, ce problème nous oblige à utiliser plusieurs outils pour atteindre la profondeur finale de forage, ce qui n'est pas rentable.

Dans notre cas, ce problème a été rencontré au cours du forage de la phase 6" (réservoir) dans le champ de IN SALAH, ou les formations **Emsien, Siégénien et Silurien** présentent une dureté et une abrasivité très élevées.

Cette étude a pour objectif d'introduire la nouvelle technologie des taillants des outils (rolling cutters) et estimer leurs performances dans le forage de cette section et leur usure résultante.

Une autre partie dans ce travail est consacrée pour la comparaison du comportement de ce nouvel outil avec la conception de base dans deux types de roches (grès et argiles). Dans cette partie l'étude a été concentrée sur les vibrations axiales et latérales, ainsi que sur la vitesse de pénétration (ROP).

Dans la deuxième partie de l'étude on va analyser les résultats de l'utilisation de l'outil ONYX 360 rolling cutter dans cas réel (forage de la phase 6'' dans le champ de IN SALAH) pour enfin confirmer les études théoriques et les travaux de simulation sur cette technologie.

II .1. Présentation de Schlumberger

On a fait notre stage chez Schlumberger, qui est une société mondiale fournissant des technologies, des solutions d'information et de gestion de projet intégré qui optimisent la performance du réservoir pour les clients travaillant dans l'industrie du pétrole et du gaz. Schlumberger fournit maintenant l'industrie pétrolière avec des services tels que l'acquisition et le traitement sismique, évaluation de la formation, essai de puits et forage dirigé, cimentation des puits et de la stimulation, artificielle ascenseur, complétions de puits et de consultation, logiciels et gestion de l'information.

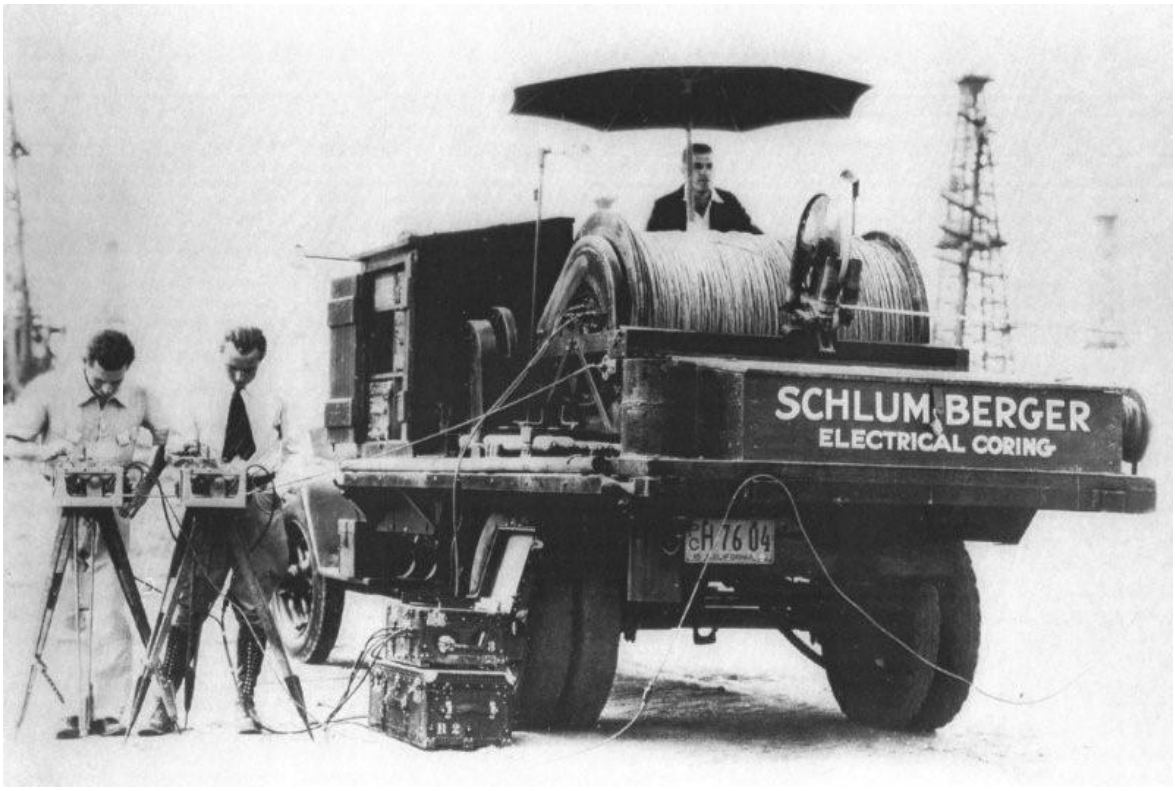


Figure 1: fondation de l'entreprise en 1926.

Schlumberger a été fondée en 1926 par les frères français Conrad et Marcel Schlumberger comme (Société de Prospection Électrique) .La société a enregistré le premier log électrique de résistivité à Merkwiller-Pechelbronn, France en 1927.

II .1. Présentation de zone d'étude

L'avis des spécialistes dans la région du sud Algérien, complété par la consultation de plusieurs études de la région, nous avons orientés notre choix sur les argiles et Grès de la région d'In Salah comme exemple pratique pour notre étude expérimentale.

Cette formation géologique est très connue par des valeurs de dureté UCS relativement élevées (10-20kpsi) et avec leurs abrasivités.

1.1. Région d'In Salah

a. Situation géographique

La ville de In Salah, chef-lieu de la daïra, se situé à 670 Km au Nord de son chef-lieu de Wilaya, Tamanrasset, elle est à 800 Km au Sud de Ouargla et à 1300 Km au Sud de la capital (Alger). In Salah se trouve à environ 268 m par rapport au niveau de la mer elle se situe entre les longitudes : 27°08' et 27° 18'' et les altitudes : 2° 22' et 2° 36'

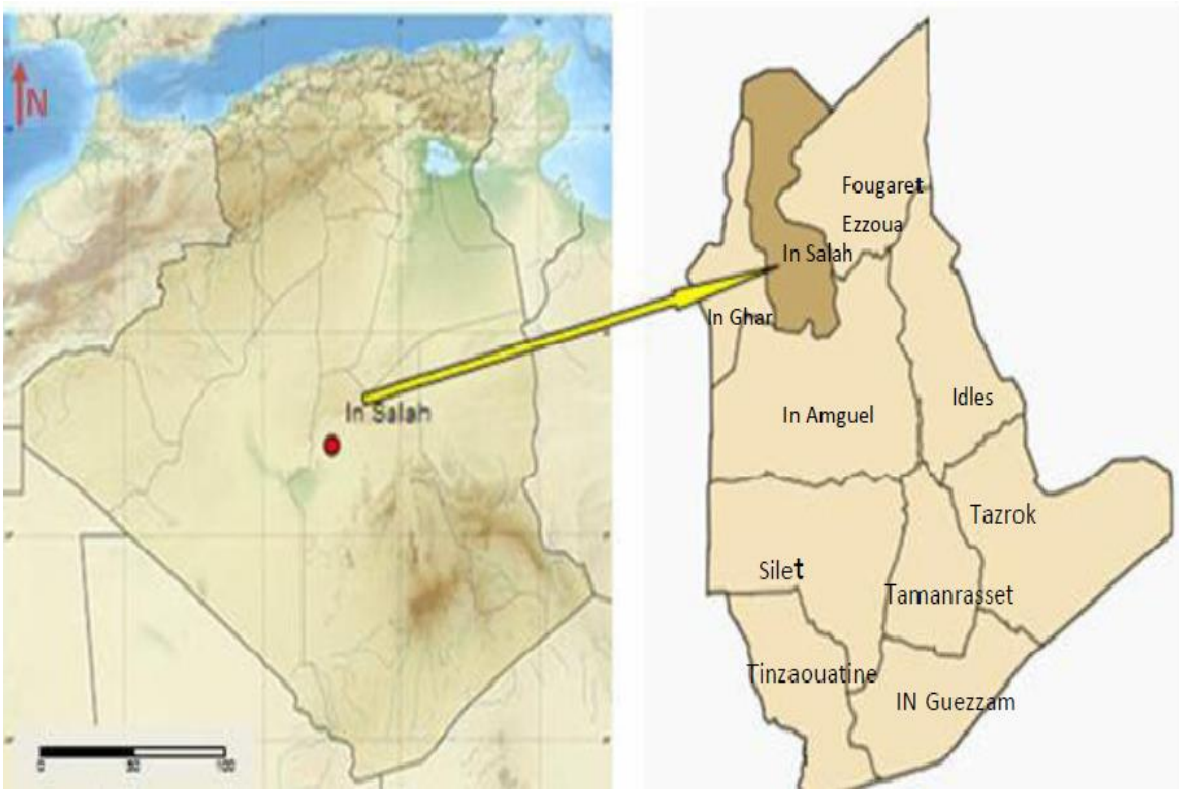


Figure 1: Situation géographique de d'In Salah.

b. La Structure Géomorphologique

La région de In Salah constitue la limite sud du grand plateau de Tidikelt. Elle est caractérisée par deux traits morphologiques.

Le plateau (Reg) est une vaste plaine allongée sensiblement NE – SW, limitée au sud par les affleurements du primaire et au nord par les falaises des formations du Crétacé supérieur. Les altitudes du plateau sont limitées par la courbe de niveau 275 et 300 m.

La pente est généralement très faible, elle est de l'ordre de 1% et le pendage est vers le Sud-Ouest.

La dépression qui marque la limite sud-ouest du plateau de Tidikelt caractérise l'extrémité occidentale des palmeraies et les sebkhas qui sont des successions de petites sebkhas qui marquent la limite sud du bassin occidental (zone Tidikelt) et constituant l'exutoire naturel des eaux de la nappe aquifère.

II .2. Caractères lithologiques et sédimentaires

a. Gédinnien

Cette formation se présente sous forme d'un ensemble argilo-gréseux très complexe dans le détail. Elle est composée par des argiles noires à verdâtres plus ou moins silteuses et micacées qui alternent avec des grès fins à très fins et des silts quartzitiques à ripple marks, Tigillites et traces de vers, avec stratifications confuses. On retrouve aussi des grès fins à moyens exceptionnellement grossiers, poreux à stratifications obliques avec quelques niveaux ferrugineux.

Cette série s'est déposée dans un environnement marin peu profond à margino-littoral. Toutefois, le faciès le plus franchement marin correspond à la partie médiane de la série ou l'on observe une prédominance argileuse.

Le sommet de cette série apparaît. Avec un faciès littoral Dans cette formation Le développement local des lentilles gréseuses implique un changement de faciès, est directement lié à cet environnement mixte marin-littoral.

Ces lentilles gréseuses peuvent. Correspondre à des corps sableux du type Barre littorale ou chenaux de marée.

b. Barre supérieure ou Siégénien

Cette Barre supérieure constitue l'unité stratigraphique la plus continue du Dévonien inférieur.

Elle est très caractéristique, lithologiquement les grès qui la forment sont fortement quartzitiques ce qui leur donnent l'aspect d'une barre massive et compacte qui par fracturation peut constituer un réservoir.

Ce caractère massif et compact permet de bien distinguer en subsurface ses limites inférieures et supérieures à l'intérieur du Dévonien inférieur.

À l'intérieur de ces grès. Les stratifications confuses, les grès fins à ripples, la forte quartzification observée dans ce faciès montrent un caractère marin de la série sus jacente.

c. Emsien

Cette formation est comprise entre le toit de la barre quartzitique et le mur des argiles Couviniennes.

Elle est représentée par une série essentiellement argileuse dans laquelle se développent des corps gréseux avec des épaisseurs et des extensions variables difficiles à cerner.

L'abondance de faunes marines rencontrées dans cette série nous montre un caractère marin particulièrement très net. Celui-ci correspond à une transgression qui se poursuit jusqu'aux séries sus-jacentes du Dévonien moyen et supérieur.

III.1. Introduction

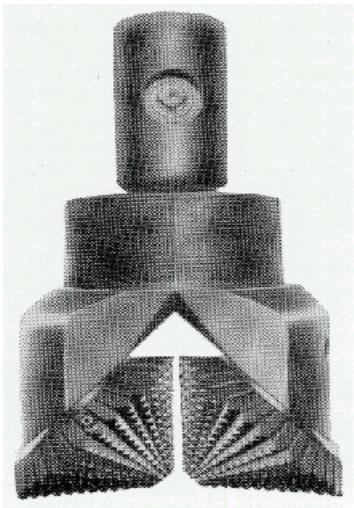
Les outils se classent en deux catégories :

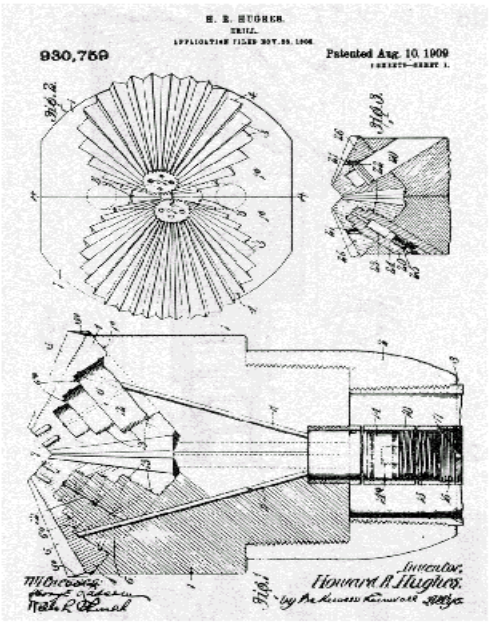
- **Les outils à molettes :** ils sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleaux avec ou sans étanchéité, paliers de friction, système de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression.
- **Les outils diamant** : ils ne possèdent pas de pièces tournantes ; ce sont des outils monobloc. Des diamants naturels et de synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamant naturel travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot.

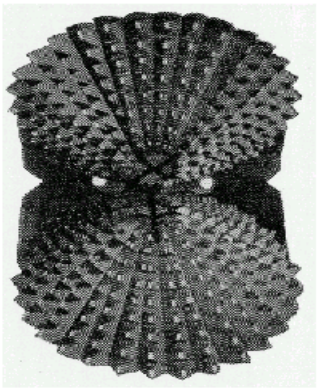
Les outils de forage ont évolué au cours du temps pour répondre aux problèmes techniques du forage au cours de la réalisation du puits, qui s'avèrent de plus en plus complexes.

Voici quelques dates importantes à retenir dans l'évolution chronologique des outils de forage :

1909 : Introduction des premiers outils à molettes "bicônes", surtout utilisés dans Les formations tendres.







Patent Number: 930,759
August 10, 1909

Figure 1: Conception d'un outil bicône.

1930 : Introduction de la première couronne diamantée pour le carottage Pétrolier.

1933 : Introduction des "premiers tricônes" à dents fraisées offrant une meilleure adaptation au type de formation (Offset et dents longues pour terrains Tendres, dents courtes et molettes sans offset pour les terrains durs).

1948 : Apparition des outils à duses.

1951 : Introduction du "premier tricône à picots" en carbure de tungstène.

1953 : Introduction des "outils à diamant à pierres naturelles serties" ; leur durée de vie et leurs performances à la turbine compensent leur coût élevé dans les terrains moyens à durs situés à grande profondeur. Ils sont concurrencés par les outils à pastilles en carbure de tungstène dans les années 70.Ces derniers sont bien adaptés aux terrains moyennement durs et abrasifs pour des profondeurs intermédiaires.

1959 : Introduction de joint d'étanchéité et de système de lubrification internes des roulements.

1976 : Introduction des "outils à diamants synthétiques polycristallins (STRATAPAX).

1979 : Introduction des outils à paliers lisses.

1981 : Introduction des outils à diamants synthétiques polycristallins thermostables (TSP).

Les anciens outils à molettes étaient très semblables à ceux utilisés de nos jours. Cependant la conception, la métallurgie et la fabrication se sont améliorées de façon significative. Les développements les plus importants ont été l'introduction :

- des duses,
- des picots de carbure de tungstène,
- des roulements lubrifiés et étanches,
- des paliers de friction.

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

Les évolutions actuelles consistent à utiliser de plus en plus le diamant sur les outils à molettes pour éviter la perte de diamètre.

Les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'approfondissement d'un forage peuvent être classés en deux catégories :

- les paramètres mécaniques :

• type d'outil (éléments de coupe, conception de l'outil)

• poids sur l'outil,

• vitesse de rotation,

• couple disponible

,• composition de la garniture de forage, stabilisation, élasticité.

- les paramètres hydrauliques :

• le débit avec l'énergie hydraulique au niveau de l'outil,

• la nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité, filtrat).

III.2. Les outils a molettes

Le tricône (outil à 3 molettes) est le plus utilisé. 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.

Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures

Les picots de carbure et les paliers de friction ont permis d'appliquer des poids de plus en plus importants sur l'outil et d'augmenter la durée de vie des outils dans les formations dures (la durée de vie de ces outils est pratiquement trois fois plus longue que celle des outils à dents et à roulements à rouleaux).

Figure 2 : Dent fraisée.

Figure 3: Insert en carbure de tungstène.

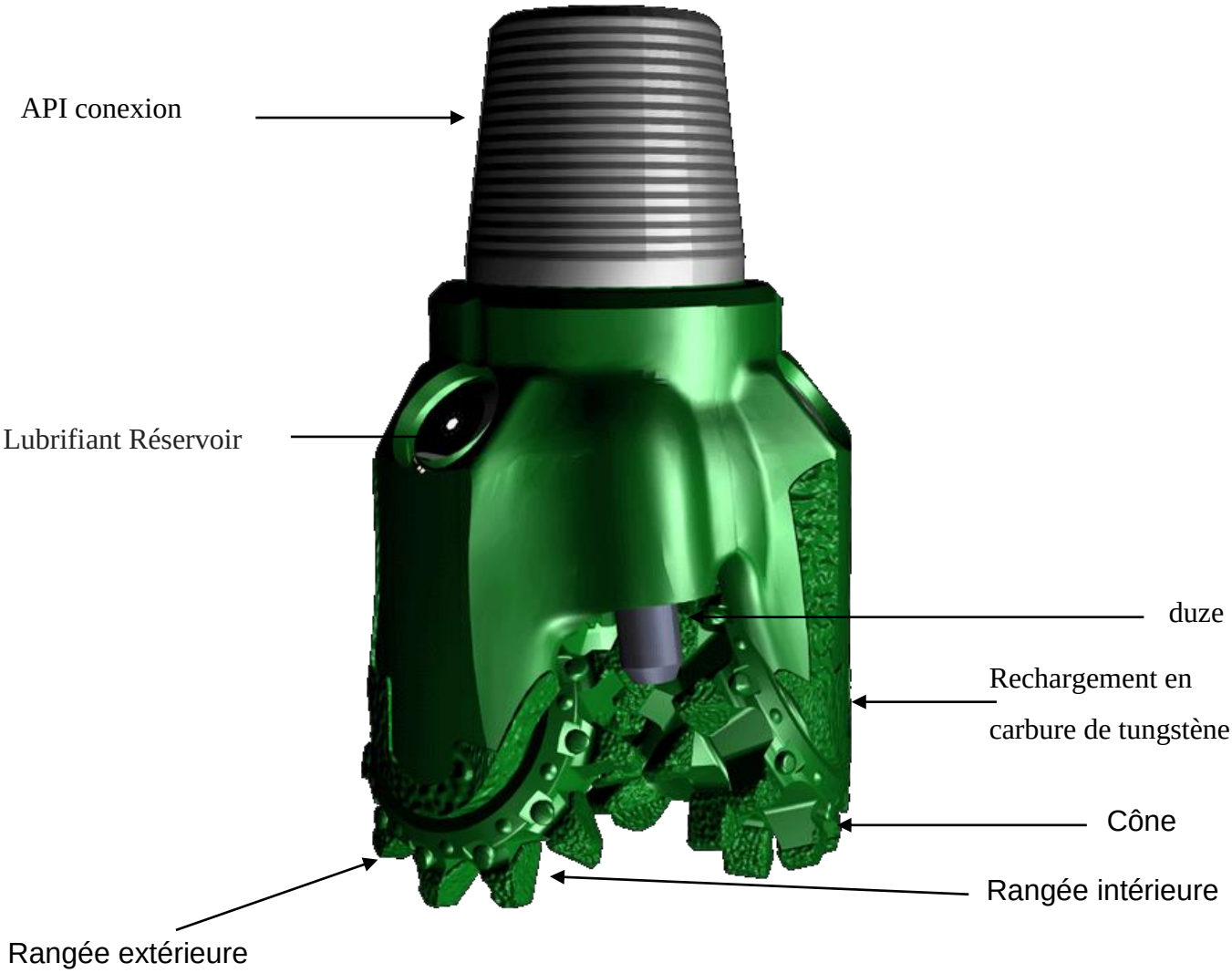


Figure 4: Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes.

Un outil à molettes est constitué de trois parties principales : les molettes, les roulements et le corps de l'outil. Les molettes présentent des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des cônes adjacents. Les molettes d'un outil ne sont pas identiques : la molette n°1 possède une pointe qui occupe le centre, et les molettes n° 2 et 3 sont celles qui viennent après, dans le sens des aiguilles d'une montre. Les dents sont soit en acier usinées dans le cône, soit des picots de carbure de tungstène sertis dans des perçages à la surface des cônes. Les molettes sont montées sur des arbres de roulements qui sont partie intégrante du corps de l'outil.

2.1. Structure de coupe

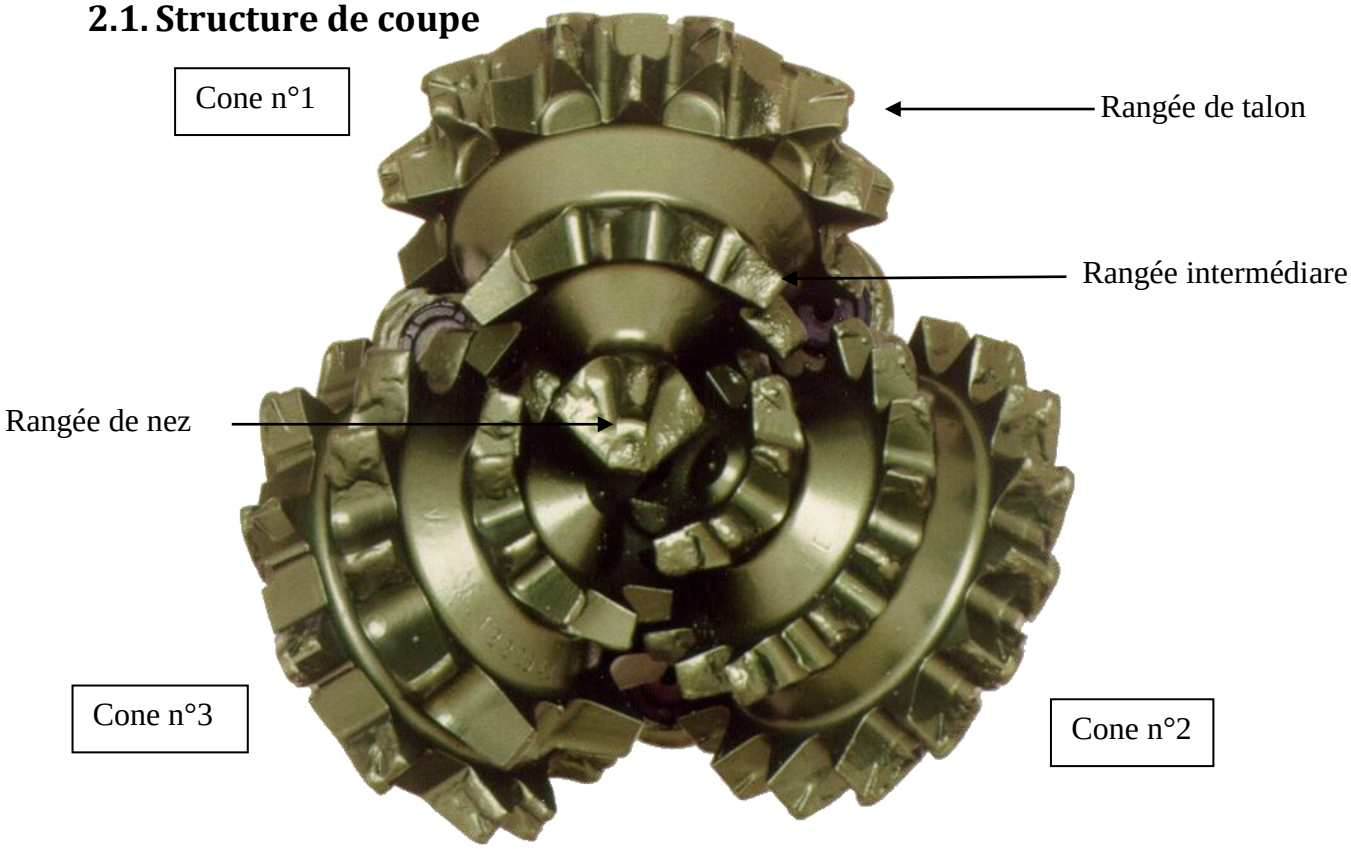


Figure 5: Outil à dents fraisées.

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du type de formation à forer. Les outils pour formations tendres, qui nécessitent peu de poids, ont des roulements plus petits, des cônes moins épais et des jambes de plus faible section que les outils pour formations dures. Ceci laisse plus de place pour des éléments de coupe longs et minces.

Les outils pour formations dures, qui travaillent avec des poids plus importants, ont des éléments de coupe plus trapus, des roulements plus gros et des corps plus solides.

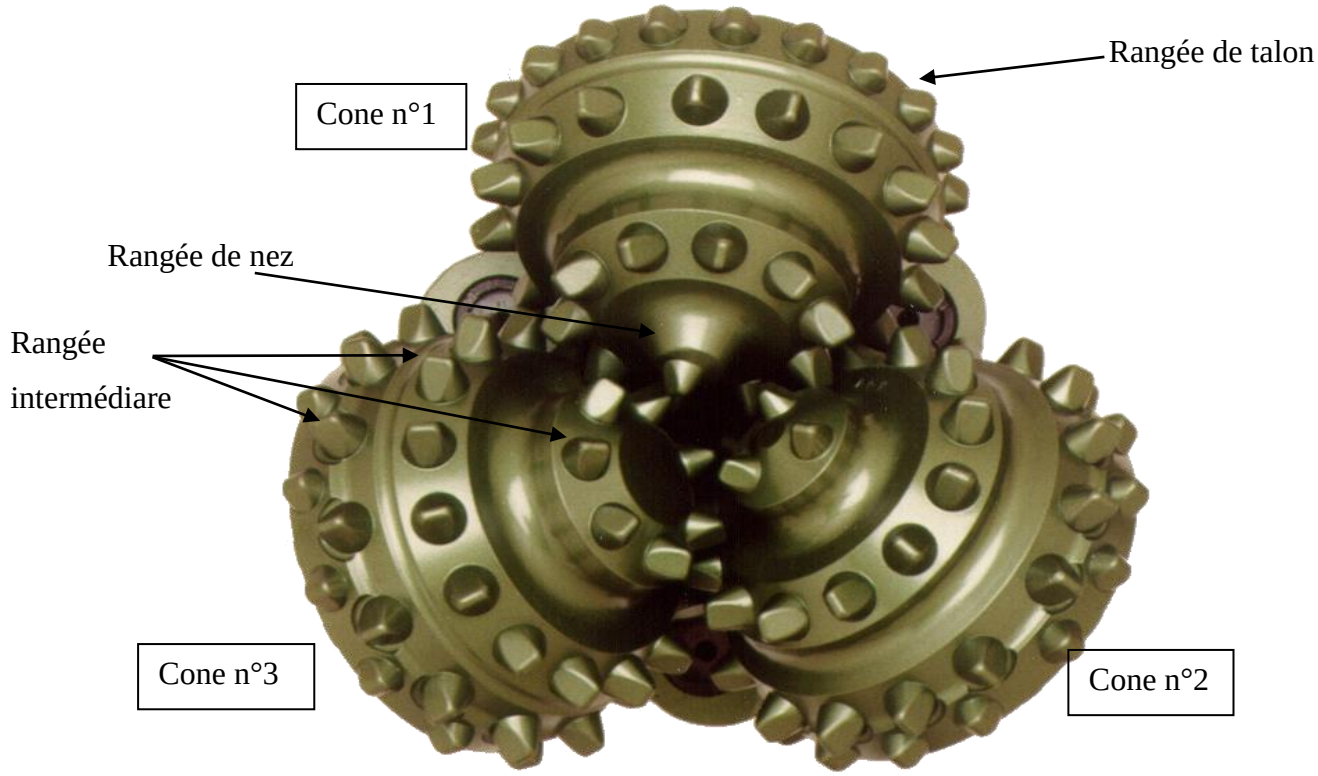


Figure 6 : Outil à picots.

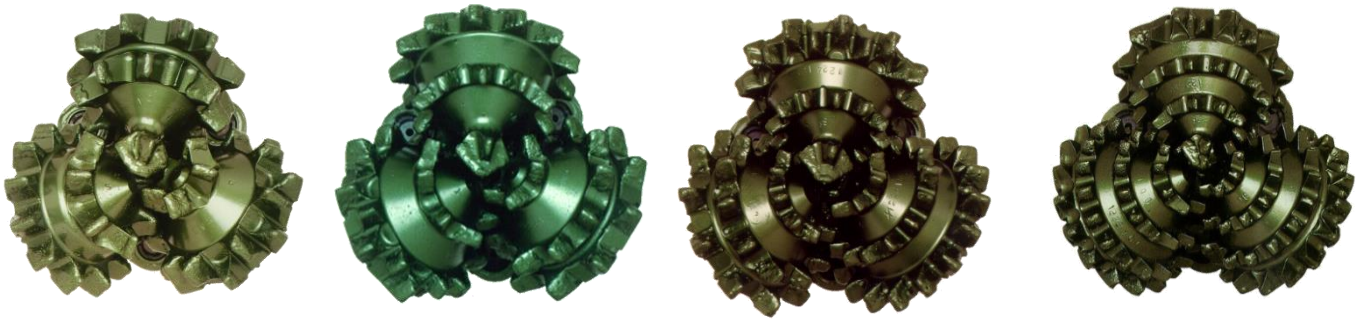
2.2. Les éléments de coupe

Les outils à dents acier sont utilisés en début de trou, dans les formations tendres, pour de grandes vitesses de rotation, ainsi que dans les zones où l'épaisseur des couches rend les outils à picots non économiques. Suivant l'usage prévu, toutes les molettes à dents fraisées ont une protection carbure de tungstène sur les dents.

Les outils pour formations tendres sont conçus avec des dents longues, largement espacées, de façon à favoriser la pénétration dans le terrain et l'arrachement de fragments plus importants.

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

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



	Outil pour terrain tendre		Outil pour terrain dur	
Offset	0.375" (3/8")	0.281" (9/32")	0.281" (9/32")	0.186" (3/16")
ETAGE	7	8	9	12
LES DENT	65	78	109	160

Ces outils sont conçus sans ripage ; ainsi les trois molettes roulent pratiquement sur le fond de manière à réduire l'usure des dents par abrasion. L'outil à picots ou carbure de tungstène fut initialement conçu pour forer les formations très dures et abrasives composées de silice ou de quartzite qui, du fait de la durée de vie relativement courte des outils à dents, se révélaient très onéreuses à forer. Aujourd'hui, grâce au progrès de la métallurgie et de la forme des picots, on a pu développer des outils adaptés pour forer économiquement dans une large fourchette de forabilité.

Les picots cylindrique en carbure de tungstène fritté sont usinés de manière à obtenir des formes très diverses (figure ci-après) et sont ensuite sertis dans des trous usinés avec précision dans les cônes. Cet assemblage donne une structure de coupe présentant une grande résistance à l'usure par abrasion ainsi qu'aux efforts de compression.

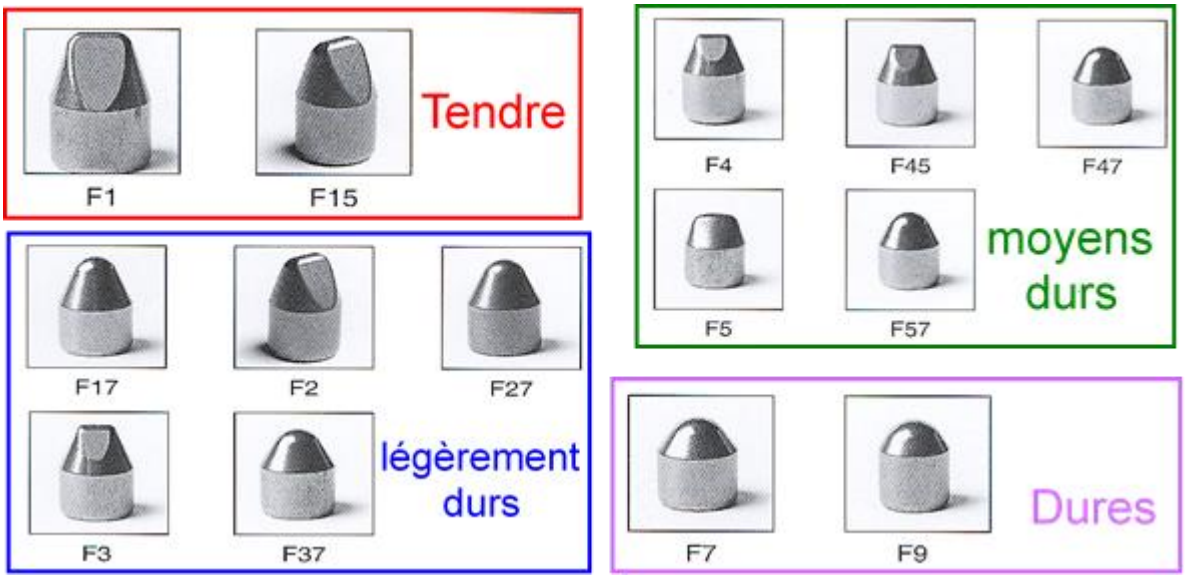


Figure 7 : Différents types de picots.

La forme ovoïde est la plus résistante et est dessinée pour l'action d'écrasement et d'éclatement nécessaire au forage des formations très dures. Les ogives présentent un peu plus de proéminence pour forer des formations un peu plus tendres. Le cône est également un profil solide convenant parfaitement à une action de forage du type écrasement et éclatement. Il est utilisé avec une action de raclage pour le forage des formations mi-dures.

Le ciseau est utilisé dans les formations moyennes et plus tendres pour un avancement maximum grâce à une action de gouge et de raclage. Des formes spécifiques de ciseaux sont choisies en fonction de la formation et des propriétés géométriques de l'outil

2.3. Principe général

Plus le terrain à forer est tendre et plus la divergence des axes des molettes (offset) est importante. Mais la forme de la denture et l'espacement des dents dans chaque rangée joue également un rôle important. Plus les dents sont hautes et espacées (cf. figure 18) et plus il est facile de dégager les éléments de roche détruits par l'action des dents. En outre, le grand espacement des dents diminue le nombre d'arêtes en contact avec le fond du trou et par conséquent, augmente la pénétration dans la roche.

Dans ces terrains, la divergence des axes aide à "déchirer" la roche et à rejeter les déblais hors de la denture.

Pour un terrain dur et compact on n'a pas intérêt à obtenir pour chaque dent une pénétration importante, qui pourrait provoquer, du fait de la grande résistance de la roche, des ruptures des dents. On prévoit donc dans ce cas des molettes munies d'un grand nombre de dents, petites, peu espacées.

Dans certains terrains extrêmement durs, il est impossible d'y faire pénétrer les dents d'un outil. Pour forer ces terrains, on a supprimé les dents pour les remplacer par des pastilles de carbure de tungstène emmanchées à la presse dans des alvéoles cylindriques ménagées dans les molettes.

Ce type d'outil travaille par percussion et surtout écrasement qui fracture la roche sans qu'il y ait pénétration importante.

On notera également que le trou est calibré par le « talon des molettes ». Plus la formation est abrasive, plus la surface du talon doit être importante, et dans certains cas, les outils à dents sont renforcés sur le talon par des pastilles de carbure de tungstène.

Avancée et écartement :

L'avancée (projection) se rapporte à la longueur des dents, et l'écartement (pitch) au nombre des dents et à l'espace relatif entre les dents. Un outil avec les dents longues et largement espacées sera performant dans des formations tendres.

Dans des formations plus dures, des dents plus courtes, et des espaces entre les dents le plus réduits sont nécessaires pour additionner les forces.

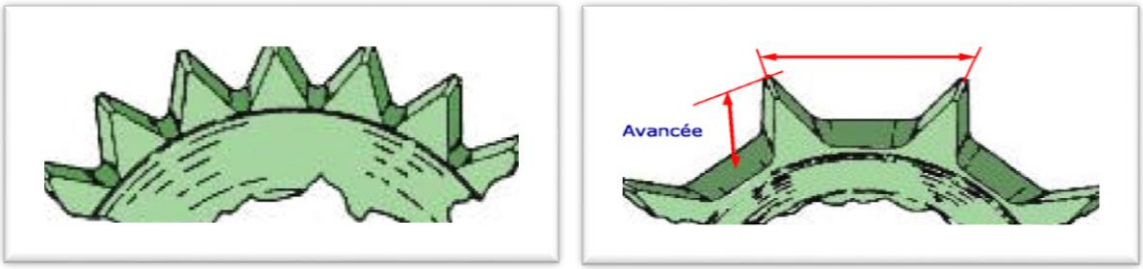


Figure 8: Avancée et écartement de dents.

2.4. Géométrie des cônes

Pour comprendre comment la géométrie des molettes peut affecter la façon dont les dents coupent la roche, considérons le cône pour formations tendres schématisé sur la figure ci-dessous. Il a deux angles coniques de base, et aucun d'entre eu n'a son sommet au centre de l'outil. Comme les cônes sont obligés de tourner autour de l'axe de l'outil, ils glissent en même temps qu'ils tournent et ont une action de gouge et de cisaillement efficace pour le forage des formations tendres. L'augmentation de cet effet pour améliorer la vitesse d'avancement dans les formations tendres s'obtient en décalant les axes des cônes par rapport à l'axe de rotation de l'outil.

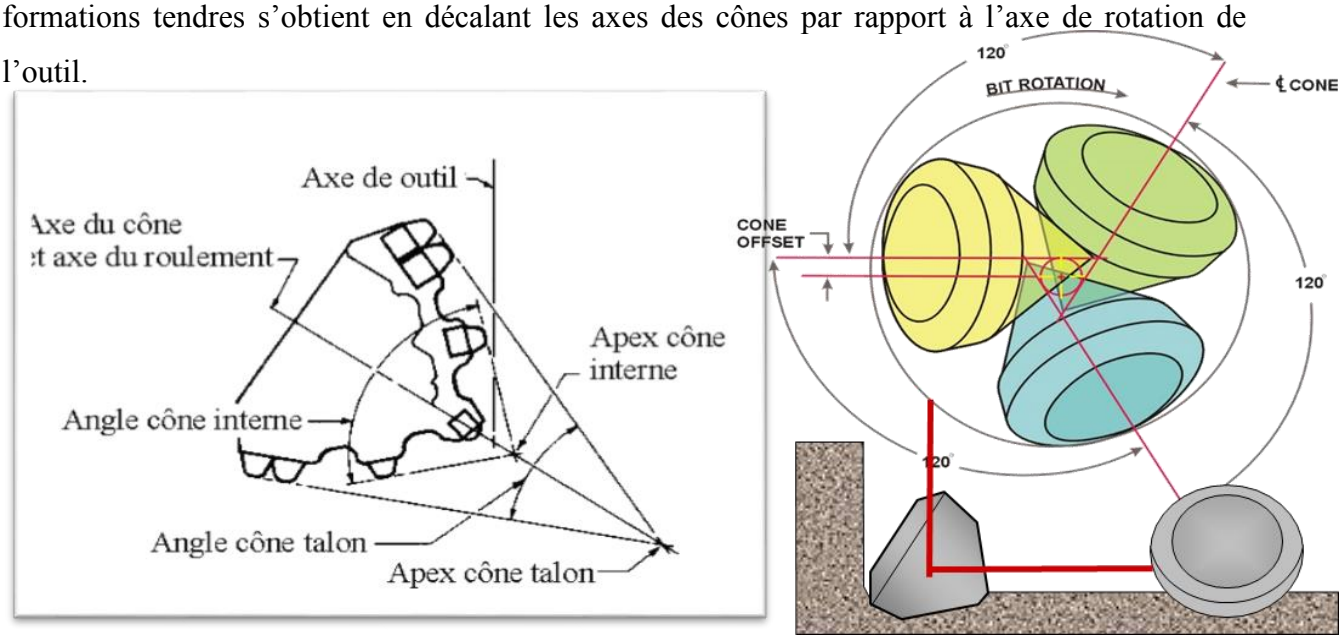


Figure 9: Arrangement pour formation tendre.

L'offset (distance entre l'axe des cônes et l'axe de l'outil) est d'autant plus grand que la divergence des axes est grande.

Les cônes des outils pour formations dures ont un mouvement plus proche du roulement vrai, et présentent peu d'offset. De ce fait, ils brisent la roche surtout par écrasement (figure ci-dessous).

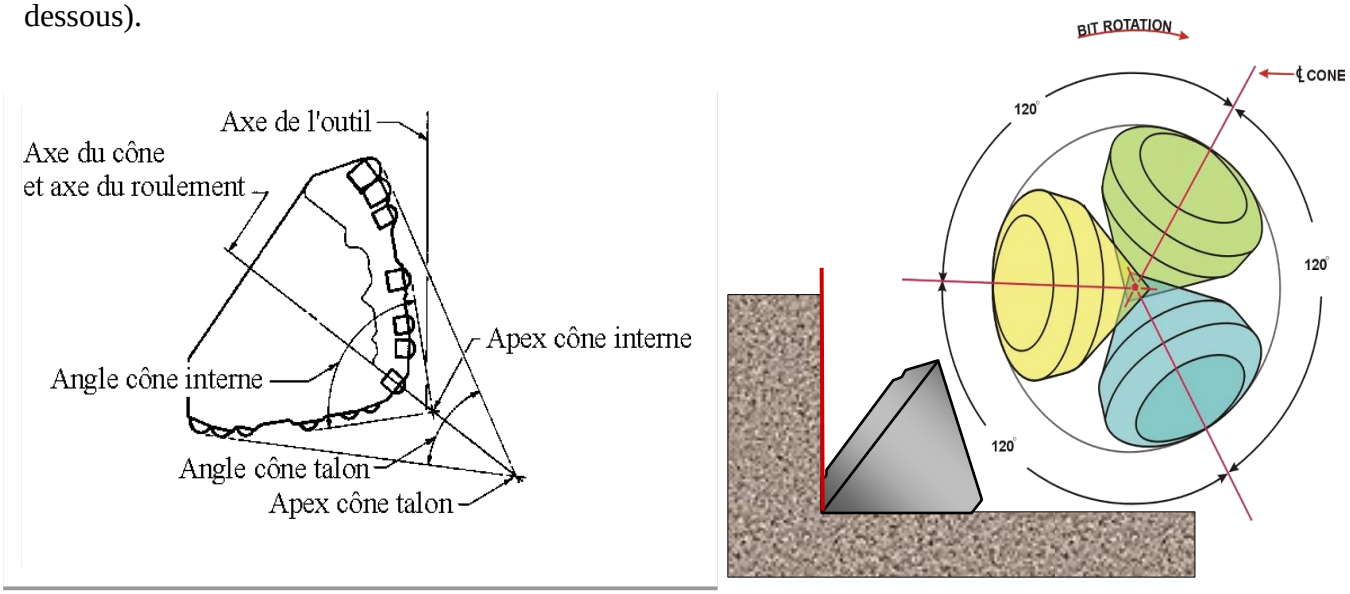


Figure 10: Arrangement pour formation dure.

2.5. Conception des paliers

Trois types de paliers existent actuellement :

- Roulements à billes ou rouleaux non étanches.
- Roulements à billes ou rouleaux étanches.
- Paliers de friction.

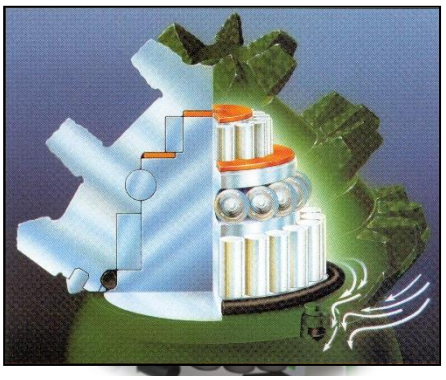


Figure 11: Roulement à rouleaux, rétention par billes

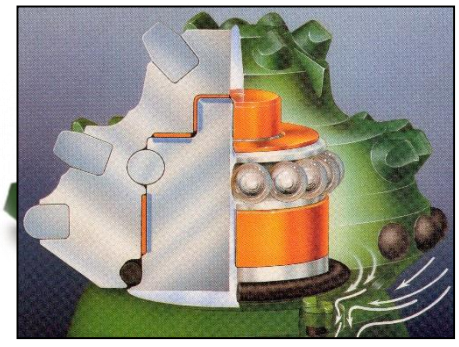


Figure 12: Palier lisse, rétention par billes.

Les roulements à billes ou rouleaux non étanches et non lubrifiés sont principalement utilisés de nos jours pour les débuts de trou où les temps de manœuvre étant courts, la durée de vie de l'outil est moins pénalisante. Les cas où des vitesses de rotation importantes sont souhaitées

leurs sont aussi favorables. Lorsque le fluide de forage est soit l'air, le gaz ou la mousse, on utilise également des outils à roulements à billes et rouleaux non étanches. Toutefois, ces outils sont conçus de manière à ce qu'une partie du fluide de forage soit orientée vers le palier afin de le refroidir.

Le palier étanche à billes ou rouleaux fut créé pour les outils à picots. Actuellement, ce système équipe principalement les outils à dents et sa durée de vie est au moins égale à celle des éléments de coupe.

Le palier de friction développé pour faire coïncider sa durée de vie avec celle des éléments de coupe au carbure ne contient aucun élément mobile, mais uniquement un palier mâle ajusté sur l'alésage interne du cône. Les zones de contact entre l'arbre du palier et l'alésage du cône sont carburées, revêtues de métaux spéciaux et reçoivent un traitement spécial augmentant la résistance à l'usure et protégeant du grippage.

2.6. Système de lubrification

Les outils à paliers étanches ont leur système de lubrification dans chaque bras. Celui-ci comprend un réservoir à graisse, un compensateur par membrane caoutchouc et un canal étanche. Le compensateur égalise la pression dans le roulement entre celle du fluide de forage et celle de la graisse encapsulée à la fabrication.

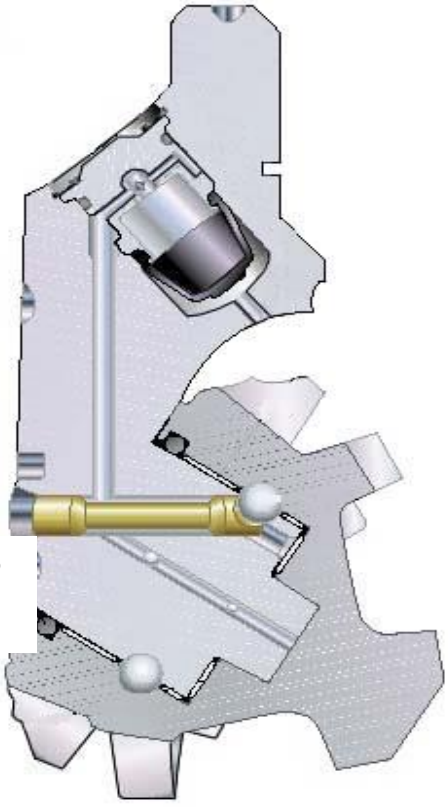


Figure 13: Système de lubrification des paliers.

2.7. Mode de destruction de la roche

L'efficacité d'un outil à molettes dépend de sa capacité à broyer et évacuer les morceaux de roche. Ces outils travaillent par :

• Compression produisant la pénétration de la dent ou du picot dans la formation et l'éclatement de la roche. Plus le terrain est tendre, plus la dent devra être longue pour produire le meilleur avancement. L'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille. La contrainte de compression appliquée sur la formation induit une fracture.

• Arrachage du copeau de terrain par ripage de la molette sur elle-même.

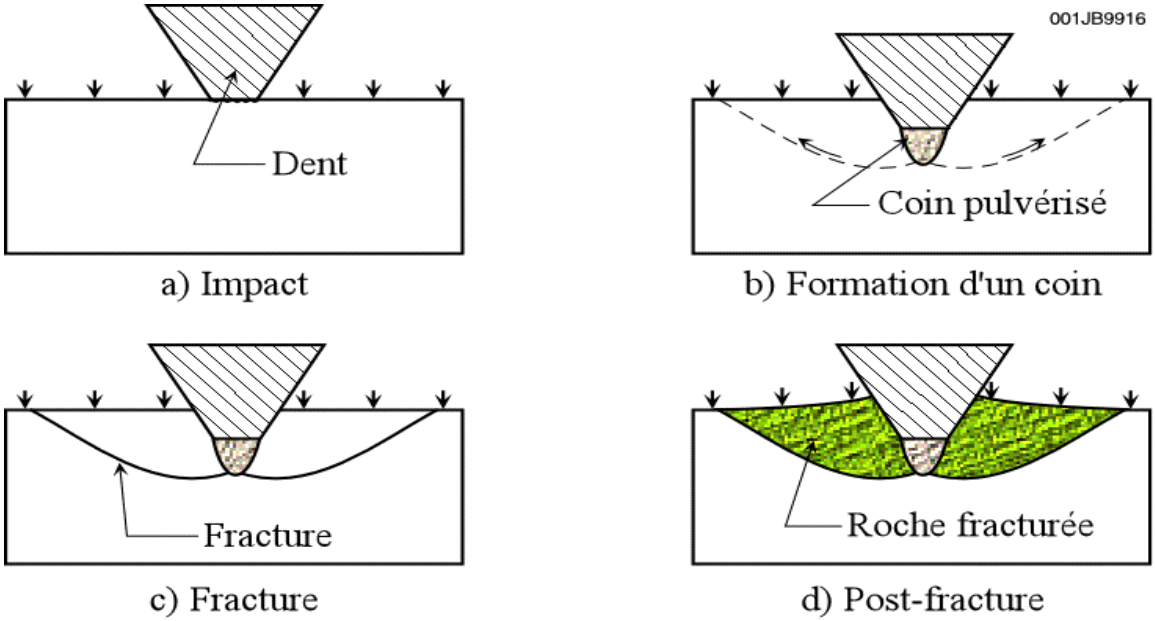


Figure 14: Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche.

Ces deux effets sont complémentaires. Ils sont privilégiés l'un par rapport à l'autre suivant la dureté de la roche à broyer. Pour un terrain tendre, l'effet de ripage sera prépondérant.

Ces deux effets sont gouvernés par la géométrie des cônes. Pour privilégier l'effet de ripage, la rotation du cône doit s'éloigner de façon significative d'une rotation vraie.

2.8. L'hydraulique à l'outil

Le tricône dit « conventionnel » comporte un simple passage de fluide dans l'axe de l'outil (un seul orifice central). Le fluide lave l'outil par l'intérieur des cônes et avec moindre efficacité que des jets. On ne le rencontre pratiquement que pour les gros diamètres de forage.

L'outil à jet comporte trois duses (jet nozzle) situées entre les bras des tricônes. On peut régler le jet à son efficacité maximale en changeant le diamètre de passage. La turbulence est efficace pour des vitesses comprises entre 80 et 150 m/s. Les jets ont pour rôle de nettoyer les molettes, de refroidir les paliers et surtout de refouler les cuttings vers l'espace annulaire. Sur certain outils des duses rallongées améliorent les performances de nettoyage.

duze pour les outil PDC

duze pour les outil TRICONE

Standard Jet Nozzle Mini-Exte

A selection of mini-extended jet nozzles

A selection of diverging (center jet) nozzles

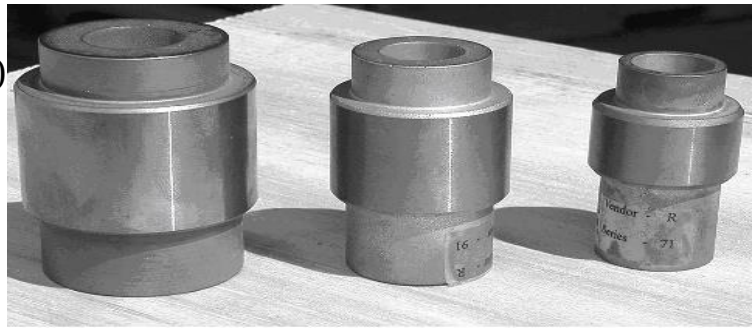


Figure 15: Duses interchangables

III.3. Les outils a diamants

Les outils diamant ont fait leur apparition vers 1870 pour la recherche du charbon. L'utilisation du diamant par l'industrie du pétrole est plus récente. L'utilisation du diamant s'est étendue au forage pétrolier vers 1930 (carottage). En Europe, les outils diamantés sont apparus vers 1953.

Dans le forage, il existe deux types de diamants qui sont utilisés pour la fabrication des outils à diamants :

- Les diamants naturels.
- Les diamants synthétiques.

3.1. Le diamant

Le diamant (carbone cristallisé) est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80 000 bar (carbure de tungstène : 50 000 bar, acier C.45 : 15 000 bar). Son point de fusion est très élevé (3650°), mais il se transforme superficiellement en graphite vers 1450°.

Le diamant se mesure en poids dont l'unité est le carat (1 carat = 0,2 grammes).

Pour les outils de forage, la taille des pierres se mesure en nombre de pierres par carat et varie généralement entre 2 et 12 pierres au carat.

a. Qualité des diamants

Il existe plusieurs qualités de diamants industriels :

- Le Carbonado (Amérique de sud).
- Le Congo (Afrique de sud).
- West Africa (Afrique de sud).

3.2. Types d'outils diamantés

Les outils diamantés sont de trois types :

- à diamants naturels.
- à taillants PDC (pollycristallin diamond compact : diamant polycristallin) .
- à taillants TSP (thermally stable pollycristallin : diamant thermostable).

3.3. Les outils à diamants naturels

La taille, le type et la quantité de diamants pour un outil donné dépendent de la vitesse d'avancement prévue, de la taille des déblais et de l'homogénéité de la formation à forer. Lors du forage, à faible vitesse de pénétration, des formations dures, les déblais sont très petits et sont plus facilement évacués qu'aux grandes vitesses d'avancement. De petits diamants peuvent être utilisés pour obtenir une contrainte maximale sur le front de taille, sans nuire à l'évacuation des déblais. Des diamants plus grands sont utilisés pour arracher un volume de roche plus gros, et avoir plus d'espace pour le passage des déblais.

Fig[illegible]tils à dia[illegible]turels.

Bien qu'il existe des règles générales pour le choix de la taille des diamants, l'expérience acquise lors de passes d'outils précédents reste le meilleur des guides.

a. Utilisation des outils à diamants

Comme tout choix d'outil, la décision de forer au diamant doit reposer sur une analyse de coût, certaines situations en forage suggèrent l'utilisation économique d'un outil diamant :

- Lorsque la durée de vie des outils à molettes est très courte du fait de l'usure des roulements ou des dents, ou de la cassure des dents.
- Lorsque la vitesse d'avancement est très faible (1,5 m/h ou moins), à cause d'une densité de boue élevée, ou d'une puissance hydraulique insuffisante de l'appareil de forage.
- En diamètre six pouces ou moins, où la durée de vie des outils à molettes est limitée.
- Pour les montées d'inclinaison en forage dirigé.
- Quand le poids sur l'outil est limité.
- En turboforage, où la vitesse de rotation élevée favorise l'avancement de l'outil diamant.

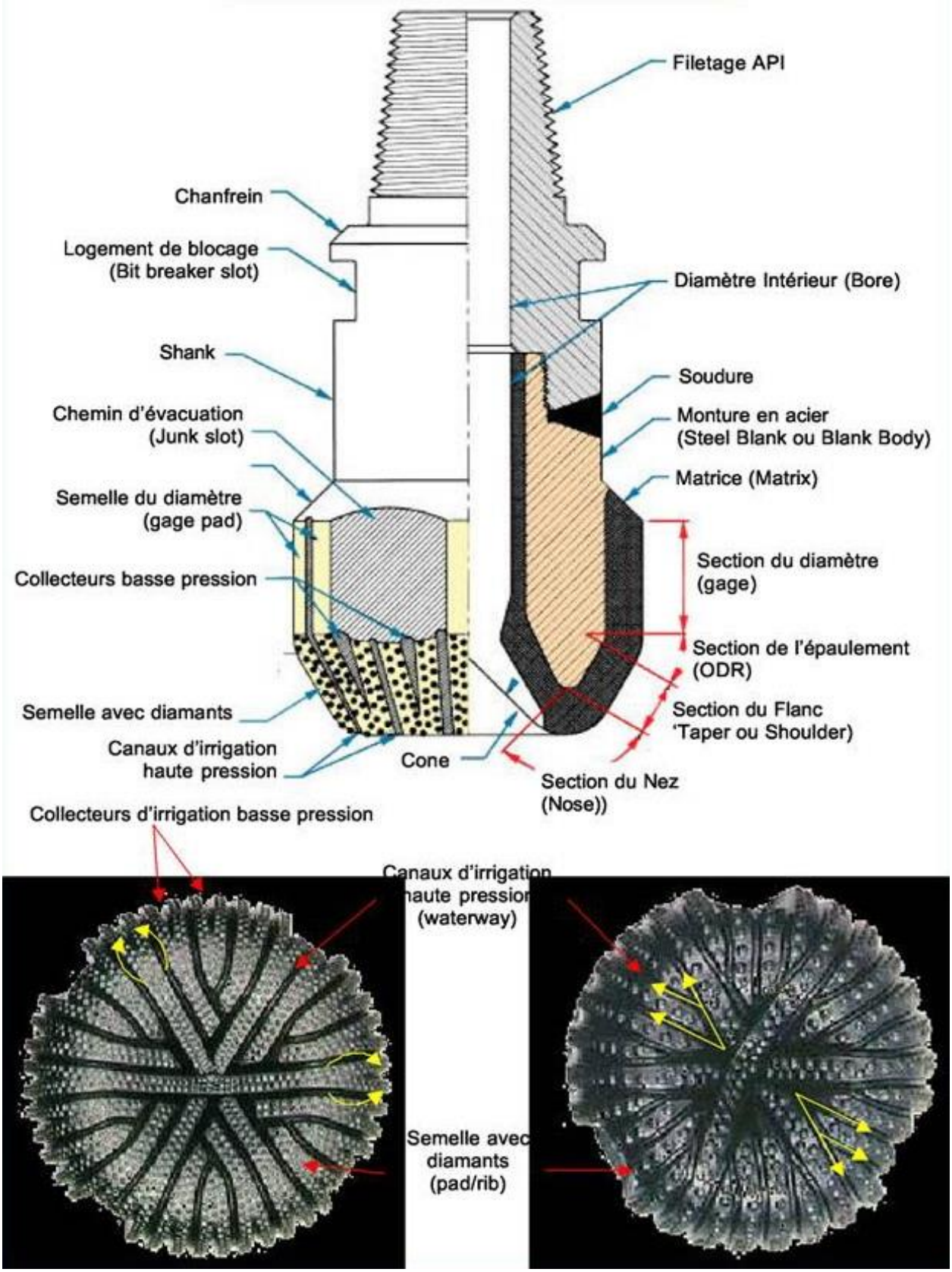


Figure 17: Nomenclature des éléments des outils à diamants.

3.4. Les diamants synthétiques

a. Les diamants PDC (polycristalline diamond compact)

En 1971, GENERAL ELECTRIC a réussi à faire la synthèse du diamant en laboratoire à partir d'un mélange de graphite, du nickel et du cobalt soumis à des conditions de pression et de TºC élevées (10000 bars et 1500ºC).

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 -

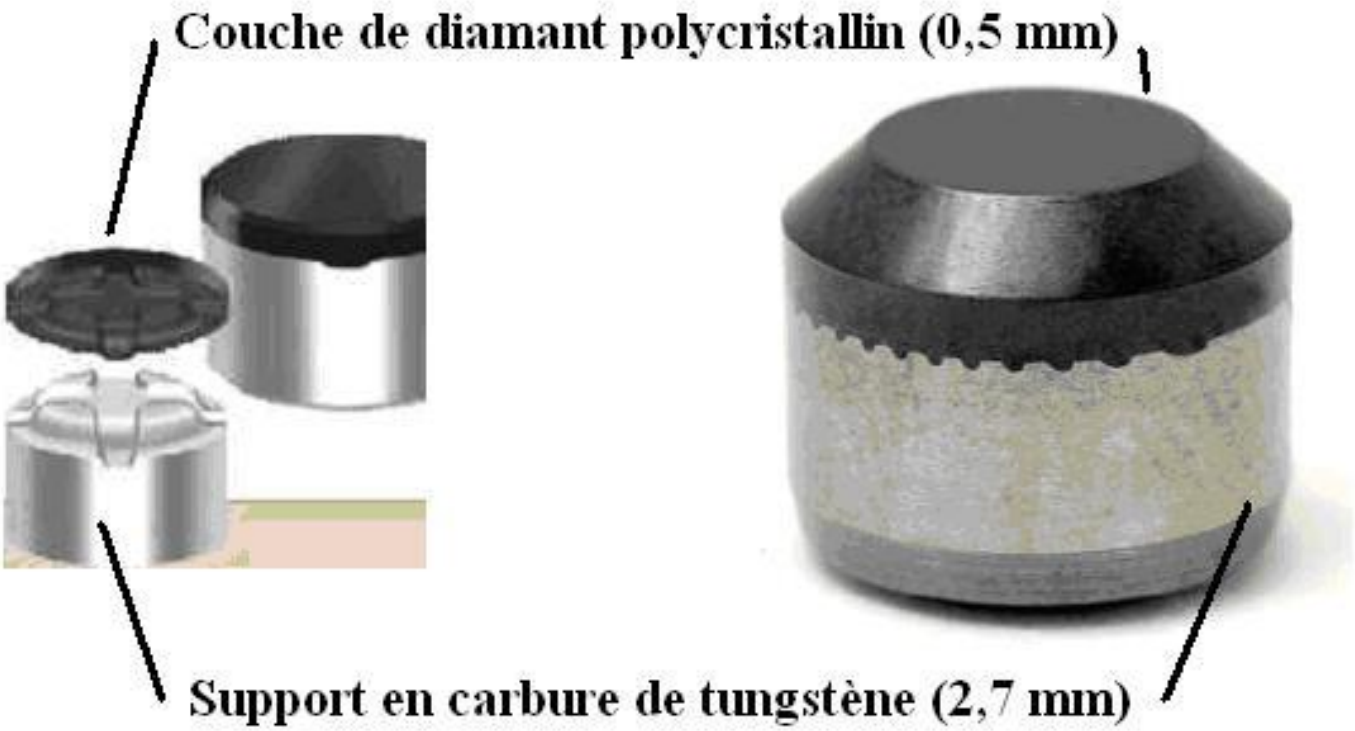


Figure 18: Structure d'un PDC.

Les diamants obtenus sont polycristallins, d'où le nom des PDC. La couche ainsi formée est constituée de petits cristaux qui ce sont développés dans des directions aléatoires. Le cobalt, utilisé pour catalyser la synthèse, sert également du liant entre des cristaux. Cette structure polycristalline confère au diamant synthétique une résistance à la compression et à l'usure élevée que celle du diamant naturel. Cependant, les coefficients de dilatation thermiques du liant et de diamant sont très différents. A partir de 400ºC, la dilatation différentielle des différents constituants produit la rupture des liaisons entre cristaux et le diamant PDC perd progressivement sa résistance, la structure n'est plus stable à 750ºC. Il est donc nécessaire de maintenir le diamant PDC à une température la plus faible possible.

Les compacts pouvant être brasés sur le corps de l'outil où peuvent être fixés sur des supports cylindriques en carbure de tungstène emmanchés en force à chaud dans le corps de l'outil.

b. Les TSP (Thermally Stable Polycristalline)

Pour pallier à l'instabilité thermique des diamants PDC, Général Electric a mis au point un diamant synthétique ou le catalyseur est éliminé par acidification. Le produit obtenu est stable jusqu'à des températures de l'ordre de 1200ºC. Cependant, il n'est pas possible de fixer le diamant obtenu sur un support quelconque. Le diamant TSP devra être maintenu en place mécaniquement comme le diamant naturel.

Les diamants TSP sont disponibles sous plusieurs formes :

- Triangulaire (3 pierres par carat) ; utilisée pour formations moyennement dures.
- Disques (de l'ordre d'une pierre par carat) ; utilisée pour forer les mêmes formations mais est plus performantes dans le cas où une grande résistance à l'usure et aux chocs est demandée.

Les diamants TSP peuvent être regroupés pour former des structures en mosaïques de la dimension des diamants PDC, qui a permis d'augmenter la vitesse d'avancement et d'allonger la durée de vie de l'outil dans les formations tendres et abrasives, là où les diamants PDC ne sont pas rentables.

3.5. Mode de destruction de la roche par les outils à diamant

a. Les diamants naturels

Il agit par abrasion en creusant un sillon autant par fracturation que par cisaillement, il laboure la roche. L'effort d'écrasement a autant d'importance que l'effort tangent. Il est nécessaire

d'appliquer un poids et une vitesse de rotation relativement élevés pour forer. Ce type de diamant est ré

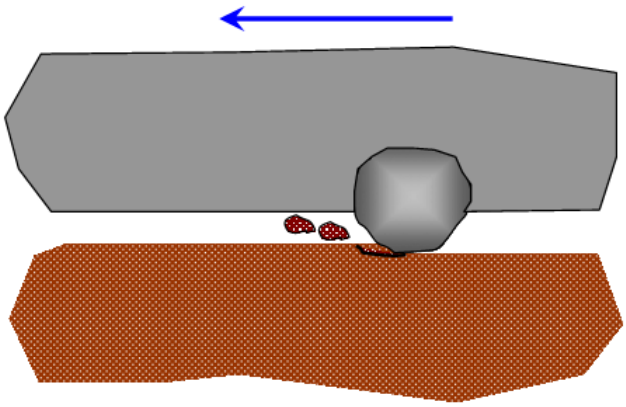


Figure 19: Action d'un outil à diamant naturel.

b. Les outils PDC

Ils travaillent à la façon d'une machine-outil en cisaillant la roche. La mise en action de l'élément de coupe nécessite en premier, un effort d'écrasement entraînant la pénétration dans la formation. Les taillants soulèvent les coupeaux ce qui contribue à un meilleur nettoyage de front de taille, ce qui évite le bourrage de l'outil et avoir des vitesses d'avancement maximales.

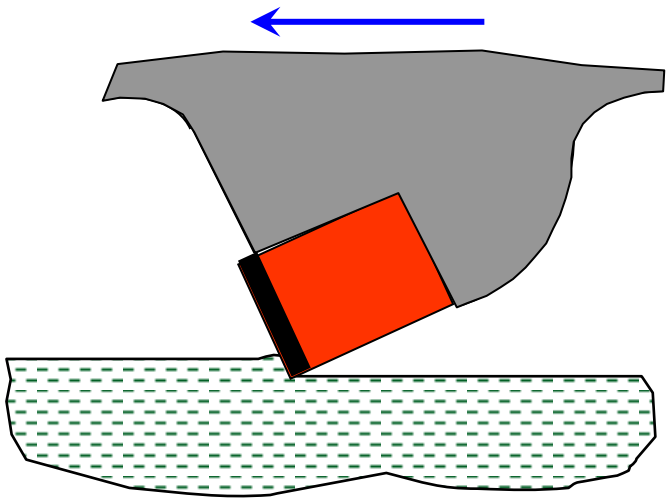


Figure 20 : Action d'un taillant PDC.

c. Les outils TSP

L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de la destruction des diamants PDC et des diamants naturels. Lorsque le diamant

TSP est conçu pour un terrain tendre, il cisaille la roche. Dans les formations dures, il laboure la roche (par fracturation).

Quelques soit le type de diamant utilisé, la friction entre les taillants et la formation produit beaucoup de chaleur, le débit de circulation doit être important pour refroidir correctement l'outil et éviter de détruire les diamants.

Ces trois types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécaniquement différente : le diamant naturel abrase la roche et travaille comme une macro meule, les diamants polycristallins cisaillent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux. La forme de tous ces outils de forage est monobloc ce qui leur confère une certaine solidité.

3.6. Conception et fabrication des outils a diamants

a. Nature du corps de l'outil

- Les diamants naturels ne peuvent être fixés sur l'outil car ils n'ont pas de mouillabilité aux métaux, uniquement par sertissage ou en imprégnation dans la matrice.
- Les diamants TSP peuvent être fixés par brasage, sertissage ou en imprégnation.
- A cause de leur faible résistance à la température, les PDC ne peuvent pas être sertis ; ils sont fixés par brasage ou montés de la même façon que les picots en carbure de tungstène.

Il existe deux types de corps :

- **Une matrice en carbure de tungstène,** ayant un point de fusion suffisamment bas pour ne pas endommager les diamants. Elle est obtenue par moulage.
- **Un corps en acier,** réalisé avec une seule pièce (le filetage est taillé directement sur le corps). L'usinage est contrôlé par ordinateur, cela permet d'obtenir une plus grande précision et des formes plus répétitives que par moulage.

Il existe des supports de compacts de formes et de longueurs différentes qui sont emmanchés à chaud dans des trous usinés dans le corps de l'outil.

Généralement, les corps en acier sont plutôt adaptés aux formations tendres, homogènes, non abrasives.

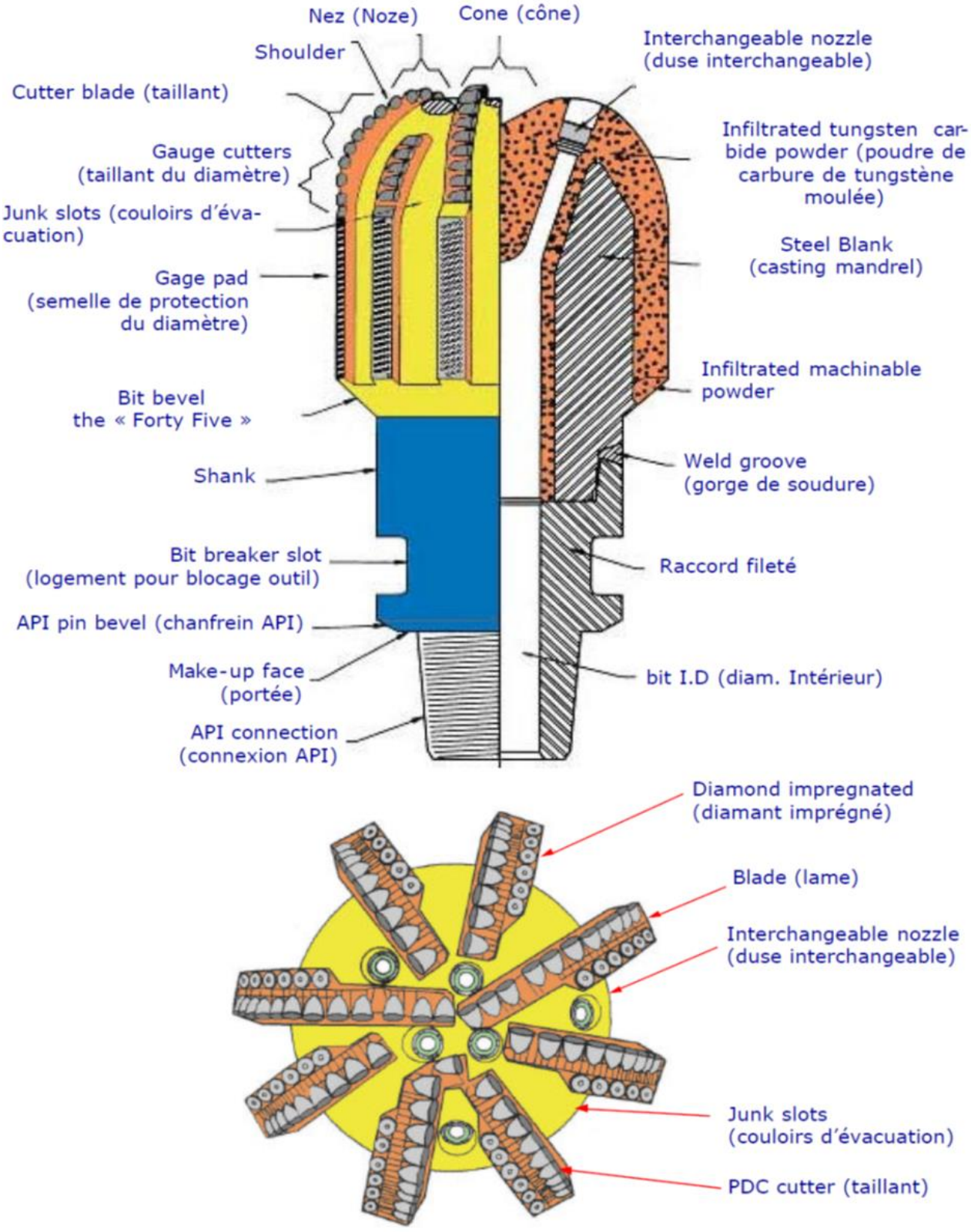


Figure 21: Terminologie outil PDC - Matrix body.

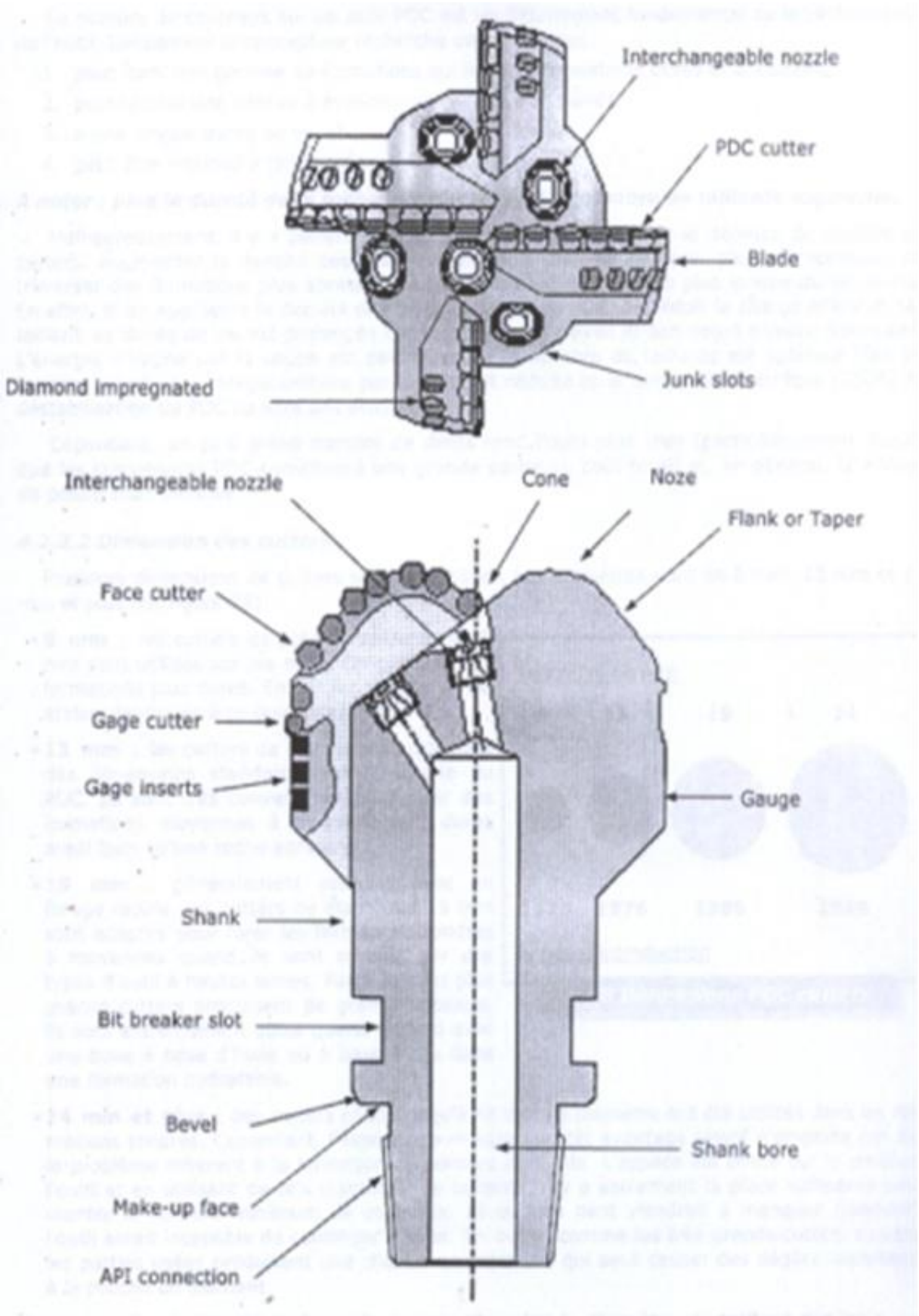


Figure 22: Terminologie outil PDC – Steel body.

b. Fabrication des outils

- **Les outils à diamant naturel :**

On procède d'abord à la fabrication d'un moule en graphite ou la position de chaque diamant et des lignes d'eau sont prévues.

L'emplacement de chaque diamant est creusé avec une petite fraise. Ensuite, les diamants sont placés à la main dans leurs logements, un par un et maintenus en place par collage.

Le moule est rempli de carbure de tungstène en poudre auquel on ajoute un liant dont sa composition reste le secret de chaque fabricant. Après mise en place de la monture en acier, l'ensemble est mis en four. Le raccord fileté est rapporté par soudure sur la monture en acier.

- **Les diamants PDC :**

Le procédé de la fabrication est identique à celui utilisé pour les diamants naturels. Pour le passage au four, les diamants PDC sont remplacés par des pastilles en graphite car ils ont une faible résistance thermique. Lorsque la matrice est terminée, ces pastilles sont enlevées et les taillants sont ensuite brasés. La brasure engendre des contraintes thermiques ; ce qui réduise la capacité des taillants.

- **Les diamants en imprégnation :**

La fabrication des outils reste artisanale : elle débute par l'usinage d'un moule en graphite. A l'intérieur de ce moule, on trace les lignes et l'emplacement de chaque diamant ainsi que l'emplacement des canaux de circulation du fluide de forage. Chaque emplacement de diamant est creusé à l'aide d'une petite fraise. Les canaux d'irrigation appelés aussi lignes d'eau sont fabriqués en relief dans le moule avec un mastic spécial. On procède en suite à la mise en place des diamants, un par un, dans chaque logement, où ils sont collés. Le moule est rempli de grains en carbure de tungstène auquel on ajoute un liant dont la composition reste le secret de chaque fabricant. Le point de fusion du liant se situe entre 400 et 1400 °C selon sa composition et varie selon la dureté de la matrice que l'on veut obtenir. Après mise en place d'un noyau en acier, l'ensemble est mis au four. La température ne doit pas excéder la température de début de graphitisation du diamant. Puis on usine le filetage.

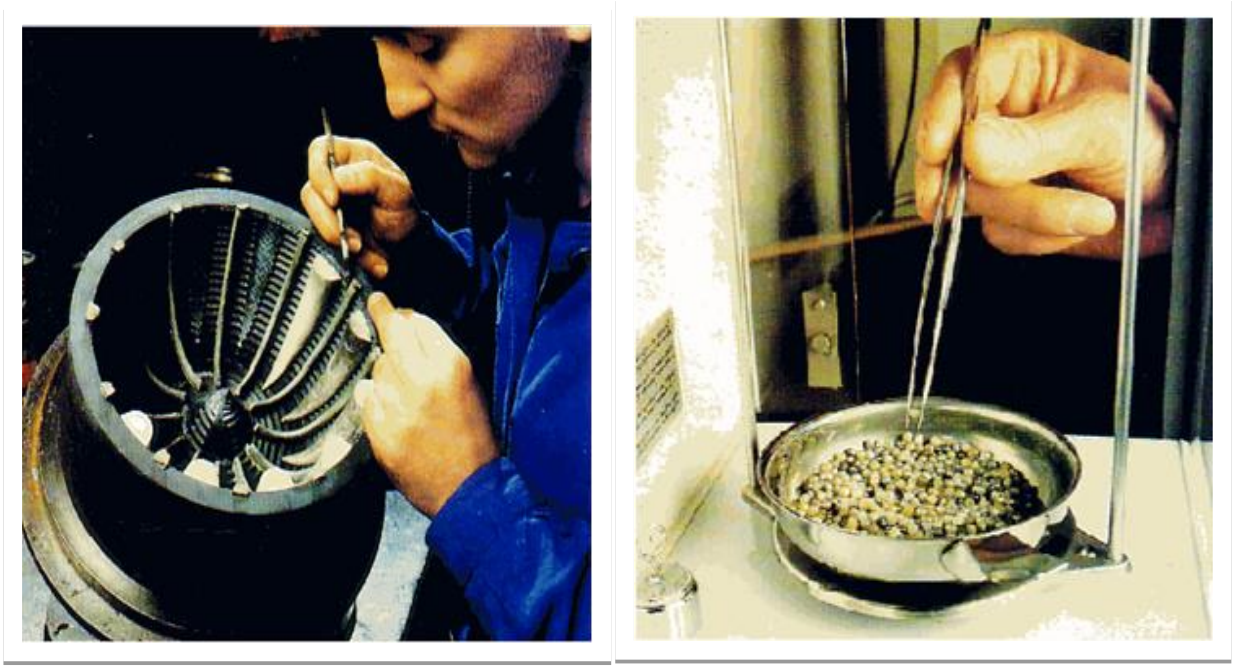


Figure 23: Fabrication des outils a diamant naturel.

c. Profils des outils

Les études montrent que le profil de l'outil a un effet très important sur les performances des outils. C'est l'un des critères pris en considération par les fabricants pour la conception de l'outil.

On distingue trois types principaux de profils : le profil plat (ou cône peu profond), le profil conique et le profil parabolique. Le profil sera déterminé par la longueur relative de flanc, du nez et de cône central de l'outil.

- **Le profil plat :**

Ce profil est utilisé dans les formations tendres (actuellement ces outils sont généralement des outils à lames qui ont un nombre de cutters limité).

- **Le profil double cônes :**

Ce type de profil est utilisé généralement pour des formations plus dures ce qui a pour avantage d'augmenter le nombre de cutters, de plus les cutters s'usent d'une manière homogène pour ce profil par rapport aux autres types.

- **Le profil parabolique :**

Ce profil aux mêmes caractéristiques que le profil double cônes, en plus il est plus facile à diriger avec un moteur du fond (turboforage).

Dans un puits dévié, ce profil donne une plus grande surface sur laquelle un grand nombre de cutters peut être fixés.

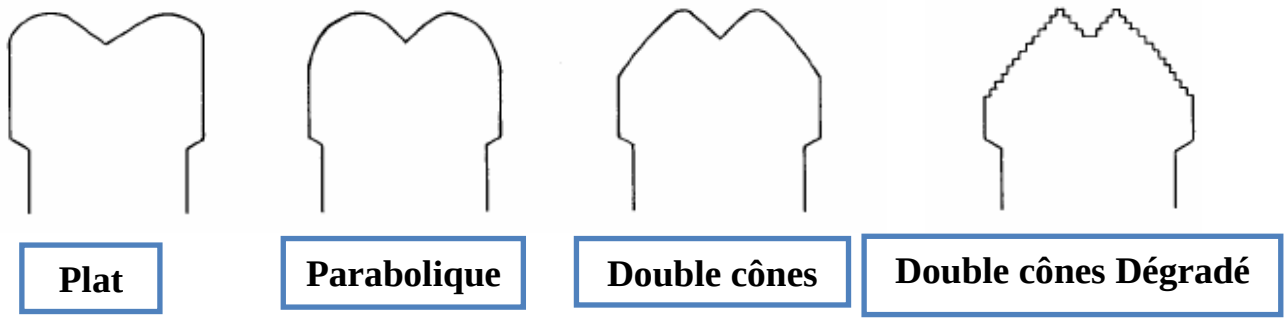


Figure 24: Différents types de profils des outils PDC.

La répartition de la densité des taillants sera différente suivant les profils. Ces différents profils seront adaptés à des conditions spécifiques (type de formation, type de forage, etc.).

- Le flanc est la partie située entre la partie frontale et le diamètre de l'outil. Son rôle est important lorsque l'outil tourne à grande vitesse.
- Le nez est la partie de l'outil qui pénètre en premier dans la formation, donc c'est la partie exposée en premier lieu aux changements des formations. La densité des taillants doit être telle sorte que l'outil puisse supporter des contraintes supplémentaires lorsqu'il pénètre dans une formation plus dure. Le nez joue un rôle important dans la réalisation de la trajectoire du puits.
- Le cône central réduit les mouvements latéraux de l'outil et augmente sa stabilité. Utilisé dans les formations consolidées, il facilite le maintien d'une trajectoire rectiligne. Il joue un rôle très important dans le comportement des outils PDC en déviation. C'est pour cette raison que ces outils présentent une grande variété de partie centrale suivant l'application que l'on désire en faire.

III.4. Classification IADC (International Association of Drilling Contractors)

4.1. Classification IADC des outils à molettes

Le système de classification des outils à molettes comprend quatre caractères (trois chiffres et une lettre) et permet de classer tous les outils tricônes à denture fraisée et à pastilles.

La classification IADC est représentée par 4 caractères : 3 chiffres et 1 lettre

a. Premier chiffre

Il renseigne sur la nature des éléments de taille (dents en acier ou picots de carbure), sur la dureté, l'abrasivité et la résistance à la compression des terrains que l'on peut forer avec l'outil.

Les chiffres 1, 2, 3 caractérisent les outils à dents en acier et correspondent à des duretés de terrains croissantes.

Les chiffres 4, 5, 6, 7 et 8 caractérisent les outils à picots en carbure de tungstène et correspondent également à des duretés de terrains croissantes.

b. Deuxième chiffre

Les chiffres 1, 2, 3 et 4 définissent une sous-classification de la dureté des formations dans chacune des 8 classes déterminées par le premier chiffre (1 indique une formation tendre tandis que 4 indique une formation dure).

c. Troisième chiffre

Les chiffres 1 à 7 définissent le type de roulement utilisé et précisent la présence ou l'absence de protections par pastilles en carbure de tungstène sur les bords d'attaque des molettes :

1 : Roulements à rouleaux non étanches et sans pastilles de protection,

2 : Roulements à rouleaux non étanches et sans pastilles de protection pour le forage à l'air,

3 : Roulements à rouleaux non étanches avec pastilles de protection des molettes,

4 : Roulements à rouleaux étanches sans pastilles de protection des molettes,

5 : Roulements à rouleaux étanches et avec pastilles de protection des molettes,

6 : Paliers lisses étanches et sans pastilles de protection des molettes,

7 : Paliers lisses étanches avec pastilles de protection des molettes.

d) Lettre additionnelle :

A : Outils à paliers de friction adaptés pour le forage à l'air,

C : Outils à jet avec duse centrale,

D : Outils spéciaux pour forage en déviation,

E : Outils à jets avec duses rallongées (extended nozzles),

G : Outils à protections renforcées,

J : Outils à duses inclinées,

R : Outils pour utilisation en percussion,

S : Outils à dents acier standard,

X : Outils à picots en forme de biseau,

Y : Outils à picots coniques,

Z : Outils à picots de forme autre qu'en biseau ou conique.

Le code IADC de chaque outil est indiqué par le fabricant. Il doit être considéré comme un moyen de comparaison entre fabricants. Chaque outil peut forer d'autres formations que celles dans lesquelles il est classé, il faut se référer aux données du fabricant pour plus d'informations.

IADC classification : RC bits

A Hardness Series		B Type		C Bearing and Gauge Protection		D Feature code	
Milled Tooth		1	Very soft	1	Standard, nonsealed bearing	A	Air Drilling Application
1	Very Soft	2	Soft	2	Air Lubricated, for air drilling	L	Lug Pads
2	Medium Soft	3	Medium	3	Standard, nonsealed bearing with gauge protection	B	Special Bearing Seal
3	Soft	4	Hard	4	Sealed roller bearing	M	Motor Application Bit
TCI				5	Sealed roller bearing with gauge protection	C	Center Jet
4	Medium			6	Sealed journal bearing	S	Standard steel tooth model
5	Medium - Hard			7	Sealed journal bearing with gauge protection	D	Deviation control
6	Hard					T	Two-cone bit
7	Very Hard					E	Extended jet
8	Hardest					W	Enhanced cutting structure
				Example: 415X		G	Additional gauge and body protection
				4	TCI - Medium Formation	X	Predominantly chisel tooth inserts
						H	Horizontal steering application
				1	Very soft	Y	Predominantly conical tooth inserts
				5	Sealed roller bearing with gauge protection	J	Jet deflection bit
				X	Predominantly chisel tooth inserts	Z	Other shape inserts

Figure 26:Classification IADC des outils à molettes.

4.2. Classification IADC des outils à diamant (PDC)

La classification IADC 1987 remplace celle de 1981 qui ne s'appliquait qu'aux outils à diamants naturels. Cette classification se fait à l'aide de 04 caractères. Elle est cohérente avec celle des tricônes.

Comme les codes d'usure sont communs entre les outils tricônes et les outils à éléments fixes, les rapports journaliers, rapports d'outils et bases de données se remplissent de la même façon.

a. Premier caractère

C'est une lettre et définit le type de diamant utilisé comme élément de coupe et le matériau constituant le corps de l'outil :

D : pour les outils diamants naturels à corps fritté ;

M : pour les outils PDC à corps fritté (alliage à base de carbure de tungstène) ;

S : pour les outils PDC à corps en acier ;

T : pour les outils TSP à corps fritté ;

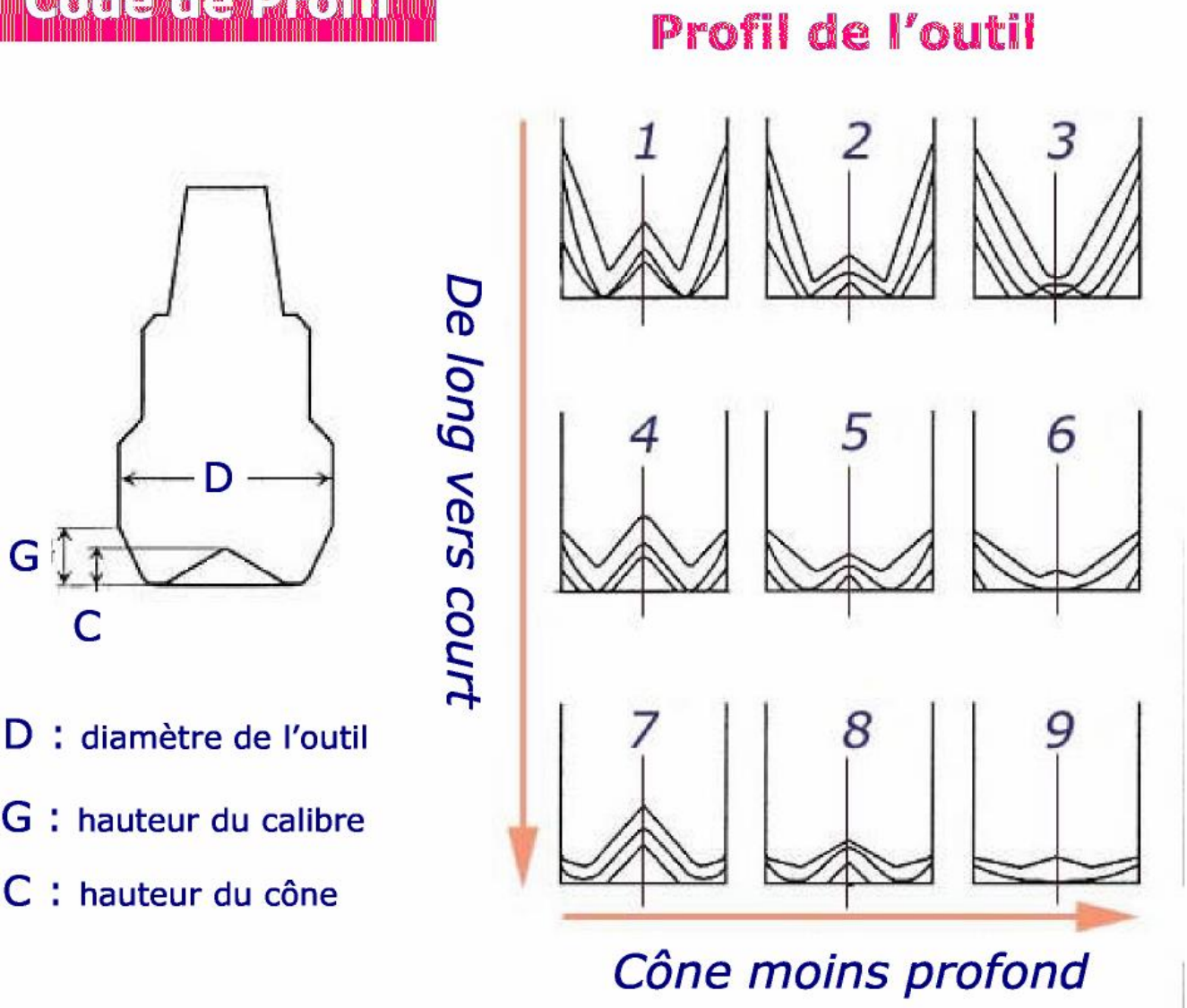
O : pour les autres types.

Si l'outil comporte plusieurs types de diamants, et un seul type est élément de coupe, ont en général, une fonction de protection.

b. Deuxième caractère

Un chiffre qui définit le type de profil (voir le tableau 01 ci-dessous).

Code 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**

Figure 26: Code des profils.

c. Troisième caractère

Un chiffre ou une lettre, qui définissent l'hydraulique de l'outil (voir le tableau Ci-dessous).

Placement des Eléments de coupe	Type de dusage		
	Duses interchangeables	Duses fixes	Conventionnel
Lames	1	2	3
Nervures	4	5	6
A plat	7	8	9

Tableau 01 : Code de l'hydraulique.

La lame correspond à une surépaisseur supérieure à 1 pouce par rapport au corps de l'outil.

La nervure correspond à une surépaisseur inférieure à 1 pouce par rapport au corps de l'outil.

Les lettres R (écoulement radial), X (écoulement transversal), O (autres) remplacent généralement les codes 6 et 9 pour les outils à diamant naturel et les outils TSP.

d. Quatrième caractère

Un chiffre qui définit la taille des éléments de coupe et leur densité.

Taille des éléments de coupe	Densité		
	Faible	Moyenne	Grande
Grande	1	2	3
Moyenne	4	5	6
Faible	7	8	9

Tableau 02 : Densité des éléments de coupe.

Taille des éléments de coupe	Diamant naturel (Pierres par carat)	Diamant synthétique (hauteur utile du cutter)
Grande	< 3	> 5/8"
Moyenne	3 – 7	3/8 – 5/8"
Faible	> 7	< 3/8"

Tableau 03 : Taille et densité des éléments.

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 vitesse ou à déviation importante, demandant donc plus de diamant en périphérie, tandis que les profiles 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 floue et présente quelques lacunes telles de ne pas spécifier le nombre de lames d'un outil, ou de ne pas renseigner pas sur le profil de la lame (droite ou spiralée), 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.

IADC classification : PDC bits

A Bit body		B Cutter Density*		C Cutting structure		D Bit profile.	
"M"	Matrix	1	Less than 30 x 0.5in diam PDC cutters	1	> 24 mm	1	Short fishtail
"S"	Steel	2	30 to 40 x 0.5in diam PDC cutters	2	14 - 24 mm	2	Short profile
"D"	Diamond	3	40 to 50 x 0.5in diam PDC cutters	3	8 -14 mm	3	Medium profile
		4	50 or more x 0.5in diam PDC cutters	4	< 8 mm	4	Long profile
Example: M434		5	No code				
M	Matrix	6	Larger than 3 Stones/carat				
4	Medium	7	Between 7 and 3 Stones/carat				
3	PDC 13mm	8	Smaller than 7 Stones/carat				
4	Long profile						

*Based on an 8½" PDC bit

Figure 27: Classification IADC des outils à diamant (PDC).

III.5. Détermination de l'usure des outils

La détermination de l'usure des outils est une opération difficile, elle peut varier d'une personne à l'autre. Cependant, une détermination précise et objective est très importante car elle servira à :

- sélectionner l'outil le mieux adapté au type de formation à forer,
- optimiser les conditions de forage (paramètres de forage, garniture, reprise du fond, emps de rotation, etc.),
- obtenir le prix de revient du mètre foré le plus faible,
- améliorer la conception des outils.

La détermination de l'usure se fait en considérant :

- les structures de coupe,
- les roulements,
- le diamètre de l'outil.

8 colonnes d'information (voir Tableau 6) sont utilisées pour rapporter l'usure de l'outil. Les 4 premières colonnes concernent les structures de coupe.

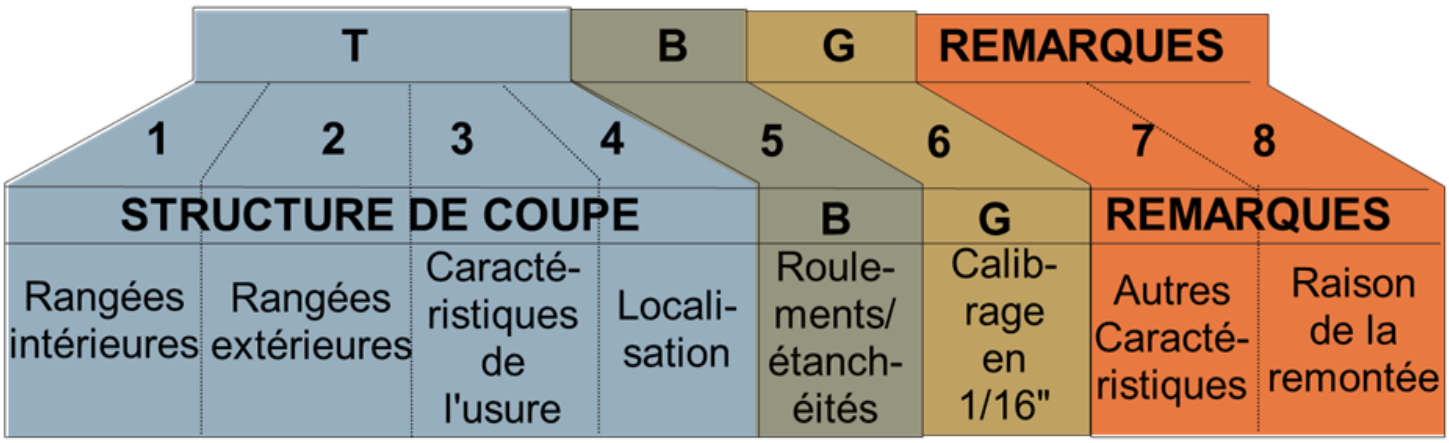


Figure 28: Description de l'usure des outils.

- **La première colonne** (rangées intérieures) indique par un chiffre de 0 à 8 l'usure des éléments de coupe des rangées intérieures (soit les 2/3 intérieurs des éléments de coupe).

Pour les outils à dents en acier, 0 indique qu'il n'y a pas de perte de hauteur des dents et 8 indique qu'il y a une perte totale de hauteur

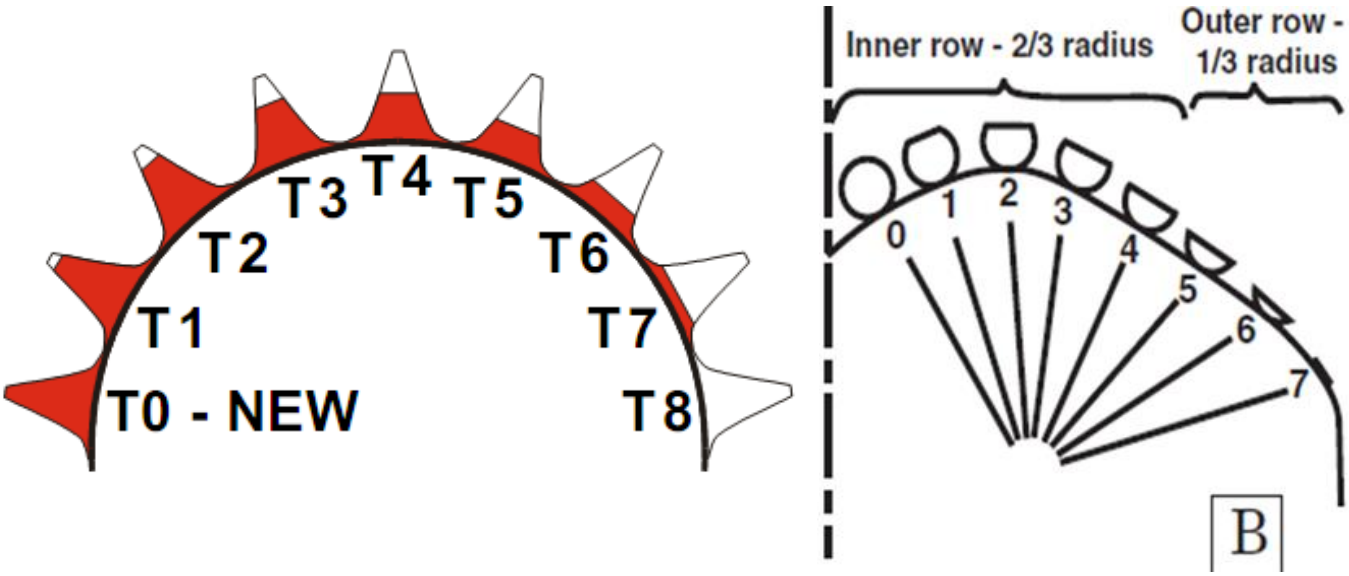


Figure 29: Codification de l'usure des dents.

Les éléments de coupe ne s'usent pas nécessairement de façon uniforme, l'usure devra être la moyenne des valeurs mesurées sur plusieurs éléments.

- **La deuxième colonne** (rangées extérieures) indique, également par un chiffre de 0 à 8, l'usure des éléments de coupe des rangées extérieures (soit les 1/3 extérieurs des éléments de coupe).

- **La troisième colonne** (caractéristique de l'usure) utilise un code à 2 lettres pour indiquer la caractéristique principale de l'usure des structures de coupe.

BC	Rupture de cone	LC *	Perte de cône
BT	Rupture de dents / éléments de coupe	LN	Perte de duse
BU	Outil bloqué (bourrage)	LT	Perte de dents / éléments de coupe

CC *	Cône fissure	OC	Usure excentrique
CD *	Cône bloqué	PB	Outil pincé
CI	Interférence entre cones	PN	Duse bouchée
CR	Outil carotté	RG	Usure périphérique
CT	Dents / éléments de coupe écaillés	RO	Joint d'étanchéité endommagé
ER	Erosion	SS	Usure avec auto-affûtage
FC	Dents aplaties	WT	Dents usées (SS/FC)
HC	Echauffement	TR	Usure entre les dents
JD	Endommagement par de la ferraille	WO	Outil sifflé
SD	Endommagement du bras (au niveau de la molette)	NO	Sans usure

- **La quatrième colonne** (localisation) utilise une lettre ou un chiffre pour indiquer l'emplacement de l'usure reportée dans la 4è colonne.

Outils à éléments de coupe fixes	Tricônes	
C : Cône	N : Rangées du nez	cône n° 1
N : Face	M : Rangées intermédiaires	cône n° 2
T : Flanc	H : Rangées arrières	cône n° 3
S : Epaulement	A : Toutes les rangées	
G : Diamètre		
A : Toute la surface / rangées		
M : Rangées intermédiaires		

- **La cinquième colonne** (roulements, étanchéité) utilise une lettre ou un chiffre (suivant le type de roulement) pour indiquer l'état des roulements.

Pour les roulements non étanches, une échelle linéaire de 0 à 8 permet de reporter le pourcentage de durée de vie utilisé : 0 indique que le % de durée de vie utilisé est 0 (roulements neufs), 8 indique que le % de durée de vie utilisé est 100 (cône bloqué ou perdu). Cette estimation est difficile car subjective.

Pour les roulements étanches, une lettre est utilisée pour indiquer l'état de l'étanchéité :

E indique que l'étanchéité est en état,

F indique que l'étanchéité est hors d'état,

N est utilisé quand il n'est pas possible de déterminer l'état de l'étanchéité,

X est utilisée pour les outils sans roulements (diamant, PDC, etc.).

- **La sixième colonne** (calibrage en 1/16 de pouce) indique la perte de diamètre :

I : indique qu'il n'y a pas de perte de diamètre.

Si l'outil a perdu en diamètre, la valeur est indiquée en 1/16 de pouce. Il y a deux façons de déterminer cette perte de diamètre :

-La règle des 2/3. La perte de diamètre est obtenue en multipliant par 2/3 la distance mesurée entre le calibre et le 3è cône, le calibre étant en contact avec les points les plus extérieurs des deux autres cônes.

-L'autre façon (moins précise) consiste à mesurer la distance entre le bord d'un cône tout en maintenant le calibre à égale distance entre les 3 cônes et à multiplier la valeur obtenue par 2.

Pour les tricônes, il est préférable d'utiliser la règle des 2/3.

La détermination précise de la perte de diamètre est importante : elle permet de savoir s'il sera nécessaire de reforer avec l'outil suivant pour atteindre le fond. Ce facteur doit être pris en compte pour la sélection de l'outil à descendre.

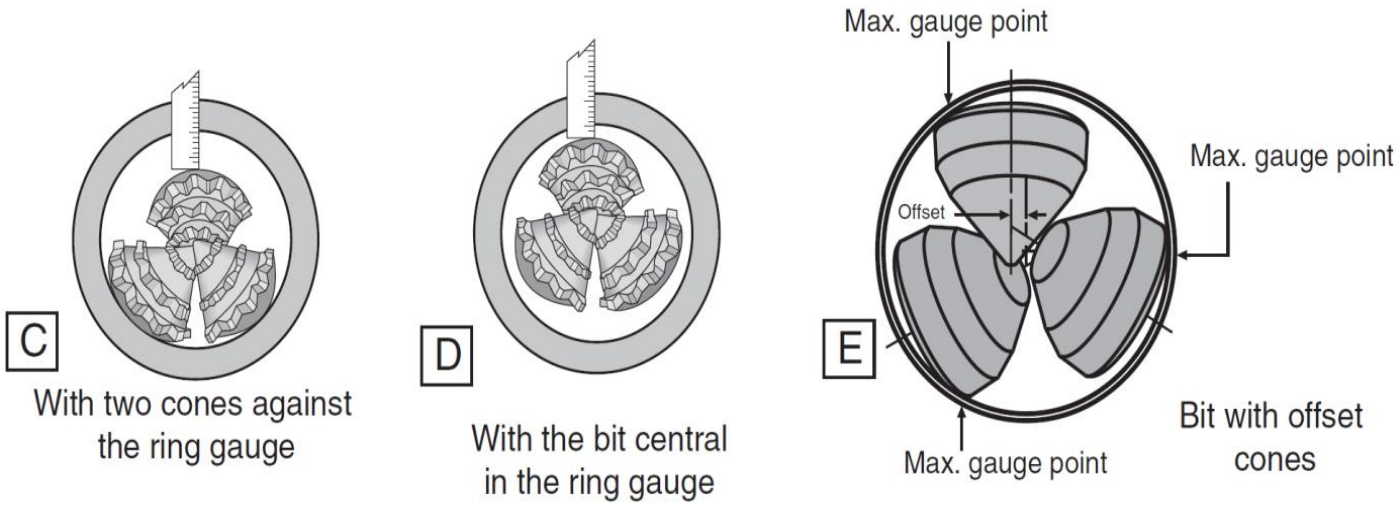


Figure 30: Mesure de la perte de diamètre.

- **La septième colonne** (autres caractéristiques) est utilisée pour reporter toute usure supplémentaire, en complément de celle reportée dans la colonne 3. Cette colonne ne se limite pas uniquement aux structures de coupe.

- **La huitième colonne** (raison de la remontée) indique la cause de la remontée de l'outil. Le Tableau donne les différents codes possibles.

BHA	Changement BHA	DP	Forage d'un bouchon
DMF	Panne moteur de fond	FM	Changement de formation
DSF	Problème de garniture	HP	Problèmes de forage
DST	Drill Stem Test	HR	Nombre d'heures
DTF	Problème outil de fond	PP	Pression à la pompe
LOG	Diagraphies électriques	PR	Vitesse d'avancement
RIG	Réparation appareil de forage	TD	Profondeur finale / pose d'un tubage
CM	Reconditionnement de la boue	TQ	Couple
CP	Début de carottage	TW	Dévissage garniture
WC	Problème météorologique	WO	Sifflage garniture

5.1. 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.

IV.1. Introduction

L'outil ONYX 360 rolling cutter tourne sur 360° pour augmenter la durabilité. Les cutters sont Placé dans les zones d'usure les plus élevées dans la structure de découpage d'un outil, toute arête de **rolling cutter** est utilisée pour cisailler la formation. Les outils PDC avec les Rolling Cutters ont montré une efficacité importante en permettant d'augmenter la profondeur de forage de plus de 50% ce qui confirme les travaux de IDEAS.

IDEAS est une plate-forme qui fournit une simulation en 4D basée sur le temps de capture de la géométrie du train de forage et de puits en même temps pour assurer une modélisation précise de la coupe, et la conceptions d'interface pour forer des roches. Ce système de modélisation dynamique est une suite des programmes informatiques qui permettent de voir interactions outil-à-roche dans un environnement virtuel de telle sorte que l'on peut personnaliser la conception du matériel en temps réel. Ces caractéristiques qualifient la prédiction de la performance de l'outil éliminant les erreurs coûteuses, et qui nous permet d'atteindre les résultats souhaités sur la première descente.

Figure 1:l'outil ONYX 360 Rolling PDC Cutter.

1.1. La technologie de Rolling Cutter

L'outil ONYX 360 Rolling PDC Cutter est spécialement conçu pour des formations très abrasives ou des applications qui limitent la durabilité pour les outils à cutter fixe, et amélioré les profondeurs de forage courtes et le nombre d'outils utilisé.

Malgré la position dominante des outils PDC dans le forage, et les limitations inhérentes, la plupart du contour de l'élément de coupe est fixée dans la lame des outils. En conséquence, plus de 60% du périphérique de l'arête de l'élément de coupe reste inutilisé pendant le forage. La partie d'arête périphérique de l'élément non engagée dans la coupe de la formation est soumise à des effets mécaniques et thermiques qui conduisent à l'usure et l'écaillage. Cette dégradation conduit à la perte d'efficacité et au cisaillement, ainsi que la diminution du taux de pénétration.

Pour produire un rolling cutter susceptible d'être intégré dans un outil PDC, les ingénieurs ont développé un boîtier intégré qui est brasé sur la lame de l'outil. Cette conception enferme et protège le manchon cutter tout en permettant à la machine de tourner.

L'orientation du **Rolling cutter** dans la lame par rapport à son contact avec la formation, couplé avec la force de forage entraîne une rotation efficace du cutter.

Figure 1: Rolling PDC Cutter

Pour déterminer le mode d'usure de la nouvelle conception du **Rolling cutter** par rapport à première qualité des outils à cutter fixes, on a fait des essais de durabilité de forage, en utilisant une plaque d'essai en granit avec une résistance à la compression uniaxiale de 30.000 psi.

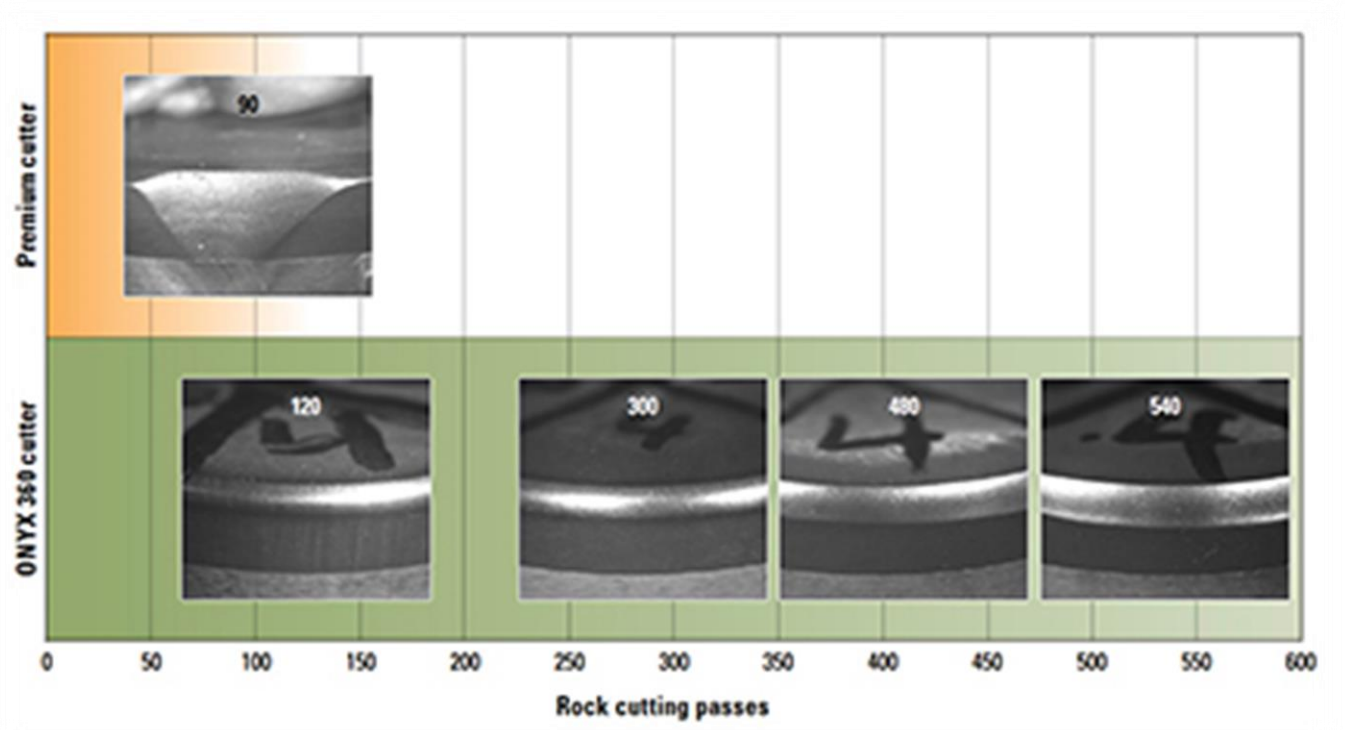


Figure 2: les essais de durabilité.

Après 90 passages sur la formation de test, la première qualité des outils à cutter fixes a développé une usure extrême. Les Rolling cutters ne montrent pratiquement aucun signe d'usure après 480 passages, et peu d'usure après 600 passages.

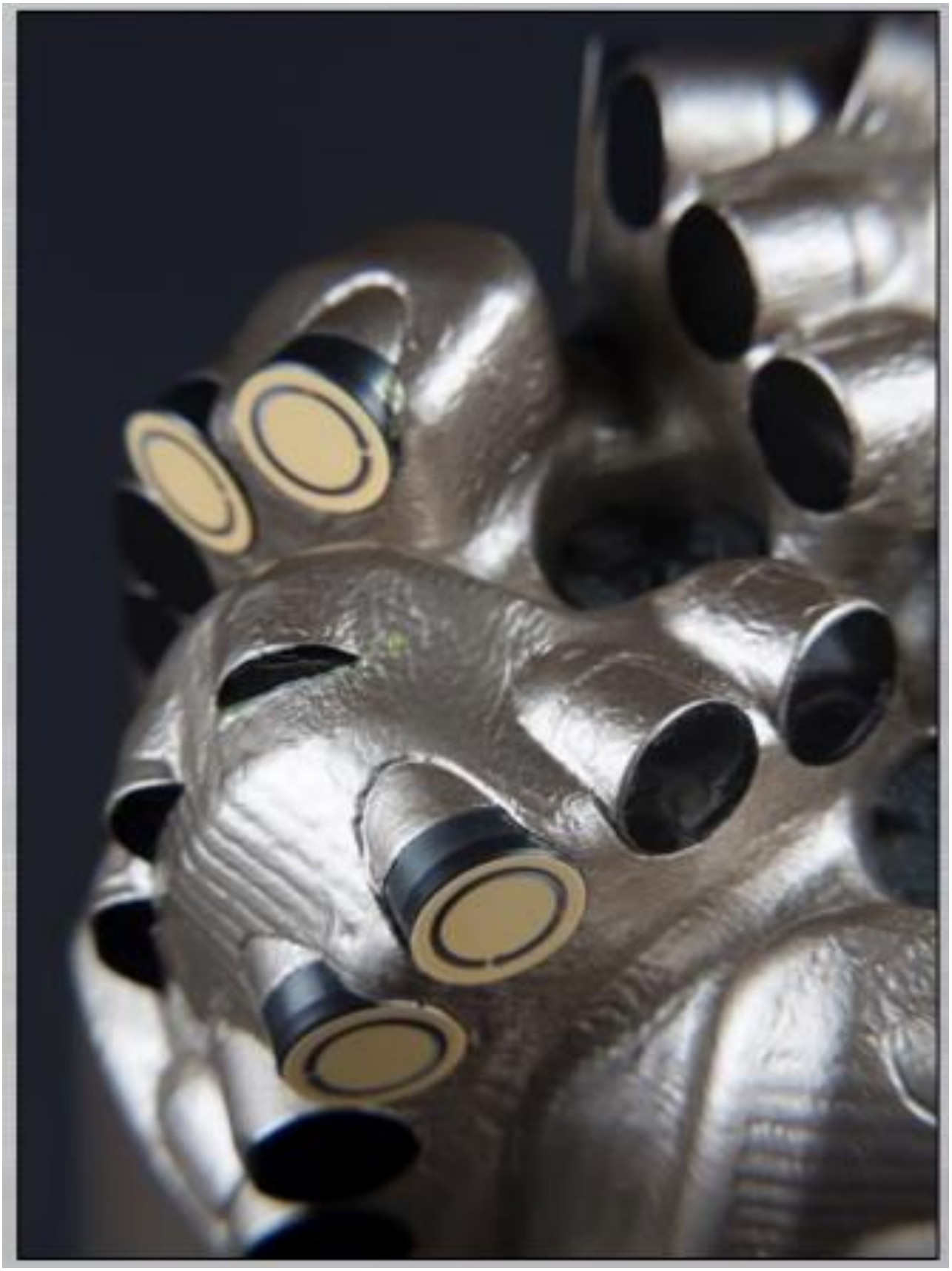


Figure 4: Outil PDC avec rolling cutter

IV.2. Plate-forme de simulation sur IDEAS (Integrated Dynamic Engineering Analysis System)

2.1. Le rôle de IDEAS

IDEAS c'est un service de simulation de forage qui offre des conceptions de systèmes d'ingénierie dont :

– Minimiser les vibrations et collage de garniture.

– Améliorer la performance de forage directionnelle et assemblage des masse-tiges (BHA).

– Améliorer vitesse d'avancement (ROP).

– Identifier les causes profondes de l'échec et donne des recommandations des solutions optimisées.

2.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de IDEAS se résume en :

-Prendre la vraie roche sur le terrain et déterminer la force nécessaire pour la couper à différentes profondeurs la couches.

– Prendre en considération le module de Yong de chaque type de roche.

– Créer les dossiers de roches pour le coupeur/pénétrateur, et les utiliser pour calculer la force totale sur l'outil pendant le processus de forage.

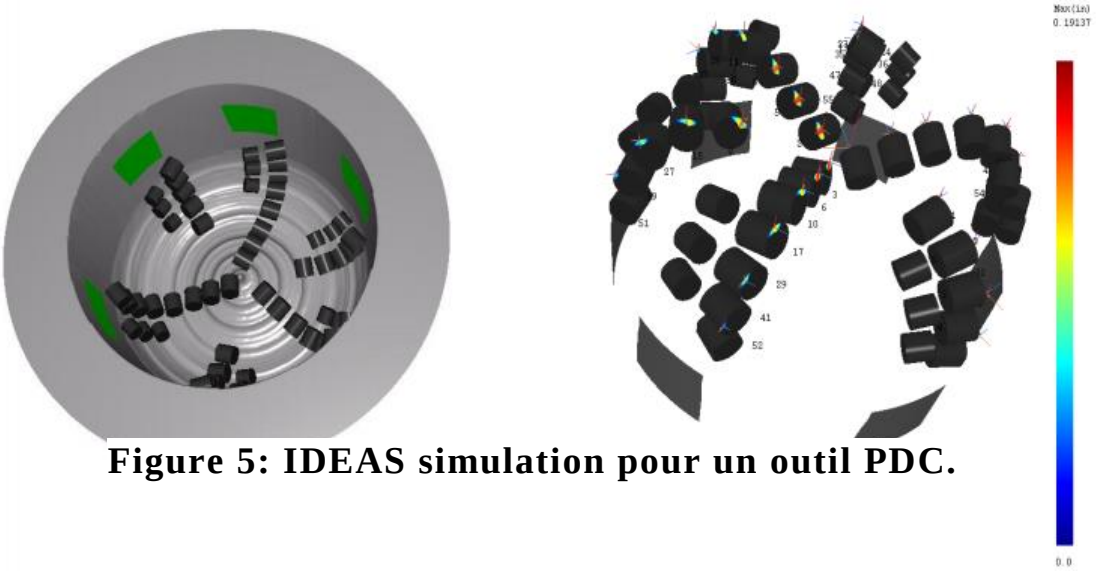


Figure 5: IDEAS simulation pour un outil PDC.

VI.1. introduction

Cette étude sert d'analyse et de comparaison des différents modèles d'outils utilisés dans la section 6 " pour les puits du champ de IN SALAH.

L'objectif est de comparer la dynamique de forage de la conception de rolling cutter avec la conception de base.

Toutes les simulations par IDEAS ont été effectuées selon le programme des puits dans la zone de IN SALAH (profil de puit, BHA, les roches)

VI.2. La section étudiée

Champ de IN SALAH.

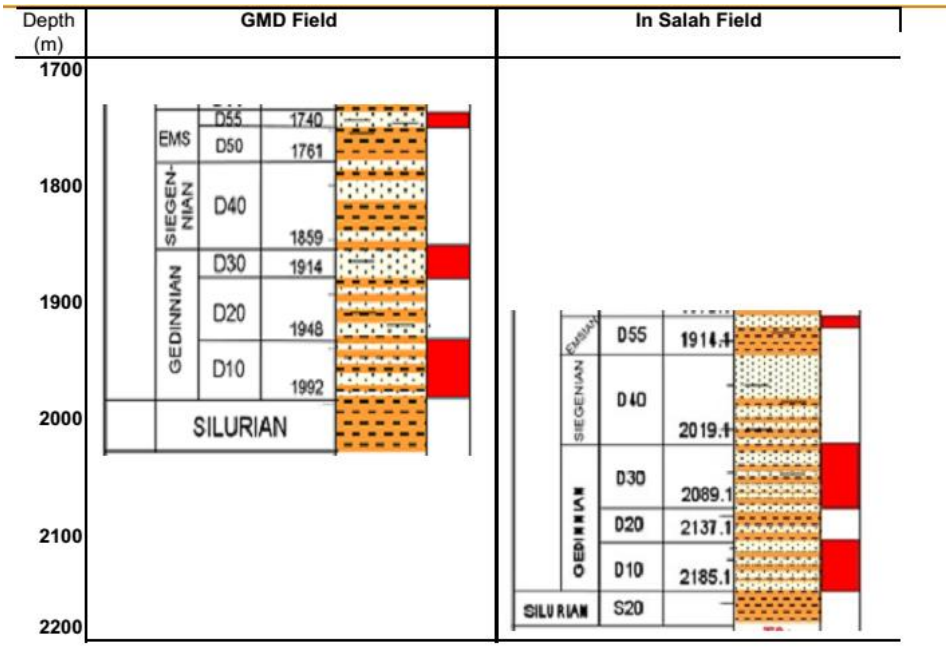
Profile de Puits: Vertical.

Longueur de la Section ~ 300m

La densité de la boue : 1.24 boue a base huile.

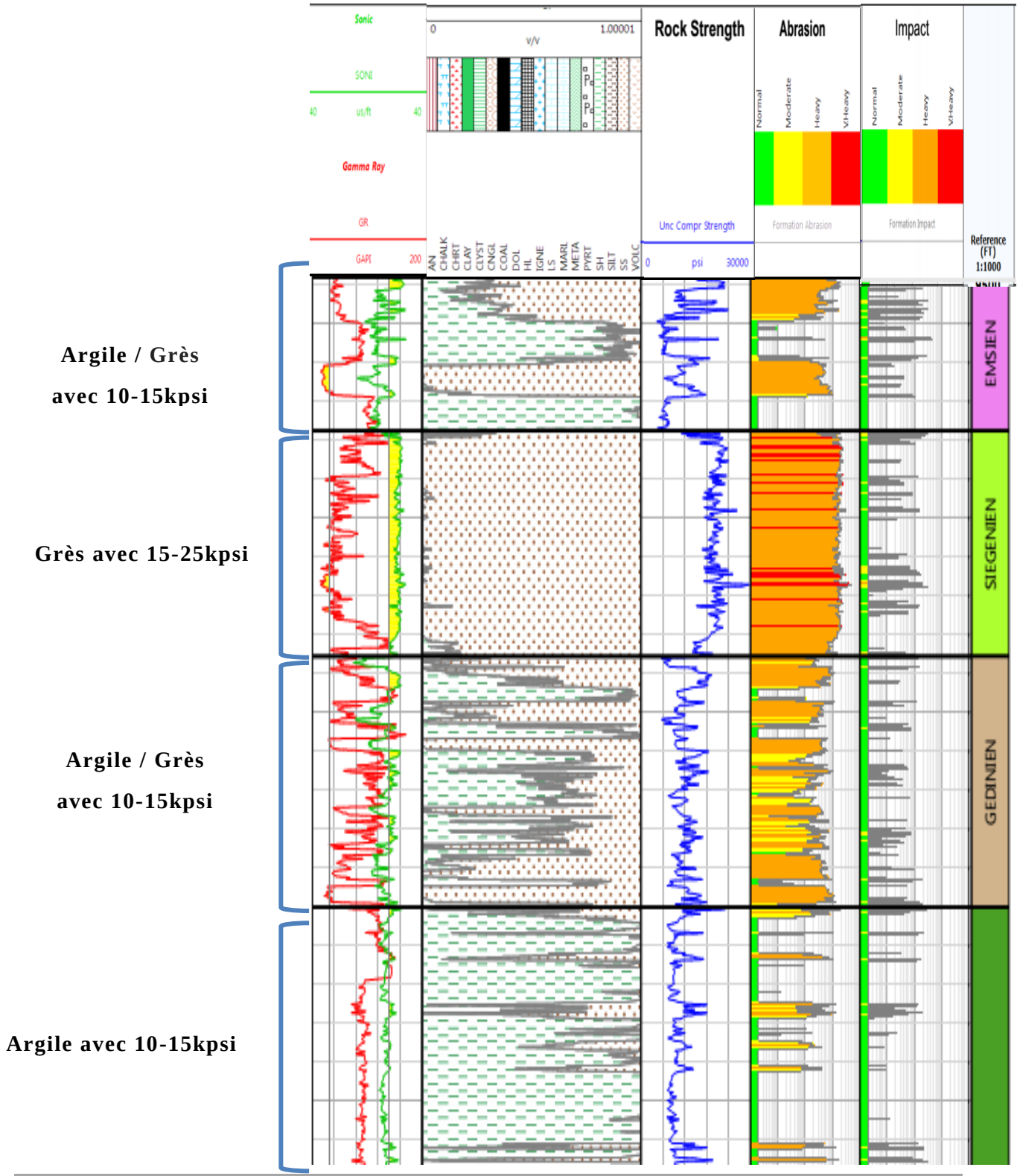
Plus d'un outil pour compléter la section.

Dull sévère (usure) observée à faible avancement (ROP).



VI.3. Lithologie de la formation (masterlog)

1.1.MASTERLOG : puits 01

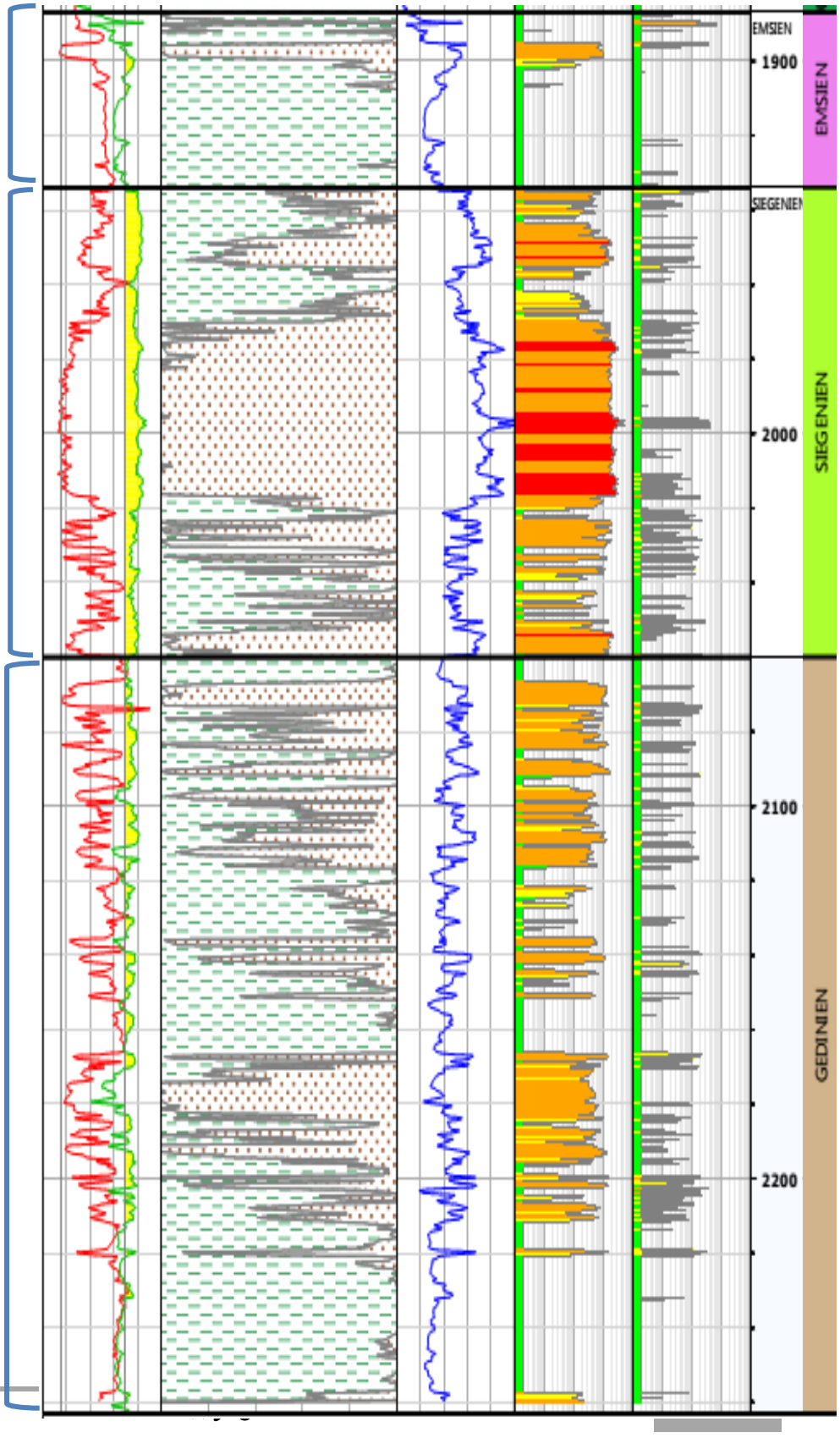


1.2.MASTERLOG : puits 02

Argile avec 10-15kpsi

Grès avec 15-25kpsi

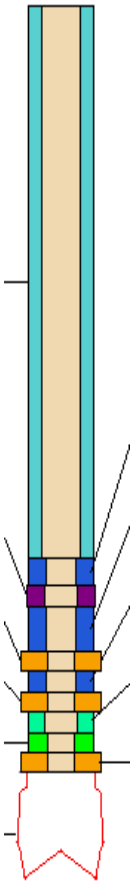
Argile / Grès avec 10-15kpsi



VI.4. Base de donnée de l'étude

4.1. Compositions de la garniture de forage

Component	OD (in)	ID (in)	Max OD (in)	Length (ft)	Cum Len (ft)
Drill Pipe	3.5000	2.7640	4.7500	5442.831	5900.000
4 3/4" NMDC	4.7500	2.0000	4.7500	91.000	457.169
Hydra Jar	4.8125	2.2500	4.8130	30.802	366.169
4 3/4" NMDC	4.7500	2.0000	4.7500	270.000	335.367
Stabilizer	4.7500	1.7500	5.7500	5.000	65.367
4 3/4" NMDC	4.7500	2.0000	4.7500	20.000	60.367
Stabilizer	4.7500	1.7500	5.7500	5.000	40.367
Short Pulse	4.7500	2.2500	4.7500	27.290	35.367
Cross Over	4.7500	1.7500	4.7500	2.395	8.077
Stabilizer	4.7500	1.7500	5.7500	5.000	5.682
L'outil	6.0000	0.0000	6.0000	0.682	0.682



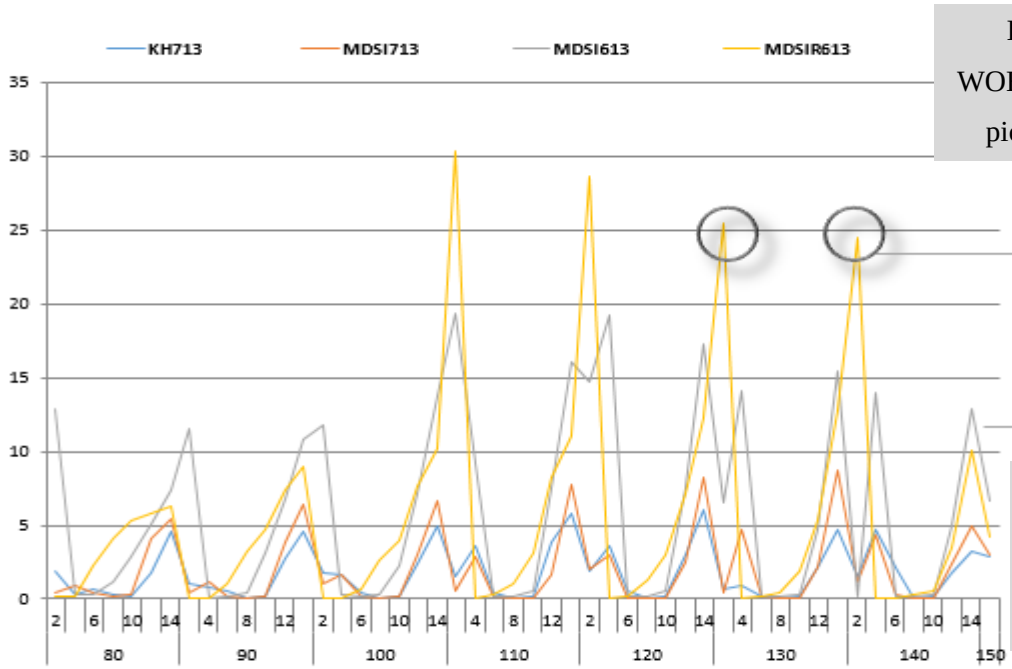
4.2.Informations sur les paramètres de forage

Parameter	Bit_1.pptx	Bit_2.pptx	Bit_3.pptx	Bit_4.pptx
Bit Index	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4
WOB (klbs)	2,4,6,8,10,12,14,15	2,4,6,8,10,12,14,15	2,4,6,8,10,12,14,15	2,4,6,8,10,12,14,15
Surface RPM	80,90,100,110,120, 130,140,150	80,90,100,110,120, 130,140,150	80,90,100,110,120,130,140,150	80,90,100,110,120,130,140,150
Mud Wt. (ppg)	10.340	10.340	10.340	10.340
Rock for Bit	Colorado Tan	Colorado Tan	Colorado Tan	Colorado Tan
UCS (psi)	20-30	20-30	20-30	20-30
Confining Pressure (psi)	3000	3000	3000	3000

4.3.Les résultats de calcul

a. Analyse sur les Grès (15-20kpsi)

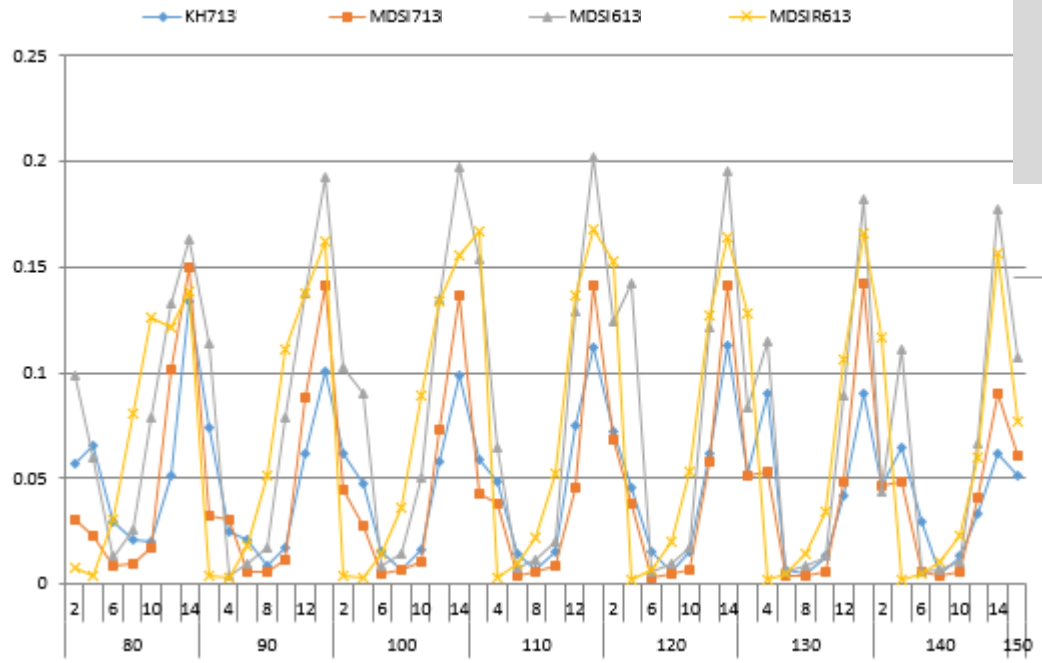
Accélérateur Latéral :



En faibles valeurs de WOB onyx 360 affiche des pics élevés de Acc.Lat

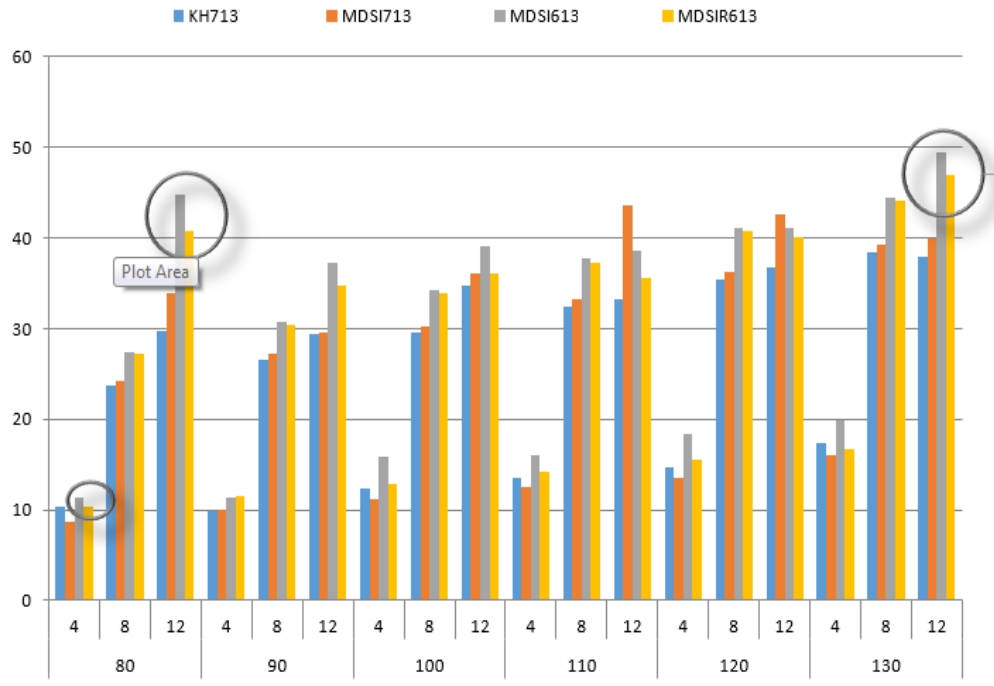
Même Acc. Lat observe sur ONYX360 avec MSi613

Accélérateur axial :



Même Acc. Axial observé sur ONYX360 avec MSi613

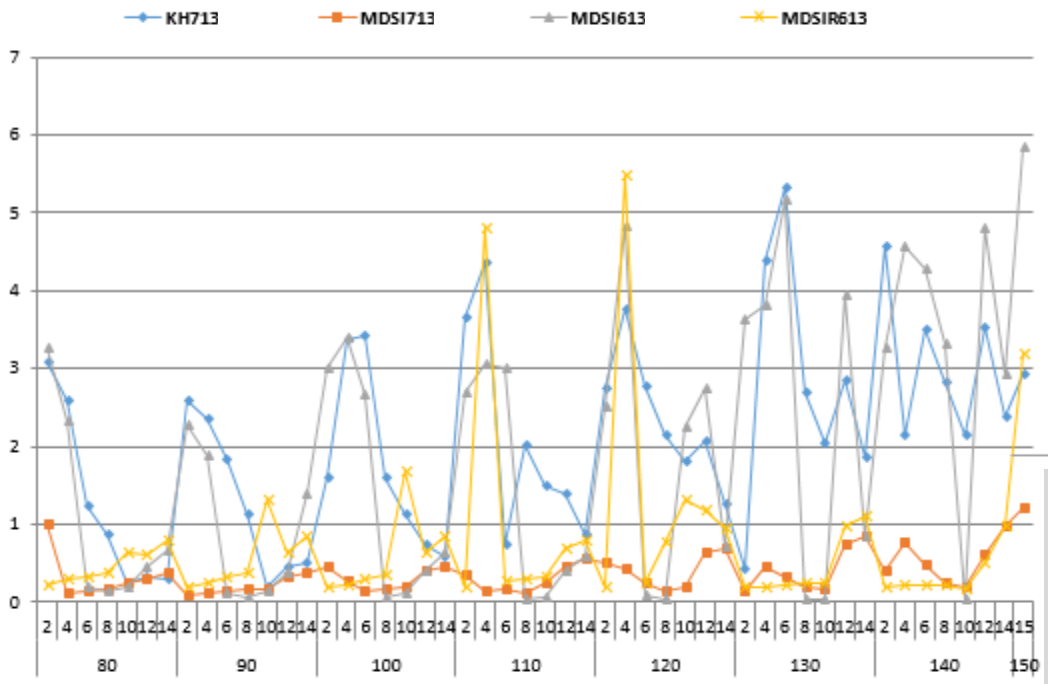
Vitesse d'avancement ROP (m/h)



L'outil ONXY360 a la même gamme de ROP comme la conception de base

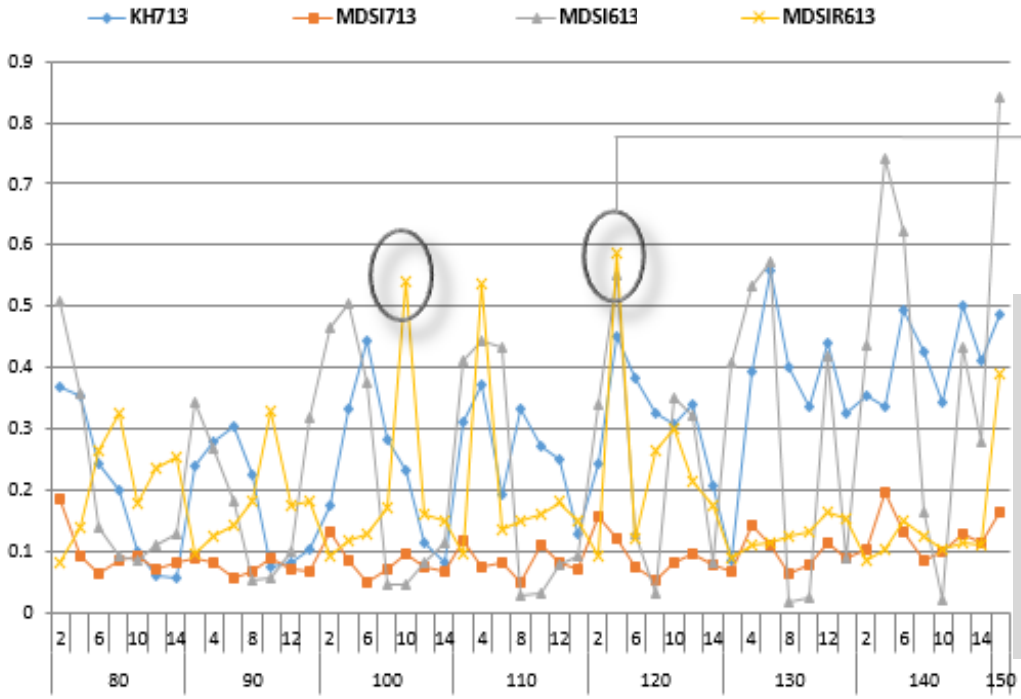
b. Analyse sur les Argiles (20-30kpsi)

Accélérateur Latéral :



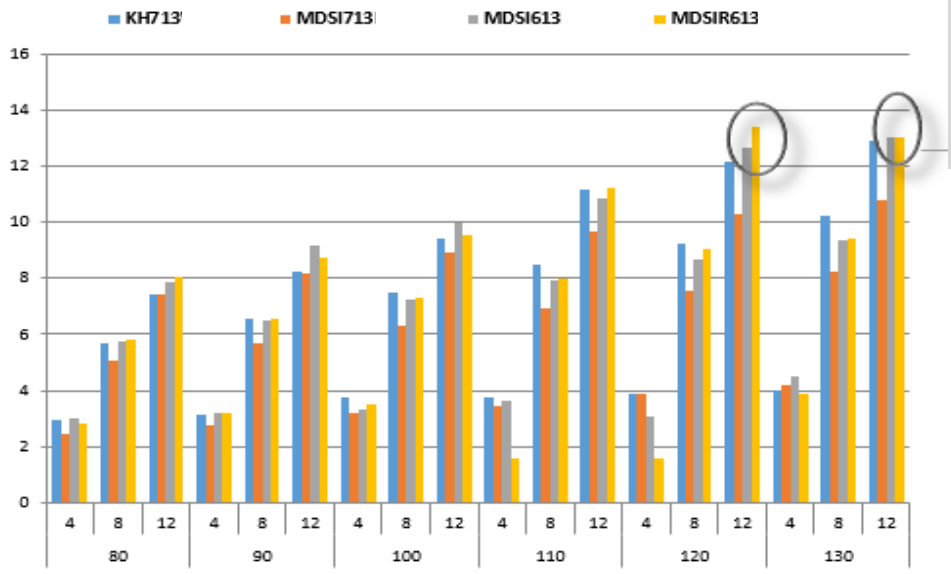
L'outil onyx 360 affiche de faibles valeurs de Lat. Acc à une large gamme de paramètres

Accélérateur axial :



Certains Picks élevés de Acc. Axial Observé à bas WOB.
Faible Acc. Axial comparant avec la conception de base.

Vitesse d'avancement ROP (m/h)



L'outil ONYX 360 est d'avoir la même gamme de ROP comme la conception de base.

4.4. Observations

La stabilité de l'outil ONYX 360 est la même avec celle de la conception de base pour une large gamme de paramètres.

Dans l'analyse de la conception de l'outil ONYX 360, on montre qu'il y a une faible accélération axiale et latérale que dans la conception de base.

La simulation sur IDEAS avec les différents paramètres (WOB / RPM), nous a donné la zone optimale à appliquer, pour avoir la meilleure combinaison en termes de ROP et de la stabilité.

4.5. Conclusion

Les formations géologiques Siégénien et Gédinian sont des formations très difficiles et très abrasives avec des valeurs de dureté relativement élevées (10-20kpsi), qui est la principale préoccupation.

La dynamique des éléments de coupe tournant à 360° pour éliminer l'usure localisée connues sur les taillants fixes conventionnels permet l'augmentation de la profondeur de forage avec un avancement (ROP) moyen.

L'utilisation de l'outil ONYX 360 a prouvée sur le terrain une amélioration significative de la profondeur forée par rapport à l'outil à taillants fixes dans des conditions de formation similaires.

VII.1. Introduction

Les paramètres de forage ont une importance capitale pour que l'outil de forage atteigne sa cible dans les meilleures conditions techniques et économiques tout en ayant une durée de vie la plus longue possible.

L'optimisation des paramètres de forage contribue à augmenter (améliorer) la vitesse d'avancement (ROP), donc un temps de forage plus réduit ce qui en résulte un prix de revient au mètre foré plus faible. Ceci est l'un objectifs les plus importants de l'optimisation des paramètres de forage.

Ses objectifs sont :

- Faire en sorte que l'outil de forage atteigne sa cible ;
- Augmenter la vitesse d'avancement (ROP) ;
- Augmenter la durée de vie de l'outil ;
- Minimiser la consommation de l'énergie et de la puissance.

➢ Les paramètres de forage

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage. Ils peuvent être classés en deux catégories :

Les paramètres mécaniques :

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

Les paramètres hydrauliques :

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

Pour obtenir une bonne performance, il faut réagir avec les deux types de paramètres de forage ; les paramètres mécaniques (WOB et RPM) et les paramètres hydrauliques (FLW et les caractéristiques de la boue).

VII.2. Paramètres mécaniques

a. Type de l'outil

Le type d'outil, qu'il soit un outil diamant ou tricône, dépend essentiellement de deux facteurs qui sont :

- La nature des terrains traversés qui présentent une grande variété de dureté. Par exemple les outils dimant sont utilisés généralement pour les terrains durs et les tricônes sont utilisés pour les terrains tendres.
- Le mode de destruction des roches. Par exemple les outils PDC travaillent par cisaillement alors que les tricônes travaillent par broyage.

b. Vitesse de rotation

D'après les études et essais sur chantier, il ressort que la vitesse de pénétration croît en proportion directe avec la vitesse de rotation. Il existe une vitesse optimum au-delà de laquelle la vitesse d'avancement n'augmente plus. Cette vitesse de rotation maximale décroît à mesure que la dureté de la formation augmente. La vitesse optimale de rotation décroît quand on augmente le poids sur l'outil.

La vitesse de rotation peut être limitée par :

- Les vibrations du train de sonde (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures) ;
- Les grandes profondeurs ;
- Certains types d'outils (à pastilles) qui travaillant par broyage, le facteur poids est plus important ; une vitesse de rotation excessive entraînerait une diminution de la vitesse d'avancement ainsi que la détérioration des pastilles en carbure de tungstène.

➢ **Remarque :**

Pour les outils à diamants, il est important de respecter les paramètres indiqués par le fabriquant car les efforts s'appliquant sur l'outil ont été pris en compte.

Pour les outils à diamant naturel, le poids est important, par contre pour les outils PDC, la vitesse de rotation est le paramètre le plus important.

c. Poids sur l'outil

D'après des études en laboratoire et des essais effectués sur les chantiers, il a été constaté que si à vitesse de rotation constante, on augmente le poids appliqué sur l'outil, on enregistre alors une augmentation de la vitesse d'avancement. Cette augmentation varie à peu près en proportion directe du poids sur l'outil, si le débit de circulation est suffisant.

Toutefois, la vitesse d'avancement peut atteindre un maximum si le poids appliqué sur l'outil atteint la charge limite qui est la charge nécessaire pour faire pénétrer entièrement une dent dans la formation. Au-delà de cette charge limite, tout poids supplémentaire est supporté par le corps du cône qui s'applique contre la formation et il en résulte une diminution de la vie du roulement sans augmentation de la vitesse d'avancement. Cette charge limite est d'autant plus importante que le terrain est plus dur.

Par suite des frottements du train de tiges, du train de masse-tiges et des stabilisateurs on peut noter, que le poids sur l'outil est souvent inférieur à celui marqué par l'indicateur de poids.

En plus de cette charge limite, le poids sur un outil est limité par sa construction même, c'est-à-dire par le type de l'outil :

- Un outil pour terrain tendre, ayant les dents longues, aura obligatoirement des roulements et les galets de dimension limitée, donc acceptant des charges plus faibles.
- Un outil pour terrain dur, ayant de petites dents, aura des roulements plus conséquents et acceptants de fortes charges.

Le poids sur l'outil peut également être limité par :

- Le poids des masse-tiges utilisées. Actuellement, la tendance est d'augmenter le poids sur les outils pour améliorer de l'avancement. Il faut donc augmenter le nombre ou la dimension des masse-tiges. Il est nécessaire d'avoir un poids apparent de masse-tiges supérieur d'environ 20 % au poids maximal que l'on peut appliquer sur l'outil.
- Certaines formations à fort pente ayant tendance à faire dévier les outils. On essaie de limiter cette tendance à la déviation, tout en maintenant un poids acceptable sur l'outil par l'emploi de stabilisateurs ou de masse-tiges surdimensionnées.

1.1. Influence de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement

La figure ci-dessous montre, pour un débit et un poids sur l'outil donnés, la variation de la vitesse d'avancement en fonction de la vitesse de rotation.

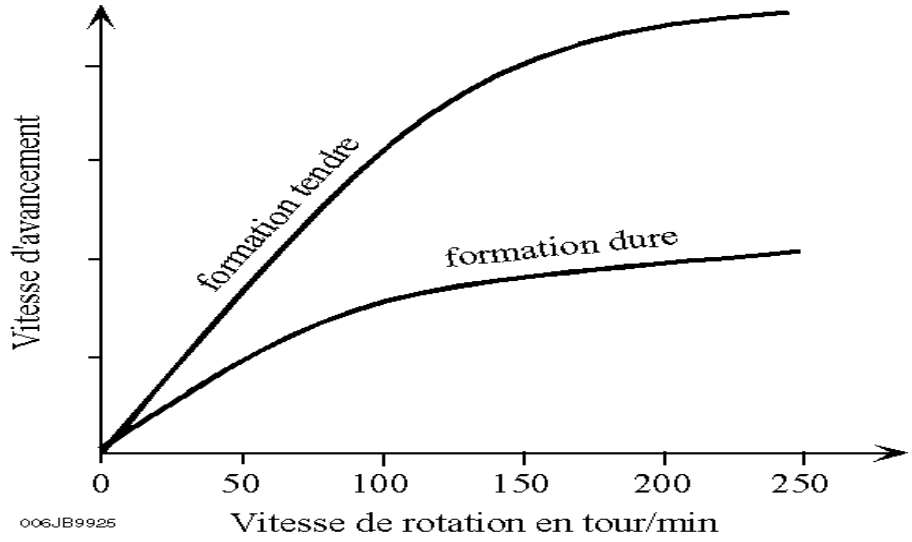


Figure 1: Effet de la vitesse de rotation sur la vitesse d'avancement.

On constate sur cette figure que **:**

Dans une certaine gamme de vitesse de rotation, l'augmentation de la vitesse d'avancement est proportionnelle à l'augmentation de la vitesse de rotation. A partir d'une certaine valeur de la vitesse de rotation, l'augmentation de la vitesse d'avancement diminue fortement et devient quasiment nulle (environ 100 tr/min pour les formations dures et 200 pour les formations tendres).

La raison de cette faible augmentation de l'avancement, lorsque la vitesse de rotation devient relativement importante, le temps entre les impacts des éléments de coupe sur la roche est de plus en plus court. Ce temps devient insuffisant pour permettre aux éléments de coupe de pénétrer suffisamment dans la formation, de la fissurer (ce dernier point est supporté par le fait que l'augmentation de la vitesse de rotation produit une diminution du couple à l'outil) et pour évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille.

Contrairement au poids, il n'existe pas de seuil de vitesse pour les formations dures, l'outil avance dès qu'il commence à tourner.

L'augmentation de la vitesse de rotation a beaucoup plus d'effet sur les formations tendres que sur les formations dures (pente de variation de la vitesse d'avancement plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

La vitesse de rotation joue sur la durée de vie de l'outil (usure des roulements) et sur la trajectoire du puits.

1.2.Influence du poids sur la vitesse d'avancement

La figure ci-dessous montre, pour un débit et une vitesse de rotation donnés, la variation de la vitesse d'avancement en fonction du poids appliqué sur l'outil et de la dureté de la formation.

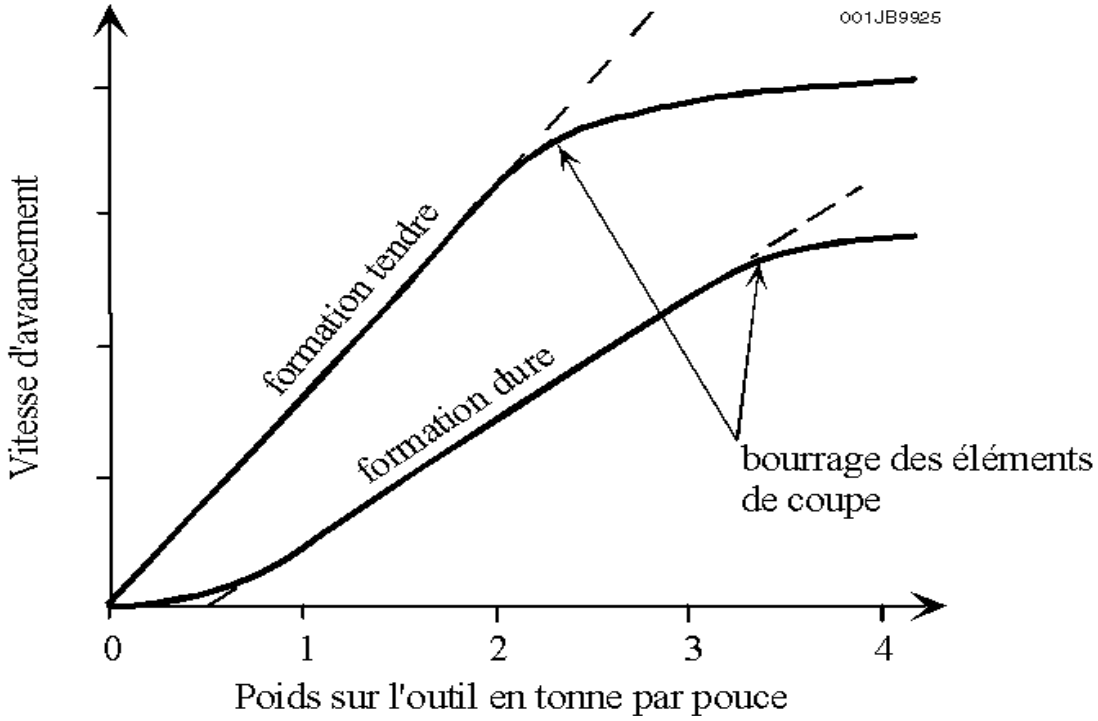


Figure 2 : Effet du poids sur la vitesse d'avancement.

On constate sur cette figure que **:**

- Dans une certaine gamme de poids, l'augmentation de la vitesse d'avancement est proportionnelle à l'augmentation du poids. A partir d'une certaine valeur de poids, l'augmentation de la vitesse d'avancement diminue rapidement et devient quasiment nulle (environ 2 kdaN pour les formations tendres et 3 pour les formations dures).

La raison de cette très faible variation de la vitesse d'avancement, lorsque le poids devient important, peut être due au fait que **:**

a. Le débit n'est pas suffisant pour évacuer tous les déblais du front de taille, les déblais non éliminés sont broyés de nouveau diminuant l'efficacité des éléments de coupe. Si la quantité de déblais produite est supérieure à la quantité évacuée, il se produit un bourrage de l'outil.

b. Les éléments de coupe pénètrent complètement dans la formation (roche plus lit de déblais), il se produit un bourrage des éléments de coupe.

Suivant la dureté de la formation, l'allure de la courbe varie lorsque le poids appliqué est faible **:**

a. Dans un terrain tendre, l'outil avance dès que l'on applique du poids (si la formation est suffisamment tendre et/ou peu consolidée et le débit élevé, on obtient un avancement sans appliquer de poids sur l'outil).

b. Dans un terrain dur, il faut appliquer un certain poids pour que l'outil avance. Le seuil se trouve aux environs de 0,5 kdaN par pouce d'outil.

L'augmentation du poids a plus d'effet sur les formations tendres que sur les formations dures (pente de variation de la vitesse d'avancement plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

Le poids, que l'on peut appliquer sur l'outil, est fonction de la garniture de forage utilisée et du profil du puits (dans les puits faiblement déviés, le poids sur l'outil est obtenu en mettant **les masse-tiges** en compression ; dans les puits horizontaux, le poids est obtenu en mettant **les tiges** en compression). Le poids appliqué va agir sur la durée de vie de l'outil.

Le poids appliqué sur l'outil a une influence sur la trajectoire du puits, il modifie la position des points de contact entre la garniture et la paroi du trou. Il sera généralement nécessaire de contrôler ce poids pour réaliser la trajectoire désirée.

1.5. Optimisation du couple poids - vitesse de rotation (Drill Off Test)

a. Drill Off Test

Les deux paramètres poids/rotation sont étroitement liés et il est donc nécessaire de trouver le meilleur compromis pour obtenir la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil les plus grandes.

Le test de forabilité (Drill Off Test) permet de déterminer le couple poids sur l'outil – vitesse de rotation à appliquer pour obtenir une vitesse d'avancement optimale pour un type d'outil donné dans une formation donnée.

L'application de D.O.T est faite par le bit man pour que son outil donne une grande ROP. Dans le cas où le bit man est absent, le superviseur peut appliquer cette méthode.

Le Drill Off Test sera effectué:

- Au début du travail de l'outil, après avoir fait l'empreinte ;
- Aux changements de formations ;
- Lorsque la vitesse d'avancement diminue ;

- Au cours du forage pour tenir compte de l'usure des éléments de coupe.

Le principe consiste à rechercher le poids optimum puis la vitesse de rotation optimale à partir de ce poids optimum obtenu.

b. Optimisation du poids sur l'outil

- Appliquer le poids maximum donné par le programme de forage ;

- Maintenir durant le test une vitesse de rotation constante ;

- Mettre la chaîne au frein ;

- Enregistrer les temps successifs (en secondes) correspondant aux diminutions du poids par intervalle de 2,5 tonnes, et noter la longueur forée pendant cet intervalle. Le dernier essai doit être fait avec le poids utilisé pour le premier essai pour s'assurer qu'entre temps la formation n'a pas changée ;

- Arrêter le test lorsque le temps augmente d'une façon significative, dû à la réduction du poids ;

- Le poids sur l'outil optimum correspond à la plus grande vitesse d'avancement.

Note : Si la vitesse d'avancement maximale correspond à plusieurs valeurs du poids, choisir la plus petite de ces valeurs afin de minimiser l'usure de l'outil.

c. Optimisation de la vitesse de rotation

- Faire une marque tous les demi-mètres sur la tige d'entraînement ;

- Enregistrer les temps (en minutes) mis pour forer un demi-mètre avec le poids optimum et une diminution de la vitesse de rotation de 10 tours chaque fois ;

- Arrêter le test lorsque le temps augmente d'une façon significative, dû à la réduction de la vitesse de rotation ;

- La vitesse de rotation optimale correspond à la plus grande vitesse d'avancement.

Note : Si la vitesse d'avancement maximale correspond à plusieurs valeurs de la rotation, choisir la plus petite de ces valeurs afin d'optimiser la durée de vie de l'outil.

VII.3. Paramètres hydrauliques

3.1.Débit

Le débit de forage doit être suffisant pour remonter correctement les déblais vers la surface et refroidir les éléments de coupe de l'outil, Il est en fonction du diamètre du trou, de l'inclinaison du puits et de la puissance hydraulique disponible sur le chantier.

La vitesse d'avancement croît en proportion directe avec le poids que l'on applique sur l'outil. Pour un débit donné, si on augmente progressivement le poids sur l'outil, il peut arriver un moment où l'avancement ne croît plus proportionnellement au poids et peut même diminuer si on continue à augmenter le poids,ce phénomène à partir duquel il n'y a plus proportionnalité directe entre l'avancement et le poids est appelé balling up ou point de bourrage de l'outil.

Au-delà de ce point le débit n'est plus suffisant pour évacuer la totalité des déblais au fur et à mesure qu'ils sont produits par les dents de l'outil et une partie du poids mis sur l'outil est supportée par les déblais. On peut retarder l'apparition du balling up en augmentant la vitesse aux duses, ce qui permet un meilleur nettoyage du front de taille.

Le débit a donc une influence sur l'avancement mais jusqu'à une certaine valeur limite au-delà de laquelle il n'améliore plus l'avancement et risque au contraire d'être nuisible par la formation de caves, éboulements (turbulence au niveau des tool-joints et des masse-tiges) et l'érosion au droit des masse-tiges où la vitesse de la boue est d'autant plus élevée que l'on emploie des masse-tiges surdimensionnées.

La vitesse de remontée - donc le débit - est plus grande en terrain tendre qu'en terrain dur. La tendance actuelle serait plutôt d'utiliser des débits moins importants mais en forçant par contre sur la vitesse aux jets.

Le fait de vouloir retarder l'apparition du balling up ne doit pourtant pas amener le foreur à utiliser un débit tel que **:**

- ✓ En terrain tendre il y ait risque de formation de caves ;
- ✓ En terrain mal consolidé, une érosion des parois par la grande vitesse de la boue ;
- ✓ Augmentation des pertes de charges dans l'annulaire produisant au niveau de l'outil le même effet qu'une augmentation de densité, d'où diminution de l'avancement ;

✓ Du fait des pertes de charges, viennent s'ajouter à la pression hydrostatique, le risque de craquage des formations, d'où pertes partielles de circulation.

3.2. Influence des caractéristiques de la boue :

d. Densité

On sait très bien que la roche soit plus difficile à disloquer quand la pression hydrostatique agissant sur elle augmente. Plus la densité augmente, plus la pression hydrostatique augmente.

La figure montre l'effet de la pression différentielle sur la vitesse d'avancement.

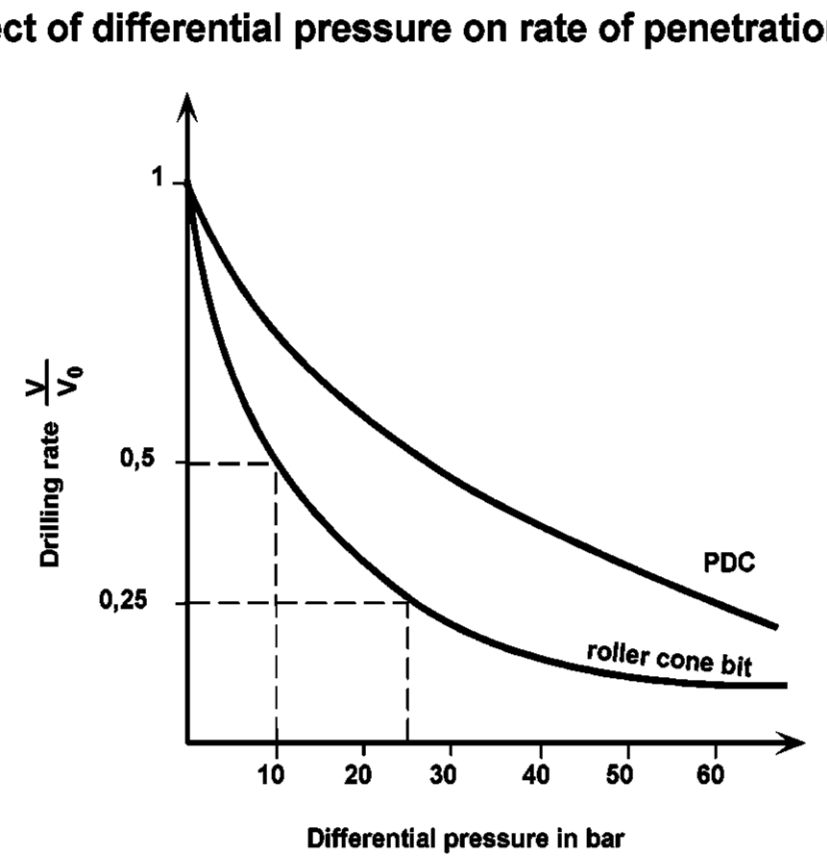


Figure 3: Effet de la pression différentielle sur la vitesse d'avancement.

Avec une pression différentielle nulle ou négative (forage à l'air), la pression de formation facilite l'expulsion des déblais et le nettoyage. Avec une pression différentielle positive, la pression exercée pour le fluide tend à plaquer les déblais sur le front de taille et rend le nettoyage moins efficace.

e. Filtration

Dans une formation poreuse et perméable, les particules solides de la boue se déposent sur les parois du puits (cake) tandis que le filtrat (phase liquide de la boue) pénètre dans la formation. La filtration s'arrête lorsque le cake sera étanche.

Sur le front de taille, la progression de l'outil ne permet pas la formation du cake. La filtration facilite le décollement des déblais et leur évacuation puisque le filtrat pénètre sous le front de taille dans les pores pour les formations perméables et dans les fissures créées par l'outil pour les formations dures.

Pour une roche perméable, l'augmentation du filtrat jusqu'à une valeur API d'environ 10 produit une augmentation de la vitesse d'avancement, au-delà de cette valeur, la vitesse d'avancement ne varie plus.

f. Viscosité

La viscosité agit sur la mobilité des déblais, avec une viscosité élevée, les déblais ont tendance à rester collés sur la taille entraînant leur broyage de nouveau et donc une diminution des performances de l'outil.

Les meilleures vitesses d'avancement seront obtenues avec un fluide ayant la plus faible viscosité à la sortie des duses.

g. Teneur en solides

La densité et la viscosité d'un fluide de forage sont en fonction de la teneur en solides. Une teneur en solide élevée va réduire les performances de l'outil.

L'augmentation du pourcentage en solide dans la boue diminue la vitesse d'avancement et la durée de la vie de l'outil. Il est nécessaire de faire des traitements mécaniques corrects de la boue pour évacuer les solides.

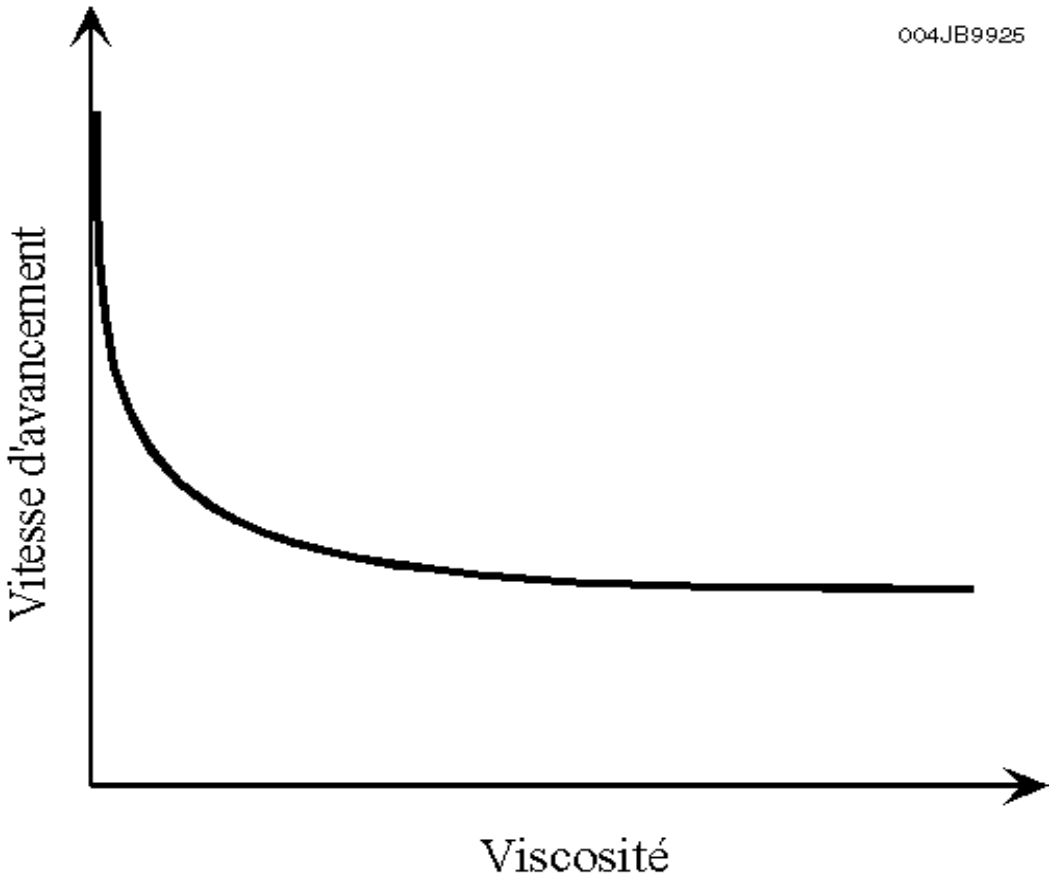


Figure 4: Effet de la viscosité sur la vitesse d'avancement.

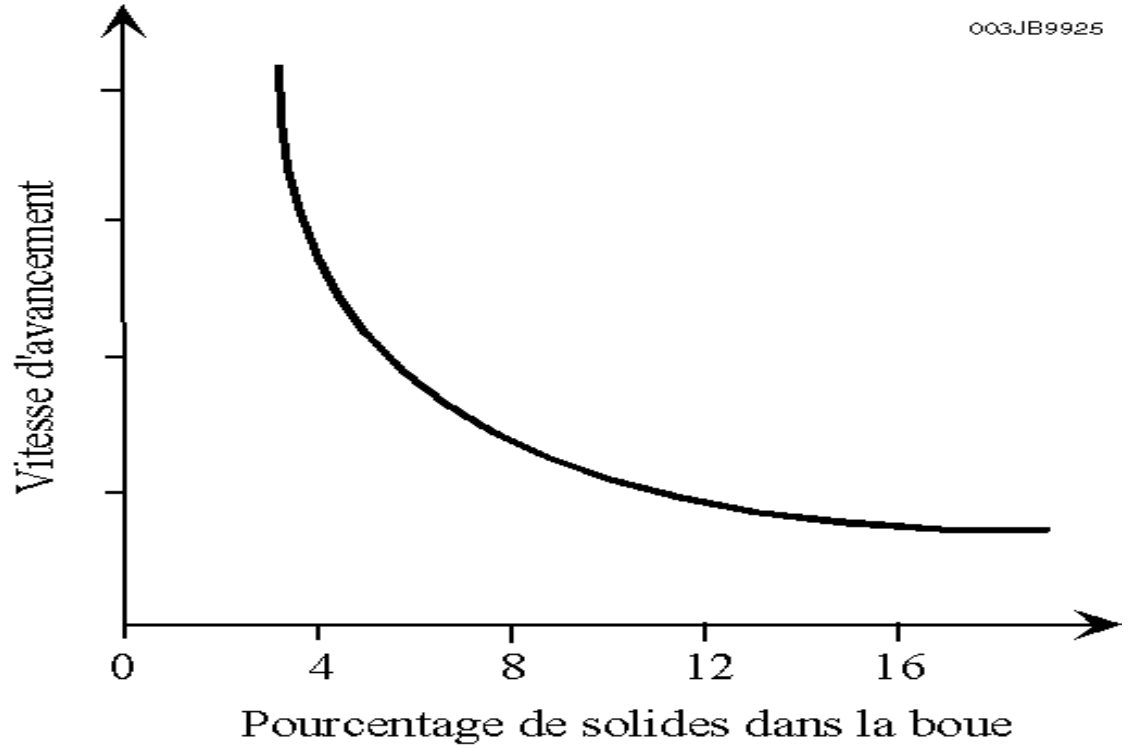


Figure 5: Effet de la teneur en solides sur la vitesse d'avancement.

h. Nature de la boue

Pour les outils à diamant naturel, comme pour les outils à molettes, la boue à l'huile a un effet néfaste sur la vitesse d'avancement, de fait du mode de la destruction de la roche. Par contre, la boue à l'huile a tendance à améliorer les performances des outils PDC et des outils TSP (lorsqu'ils travaillent à la façon des outils PDC).

La boue à l'eau a tendance à favoriser le bourrage des outils PDC.

❖ **Pourcentage d'huile dans la boue :**

L'expérience a montré que l'huile ajoutée à la boue augmente la vitesse d'avancement, de plus, la lubrification par l'huile prolonge la durée de vie des roulements de l'outil.

Les boues à l'huile donnent des meilleures performances en **:**

- Éliminant le problème d'hydratation des argiles ;
- Prévenant le bourrage de l'outil ;
- Diminuant l'érosion ;
- Éliminant la fatigue par corrosion ;
- Minimisant les fissurations dues à la corrosion ;
- Réduisant les fissurations par les forces thermiques.

Nombre de ces points peuvent être obtenus en boue à l'eau avec ajout d'huile. Ces émulsions d'huile dans l'eau contiennent de 5 à 15 % d'huile.

VIII.1. Introduction

L'outil MSIR 613 a été utilisé pour la première fois avec BP, il a foré le sabot de tubage 7" et une profondeur de 68m jusqu'à la formation Siégénien D40 avec une vitesse d'avancement 1,35 m / h.

L'objectif de la descente était de forer jusqu'à ce que le point de carottage au-dessous de la formation de Siégénien D40 (formation non forable avec PDC)

VIII.2. Déroulement de l'opération du forage

La formation Emsien : Après forage de 4m en Lias argileux au-dessous du sabot on atteint le sommet de la nouvelle formation Emsien D55 qui a été confirmée à 1716m. La formation de D55 se compose principalement de grès foncé. Un total de 17m a été foré avant le sommet de Emsien D50 qui a été confirmée à 1733m, la formation est très dure et Abrasive composée principalement de Grès- quartzitique.

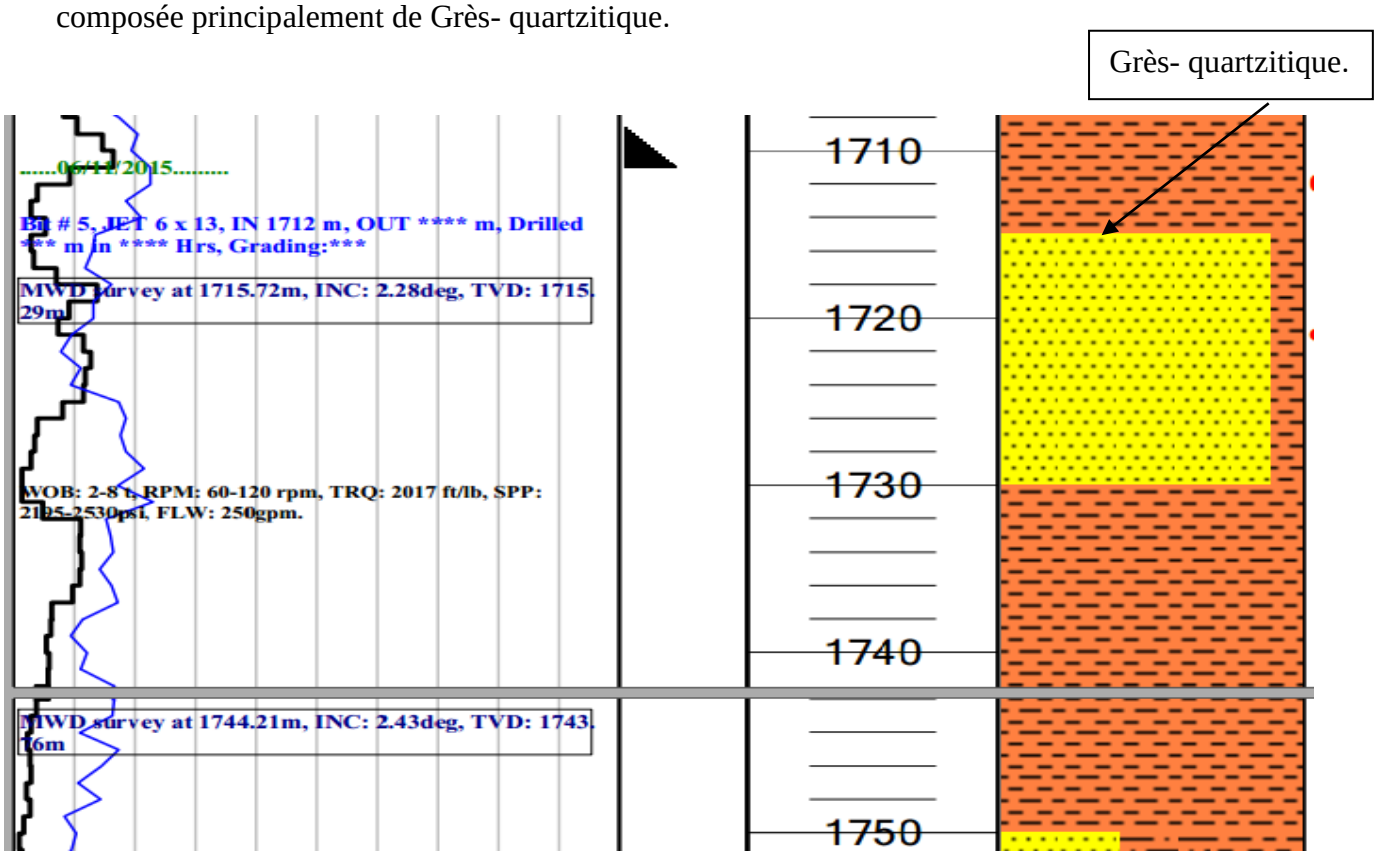


Figure 1: masterlog de la phase étudier.

Le forage dans la formation Emsien a un comportement instable. On utilise (60 rpm et 4-7T WOB) jusqu'à la sortie de dernier stabilisateur hors du tubage, A ce point RPM a été augmentée jusqu'à 100 rpm. L'avancement instantanée dans la formation de D55 était entre (4-12) m / h. nous augmentons la vitesse de rotation (RPM) jusqu'à 140 comme une limite pour stabiliser la situation.

Siégénien D40 : formation très dure et Abrasive (non forable avec les outils PDC) (principalement de grès et quelques siltstone) une fois que le sommet de la formation D40 a été confirmée à 1750m, RPM a été abaissé à 90rpm avec 4-8T WOB pour éviter l'usure aux cutters, la vitesse d'avancement (ROP) a été diminuée jusqu'a (1-3 m / h).

Après forage de 40m dans la formation de D40, à cause de faible taux de pénétration la remontée a été décidée. L'outil est sorti dans un très bon état.

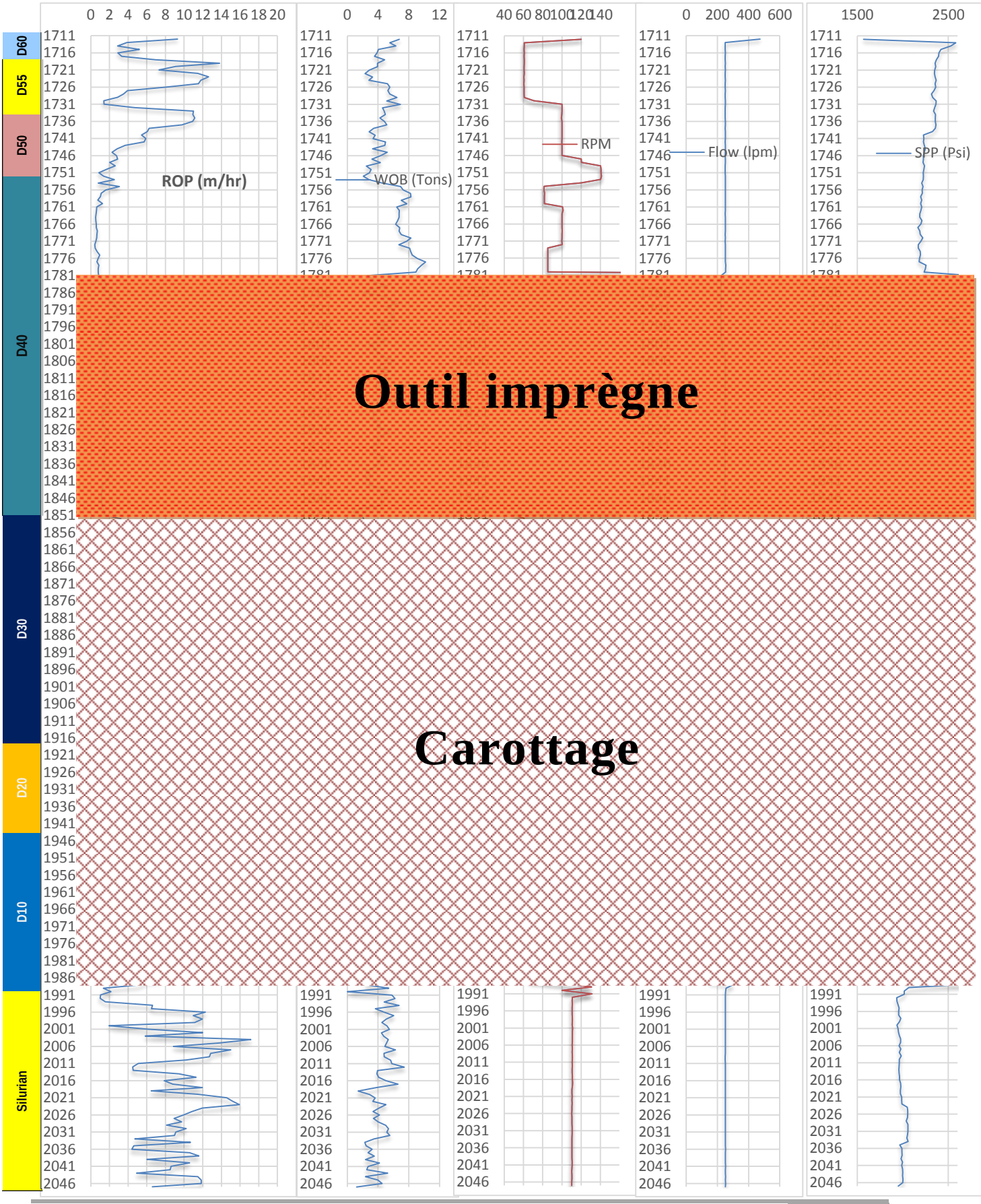
Après qu'on a effectué le carottage à partir de D30 à la formation de D10. L'outil a été redescendu pour forer la formation **Silurien**, 57.6m a été foré avec 5.33m / h.

Lorsqu'on a remonté l'outil à la surface on le trouve dans un bon état, les **Rolling cutters** sur la zone de l'épaule étaient tout nouveau avec une certaine usure sur le nez.

1.1.Paramètres de forage

FORMATION	CODES	WOB (T)			RPM			DEBIT (lpm)			PRERSSION (Psi)		
		Max	Min	Av	Max	Min	Av	Max	Min	Av	Max	Min	Av
Lias-Argileux	SH, SS	7	6	6	120	61	81	474	250	324	2582	1571	2227
Emsien D55	SH, AN, SS	7	2	5	100	60	63	100	60	63	2529	2314	2371
Emsien D50	SH, SS, AN	5	2	4	140	99	104	5639	0	2225	5639	0	2225
Siégénien D40	SH, SS, DOL	10	2	7	141	81	98	254	250	251	2256	2256	2203
Siégénien D40	Outil imprégné												
D30	CAROTAGE												
D20													
D10													
Silurien	SH, SS, DOL	7	0	4	131	100	111	255	250	251	2066	1933	1990

1.2.Graphe du Paramètres de forage



1.3.Détermination de la vitesse d'avancement moyenne :

FORMATION	AGES	CODES	TOP	THICH	HOUR	ROP
Lias-Argileux	**Trias**	**SH, SS**	1712	4.4	0.84	**5.24**
Emsien D55	**Trias**	**SH, AN, SS**	1716	16.6	4.11	**4.04**
Emsien D50	**Trias**	**SH, SS, AN**	1733	18.3	4.56	**4.01**
Siégénien D40	**Trias**	**SH, SS, DOL**	1751	28.8	40.67	**0.71**
Siégénien D40	**Outil imprégné**					
D30	**CAROTAGE**					
D20						
D10						
Silurien	**Trias**	**SH, SS, DOL**	1989	57.6	10.70	**5.38**

VIII.3. Usure de l'outil :

L'outil MSIR 613 descendu dans le puits en AIN SALAH a terminé la phase6" (126 m) avec une vitesse d'avancement de 2.06m/h et une usure comme suit **:**

Outil \ Usure	IADC Dull grading							
	I	**O**	**D**	**L**	**B**	**G**	**O**	**R**
L'outil MSIR 613	2	1	WT	N	X	I	NO	TD

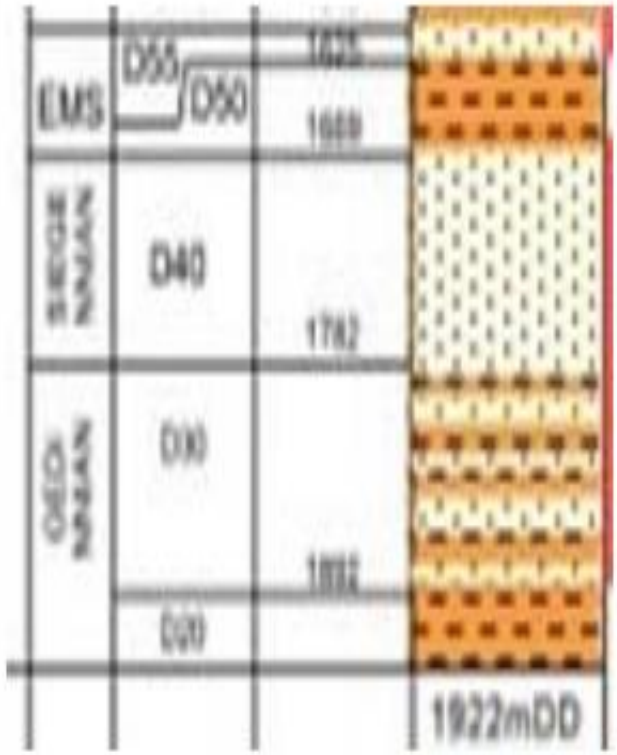
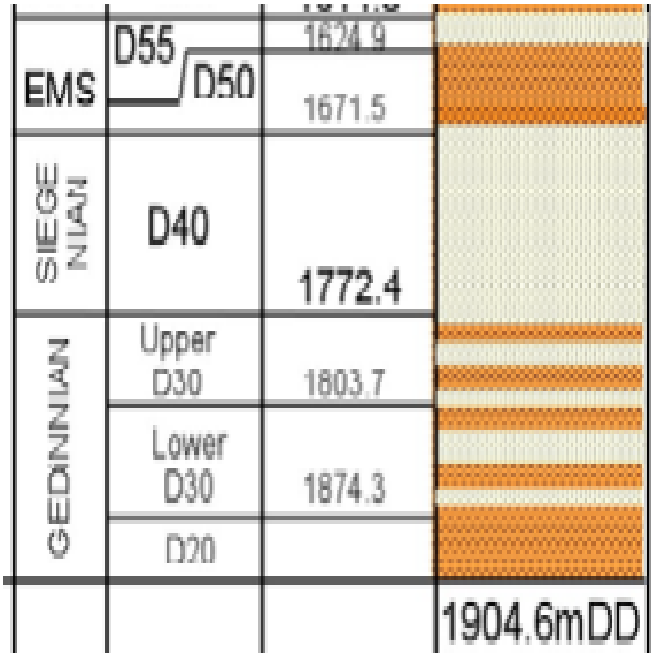
- 1er caractère **: 2/8** l'usure des éléments de coupe des rangées intérieures ;
- 2ème caractère **: 1/8** l'usure des éléments de coupe des rangées extérieures ;
- 3ème caractère **: WT** dents usées ;
- 4ème caractère **: N** l'usure de l'outil est localisée sur le nez ;
- 5ème caractère **: X** l'outil est sans roulements (PDC) ;
- 6ème caractère **: I** il n'y a pas de perte de diamètre ;
- 7ème caractère **: NO** pas d'autre caractéristique ;
- 8ème caractère **: TD** Profondeur finale / pose du tubage.

On trouve l'outil dans un bon état, les **Rolling cutters** sur la zone de l'épaule étaient tout nouveau avec une certaine usure sur le nez.

Figure 2: l'usure sur les rolling cutter.

Figure 3:l'usure sur les taillants fixes.

VIII.4. Les offset

REG-24 Well (2008)	Puits 02
	

Bit	8.5" FMH3845Z
Type	PDC
Driver	Rotary
RPM	60 - 180
WOB	4 - 15 Tons
Interval	1570 - 1659
Length	89 m
ROP	4.1 m/hr
Dull	3-2-WT-A-X-I-BT-PR
Drilled 66m above D40 at 9.1m/hr Drilled 22m of D40 at 1.52m/hr	

Bit	02
Type	Hybrid PDC
Driver	Rotary
RPM	70 - 140
WOB	7 - 12 Tons
Interval	1605 - 1687
Length	82 m
ROP	2.39 m/hr
Dull	4-4-RO-N-X-I-WT-PR
The bit drilled 11m into the D40 at 2.34 m/hr; last meter at 0.8 m/hr	

Discutions et interprétation

Apres une analyse sur les performances des outils dans les puits voisins, on remarque que l'outil PDC dans le puits 01 a réalisé un métrage de 89m avec une vitesse d'avancement moyenne de 4.1 mais l'usure détectée après la remontée de l'outils en surface était de 3-2-WT-1-A-XBT-PR aussi l'outil HYBRID dans le puits 02 a réalisé un métrage de 82m avec une vitesse d'avancement moyenne de 2.39 et une usure de 4-4-RO-N-X-I-WT-PR

Par contre l'utilisation de L'outil MSIR 613 a permet de réaliser un métrage supérieur de 126m avec une vitesse d'avancement de 2.06 et une usure de 2-1-WT-N-X-I-NO-TD.

VIII.5. Conclusion

L'introduction de cette nouvelle technologie nous a apporté les avantages suivants :

- Atteindre la profondeur finale prévue en une seule passe de forage.
- Augmentation du métrage fore par 31% par rapport au puits voisins et réalisation d'un nouveau record dans le champ de IN SALAH.
- Pas d'usure importante observe sur les rolling cutters ce qui confirme que ces cutters tournaient au cours de forage.
- Apres la remontée de l'outil on le trouve dans un très bon état ce qui nous permet de l'utiliser pour une deuxième passe.

Conclusion

Les propriétés de formation géologique sont parmi les facteurs qui ont une influence directe sur l'avancement et la performance de l'outil, surtout la dureté et l'abrasivité qui peuvent augmenter considérablement le degré d'usure de l'outil et réduisent sa durée de vie.

L'adaptation des outils aux formations géologique à forer est très difficile mais elle peut être améliorée en se basant sur les rapports des outils dans les puits voisins, les informations fournies par les logs électriques et les résultats des analyses sur les carottes dans la région.

L'introduction de la technologie des Rolling cutters dans le forages des formation dures et abrasives a permet de réduire l'usure grâce à la répartition du travail et de la chaleur sur toute la surface circonférentielle du taillant ce qui nous permet d'augmenter la dure de vie de l'outil et d'aller plus profondément avec une bonne vitesse d'avancement.

Les résultats de simulation effectuée par la plateforme de IDEAS montrent que cette technologie n'apporte aucun effet négatif concernant les vibrations et l'avancement par rapport à la conception de base.

L'utilisation de l'outil ONYX 360 rolling cutter dans le champ de IN SALAH a confirmé l'efficacité de cette nouvelle technologie après la réalisation de tout le métrage prévu en une seule passe avec une bonne vitesse d'avancement et par conséquence l'enregistrement d'un nouveau record dans cette région.

BIBLIOGRAPHIE

- ✓ Les outils de forage "SONATRACH" Division de Forage DF
  - F.GRONDIN - Edition Janvier 2004 -
- ✓ Rapports Géologiques des puits du champ IN SALAH.
- ✓ Techniques d'exploitation pétrolière - Le Forage -
  - Jean-Paul GUYEN - Editions TECHNIP 1993-
- ✓ Documentations SONATRACH (rapports journaliers, fiche puits, modèle géodynamique)
- ✓ Documentations - Schlumberger –
- ✓ Drilling Oil and Gas Field Development Techniques
  - J.P.NGUYEN, - Edition Technip Paris, 1982-
- ✓ Outils et paramètres de forage
  - J.BEAUME, - Edition ENSPM, 1999-
- ✓ COURS DE FORAGE. Tome 02. Paramètres et contrôle du forage
  - A. CHOQUIN, Publication de L'Institut Français du Pétrole, Edition Octobre 1975.
- ✓ Les rapports des outils "Bit record" de la société SMITH BITS