

**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 Présenté devant :**

**LE DEPARTEMENT "GISEMENT ET RESSOURCES MINERALES"**

**Pour obtenir :**

**LE DIPLOME DE MASTER 2**

**Spécialité : Génie pétrolier**

**Option : Forage des puits des hydrocarbures**

**THEME**

***Optimisation de la vitesse d'avancement de l'outil  
(ROP) en utilisant le modèle MSE***

Réalisé par :

**M<sup>r</sup> SEDDIK AMEUR Anis**

Sous la direction de :

**M<sup>r</sup> HADJADJ Ahmed**

**Soutenu le :.....**

**Devant le jury :**

Président : M.....

Examineur 1 : M.....

Examineur 2 : M.....

Examineur 3 : M.....

**Année universitaire : 2016 / 2017**

**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 Présenté devant :**

**LE DEPARTEMENT « GISEMENT ET RESSOURCES MINERALES »**

**Pour obtenir :**

**LE DIPLÔME DE MASTER 2**

**Spécialité : Génie pétrolier**

**Option : Forage des puits des hydrocarbures**

**THEME**

***Optimisation de la vitesse d'avancement de  
l'outil (ROP) en utilisant le modèle MSE***

Réalisé par :

**M<sup>r</sup> SEDDIK AMEUR Anis**

Avis favorable de l'encadreur :

***M<sup>r</sup> HADJADJ Ahmed***

signature

Avis favorable du président du jury :

Cachet et signature

# *Remercîment*

*Tout d'abord, je remercie le Bon Dieu de m'avoir donné la puissance pour achever mes études supérieures.*

*Je remercier mon promoteur Pr Hadjadj Ahmed pour ses remarques, ses conseils et ses critiques constructives.*

*J'adresse mes remerciements à mes enseignants qui m'ont encadré durant tout mon cursus universitaire.*

*Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de mon stage*

*ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*À mes chers parents qui ont tout,*

*sacrifiés pour ma réussite*

*À ma grande sœur pour m'avoir*

*toujours soutenu*

*À mon petit frère et ma petite sœur*

*À l'ensemble de ma famille et les*

*personnes que j'aime*

*Anis*

# Résumé

Étant donné les prix colossaux qu'engendrent les opérations de forage, une réduction du temps de réalisation du puits est devenue l'une des priorités des ingénieurs de projet. Pour parvenir à cet objectif, le seul moyen est de faire une optimisation de la vitesse d'avancement de l'outil (ROP) par la détermination des paramètres de forage optimaux.

L'étude abordée dans ce manuscrit représente une approche mathématique, puis une optimisation de la vitesse de pénétration en utilisant le modèle MSE qui nous permettra de faire le choix des meilleurs paramètres mécaniques à appliquer pour avoir les ROP optimaux.

Le modèle choisi « Es-ROP » est le plus utilisé au niveau de l'ingénierie, mais en Algérie son utilisation reste restreinte à cause d'un manque de données concernant la dureté de la roche et plus précisément les CCS (confined compressive Strength). Dans ce travail je propose une méthode pour pallier à ce problème en utilisant des corrélations obtenues à partir des puits offset et ainsi pouvoir appliquer la méthode sur le champ de Hassi Messaoued

**Mot clés** : *Vitesse d'avancement, énergie spécifique, paramètres mécaniques, poids sur l'outil, vitesse de rotation, Confined compressive strength.*

# *Abstract*

Given the colossal cost of drilling operations, the reduction of the drilling time required to complete the well has become a priority of any project engineers. To achieve this objective, the only way is to optimize the rate of penetration of the bit (ROP) by determining the optimum drilling parameters.

In this study we are representing a mathematical approach and a ROP optimization using the MSE model which will allow us to make the best choice of the mechanical parameters applied to have the optimal ROP.

The chosen model "Es-ROP" is the most used in engineering, but in Algeria its use is restricted because of the lack of data concerning the strength of the rock and more precisely the CCS (confined compressive Strength). In this work I propose a method to solve this problem by using correlations obtained from offset wells in order to be able to apply the method on the field of Hassi Messaoued.

***Key words:*** *Rate of penetration, specific energy, mechanical parameters, weight on bit, rotation per minute, confined compressive strength.*

# Sommaire

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux.....	iii
Nomenclature .....	iv
<i>Introduction générale</i> .....	1
<i>Chapitre I : Energie mécanique spécifique, théorie et Principe de base</i> .....	4
I.1. Définition et généralité sur la MSE.....	5
I.2. Contexte de développement de la méthode.....	6
I.2.1. Contexte et problématique .....	6
I.2.2. Historique et étude bibliographique.....	6
I.3. Les principes de base du modèle .....	8
I.4. Notions générales sur la mécanique des roches .....	10
I.4.1. Résistance à la compression simple UCS « <i>Unconfined Compressive Strength</i> » .....	10
I.4.2. Résistance à la compression confinée CCS « <i>Confined Compressive Strength</i> ».....	12
I.4.3. Angle de frottement interne .....	13
I.4.4. Cohésion C .....	13
<i>Chapitre II : Généralités géologiques sur la zone étudiée</i> .....	14
II.1. Présentation du champ de Hassi Messaoud.....	15
II.2. Situation du champ de Hassi Messaoud.....	15
II.2.1. Situation géographique .....	15
II.2.2. Situation géologique.....	15
II.3. Situation du puits OMJ 642.....	16
II.3.1. Description du puits.....	16
II.3.2. Emplacement du puits.....	17
II.3.3. Le Programme de Forage du puits OMJ 642 .....	19
II.3.4. Objectifs opérationnels du puits .....	20
II.3.5. Description des séries stratigraphique traversée .....	20
<i>Chapitre III : Outils de forage</i> .....	26
III.1. Introduction .....	27
III.2. Les outils à molettes .....	28
III.2.1. Mode de destruction de la roche .....	30

III.2.2. Structure de coupe .....	31
III.2.2.1. Les dents .....	32
III.2.2.2. Les picots de carbure .....	33
III.2.2.3. Géométrie des cônes.....	34
III.3. Outils à éléments de coupes fixes .....	366
III.3.1. Diamants naturels .....	366
III.3.2. Diamants synthétiques .....	366
III.3.2.1. Diamants PDC (polycrystalline diamond compacte) .....	366
III.3.2.2. TSP (Thermally Stable Polycrystalline).....	377
III.3.3. Mode de destruction de la roche par les différents types de diamants.....	38
III.3.3.1. Diamants naturels.....	38
III.3.3.2. PDC .....	38
III.3.3.3. TSP.....	39
III.3.4. Efforts appliqués sur le cutter .....	39
III.3.5. Désignation d'un outil PDC .....	40
III.4. Usure des outils .....	40
<i>Chapitre IV : Influence des différents paramètres sur le ROP</i> .....	44
IV.1. Introduction .....	45
IV.2. Influence de paramètre mécanique sur le ROP .....	48
IV.2.1. Effet de WOB sur le ROP .....	48
IV.2.2. Effet de la rotation (RPM) sur le ROP .....	489
IV.2.3. Influence des propriétés de la formation sur le ROP .....	51
IV.2.4. Effet du type d'outil sur le ROP .....	52
IV.2.5. Effet de l'usure des dents de l'outil sur le ROP .....	55
IV.3. Influence de paramètre hydraulique sur le ROP .....	56
IV.3.1. Effet du nettoyage du front de taille sur le ROP .....	56
IV.3.2. Effets des caractéristiques de la boue sur le ROP .....	58
<i>Chapitre V : Interaction roche-outil</i> .....	61
V.1. Introduction .....	62
V.2. Caractéristiques mécaniques des roches .....	62
V.2.1. Dureté .....	62
V.2.2. Fragilité et plasticité .....	66
V.2.3. Abrasivité .....	67

V.3.	Attaque de la roche par l'outil.....	68
V.3.1.	Pénétration et écrasement.....	68
V.3.2.	Cisaillement.....	69
V.3.3.	Percussion.....	69
V.3.4.	Abrasion.....	70
V.3.5.	Erosion.....	71
V.4.	Attaque de l'outil par la roche.....	71
V.4.1.	Réactions de la roche sur l'outil.....	71
V.4.2.	Usures des parties actives de l'outil.....	72
V.5.	Optimisation des outils.....	72
V.5.1.	Adaptation des outils aux formations.....	72
V.5.2.	Protection des parties actives des outils.....	72
V.5.3.	Adaptation des paramètres de forage aux outils et aux formations.....	73
	<i>Chapitre VI : Modèle d'optimisation par énergie spécifique</i> .....	74
VI.1.	Introduction.....	75
VI.2.	Etude bibliographique sur les modèles d'optimisation du ROP.....	75
VI.2.1.	Bourgoyne et Yong.....	75
VI.2.2.	Speer.....	76
VI.2.3.	Graham et Muench.....	76
VI.2.4.	Maurer.....	76
VI.2.5.	Galle et Woods.....	77
VI.2.6.	Bingham.....	78
VI.3.	Théorie d'optimisation par le model de l'énergie mécanique spécifique « MSE ».....	78
VI.3.1.	Coefficient <i>de frottement</i> « <i>Coefficient of Sliding Friction <math>\mu</math></i> ».....	79
VI.3.2.	Efficacité mécanique « the Mechanical Efficiency $E_{ff}$ ».....	80
VI.4.	Estimation de la résistance a la compression (CCS).....	82
VI.5.	Modèle Energie spécifique – ROP (Es-ROP).....	83
VI.6.	Organigramme théorique du modèle Es-ROP.....	86
VI.7.	Limites du modèle.....	87
	<i>Chapitre VII : Application du modèle d'optimisation par MSE</i> .....	88
VII.1.	Problématique et contexte.....	89
VII.2.	Méthodologie de travail.....	89
VII.3.	Organigramme proposé pour l'application du modèle « Es-ROP ».....	91

VII.4. Objectif visé .....	92
VII.5. Calcul et exécution des étapes .....	92
VII.5.1. Sélection du puits de référence.....	92
VII.5.2. Détermination des CCS « <i>Unconfined Compressive Strength</i> ».....	93
VII.5.3. Détermination des paramètres mécaniques optimaux .....	94
VII.5.4. Calcule de l'efficacité mécanique pour le puits OMJ642.....	96
VII.5.5. Calcule du ROP <sub>opt</sub> pour le puits OMJ642 .....	96
VII.6. Analyses et interprétations des résultats obtenus.....	99
VII.6.1. Interprétation des résultats du ROP <sub>opt</sub> .....	99
VII.6.2. Interprétation des résultats des paramètres mécaniques .....	99
VII.7. Influence de l'application du ROP <sub>opt</sub> sur le temps de forage .....	102
VII.8. Performance de l'outil en appliquant les paramètres optimaux.....	104
VII.9. Étude de l'usure de l'outil et comparaison entre le cas optimisée et le cas réel.....	106
<i>Conclusion</i> .....	110
<i>Recommandations</i> .....	112
<i>Références bibliographiques</i> .....	114
<i>Annexe</i> .....	117

# Liste des figures

Figure I.1. Environnement du fond d'un puits vertical au niveau d'une roche poro/perméable .....	9
Figure I.2. Détermination de l'UCS.....	10
Figure I.3. Détermination de C et $\phi$ .....	13
Figure II.1. Situation géographique du champs de Hassi Messaoued.....	16
Figure II.2. Situation géographique du puits OMJ642.....	18
Figure II.3. Programme de forage du puits OMJ642.....	19
Figure III.1. Outils a molettes (tricônes).....	28
Figure III.2. Nomenclature des tricônes.....	29
Figure III.3. Mécanisme d'action d'un outils a molettes sur la roche.....	30
Figure III.4. Répartition des éléments de coupe sur un cône.....	31
Figure III.5. Outils a dents.....	32
Figure III.6. Outils a picots.....	34
Figure III.7. différents type de picotes.....	34
Figure.III.8. Numérotation des cônes.....	34
Figure III.9. Offset et inclinaison des cônes.....	35
Figure III.10. Structure d'un PDC.....	37
Figure III.11. TCP.....	38
Figure III.12. Action d'un outil à diamant naturel.....	39
Figure III.13. Action d'un PDC.....	39
Figure III.14. Codification de l'usure des dents.....	41
Figure IV.1. Exemple des interactions positives et négatives .....	47
Figure IV.2. Influence du WOB sur le ROP.....	48
Figure IV.3. Influence du RPM sur le ROP .....	50
Figure IV.4. Effet de la résistance sur le ROP .....	51
Figure IV.5. Effet de la pression différentielle sur le ROP .....	52
Figure IV.6. Effets normalisés des paramètres de conception des outils PDC .....	53
Figure IV.7. Effets normalisés des variables de forage sur ROP pour les outils .....	54
Figure IV.8. Effets normalisés des variables de forage sur ROP pour les outils .....	54

.....	
Figure IV.9. Effet de l'usure des dents de l'outil sur ROP .....	55
Figure IV.10. Effet du nettoyage du front de taille sur ROP .....	57
Figure IV.11. Effet du nettoyage du front de taille sur ROP.....	58
Figure IV.12. Effet de la viscosité sur le ROP.....	59
Figure IV.13. Effet de Teneur en solide sur le ROP.....	60
Figure V.1. Résistance à la pénétration.....	64
Figure V.2. Roche fragile.....	67
Figure V.3. Pénétration et écrasement de la roche.....	68
Figure V.4. Cisaillement de la roche par l'outil.....	69
Figure V.5. Percussion.....	70
Figure V.6. Abrasion.....	71
Figure V.7. Protection des parties actives des outils .....	73
Figure VI.1. Variation de $\mu$ selon le type de l'outil.....	80
Figure VI.2. Variation d' $E_{ff}$ selon le type de l'outil.. . . . .	81
Figure VI.3. Efficacité max et min d'un outil PDC .....	85
Figure VI.4. Coefficient de frottement pour un outil PDC .....	85
Figure VI.5. Correction du coefficient de frottement du a l'effet de la boue.....	85
Figure VI.6. Correction de l'efficacité du a l'effet de la boue .....	85
Figure VII.1. Situation géographique des puits OMJ 642 et OMJ 66 .....	92
Figure VII.2. Evolution du CCS en fonction de la profondeur .....	94
Figure VII.3. Graphe reliant les $WOB_{opt}$ et CCS .....	95
Figure VII.4. Graphe reliant $RPM_{opt}$ et CCS .....	95
Figure VII.5. Graphe représentant la variation du $ROP_{opt}$ par rapport au $ROP_{reference}$ .....	98
Figure VII.6. Variation des $ROP_{opt}$ et $ROP_{reference}$ sur les 600 premiers mètres forés .....	98
Figure VII.7. Evolution des paramètres mécaniques au cours du forage de certaines couches .....	100
Figure VII.8. Comparaison entre le ROP optimum et le ROP réel .....	102
Figure VII.9. Performance de l'outil 16'' .....	105
Figure VII.10. Comparaison entre coefficient d'usure réel et optimisé .....	107
Figure VII.11. Comparaison entre la fraction d'usure réelle et optimisée .....	108

# *Liste des tableaux*

Tableau III.1. Quatrième colonne d'usure .....	42
Tableau IV.1. Interactions typiques entre les variables .....	47
Tableau VII.1. Exemple sur le mode de calcul afin de déterminer les CCS .....	93
Tableau VII.2. Exemple de calcul du $ROP_{opt}$ pour le puits OMJ 642 .....	97
Tableau VII.3. Performance de l'outil 16" avec les paramètres réels et optimaux	104

# Nomenclature

ROP : Vitesse d'avancement de l'outil de forage (m/hr) ;

WOB : Poids sur l'outil (KN) ;

RPM : Vitesse de rotation (tr/min) ;

CCS : Résistance de la roche à la compression confinée (psi). ;

UCS : Résistance de la roche a la compression non confinée (psi) ;

$\emptyset$  : Angle de frottement interne ;

ROP<sub>opt</sub> : Vitesse d'avancement de l'outil de forage optimale (m/hr).

WOB<sub>opt</sub> : Poids sur l'outil optimal (KN) ;

RPM<sub>opt</sub> : Vitesse de rotation optimale (tr/min) ;

$\Delta P$  : Pression différentielle au fond du puits (psi) ;

Es : Energie spécifique (psi) ;

A<sub>B</sub> : Section de puits 'l'outil' (in<sup>2</sup>) ;

T : Torque (ft-lbf) ;

D<sub>B</sub>: Diamètre de l'outil (in) ;

$\mu$ : Coefficient de frottement (sans unité) ;

E<sub>ff</sub> : Efficacité mécanique (sans unité) ;

ECD: Pression exercée par la densité équivalente de la boue au fond de puits  
« *Equivalent Circulating Density* ».

PP : Pression de pores (psi) ;

W<sub>ff</sub> : Hauteur des dents finale en fraction ;

W<sub>f0</sub> : Hauteur des dents initiale en fraction. ;

$W_{ci}$  : Coefficient d'usure dans le mètre  $i$  ;

$A_{abri}$  : Coefficient d'abrasivité de la roche dans le mètre  $i$  ;

$H$  : Profondeur du forage ;

$H_0$  : Profondeur initiale de la descente de l'outil ;

$C$  : Coefficient de proportionnalité ;

$H_f$  : Profondeur de remonté de l'outil ;

$P_h$  : Prix de location de l'appareil de forage ;

$\Delta T$  : Temps de forage gagné ;

$M$  : Métrage de la phase ;

# ***Introduction générale***

L'objectif principal du forage d'un puits est d'atteindre le réservoir d'hydrocarbures dans les meilleures conditions et dans les plus brefs délais, mais surtout pour un prix de revient minimal.

L'expérience a montré que la majeure partie du temps nécessaire à la réalisation d'un puits est le temps de rotation de l'outil donc la vitesse d'avancement (ROP) qui est directement lié au paramètre de forage appliqué au fond. À partir de cela, on peut conclure que la connaissance et l'utilisation des paramètres de forage optimaux, nous permettrons d'avoir le meilleur avancement possible et donc de minimiser le temps, et par conséquent le coût global du forage.

Cependant cette optimisation peut s'avérer compliqué puisqu'elle nécessite l'utilisation d'un modèle pour relier le ROP à l'ensemble des variables de forage, donc on peut dire que le choix du modèle adéquat reste la clef de la réussite et l'obtention des meilleurs résultats possibles

Dans mon travail, je vais essayer de faire une approche puis une optimisation de la vitesse d'avancement de l'outil par la détermination des paramètres mécaniques optimaux en utilisant la méthode d'optimisation par énergie mécanique spécifique « *Mechanical specific energy* » qui est la méthode la plus fiable et la plus utilisée par les ingénieurs de projet et les compagnies de service spécialisé dans les performances des outils. Afin d'atteindre cette objective, mon travail est réparti en 7 chapitres comme suit :

Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur la notion d'énergie spécifique et sur le modèle d'optimisation par MSE ainsi que son principe de base

Le deuxième chapitre est d'une description de la situation géologique du champ de Hassi Messsaoued et plus précisément le puits OMJ642 sur lequel l'étude s'est effectuée

Dans le troisième chapitre, on s'intéressera à des généralités sur les outils de forage étant donné l'importance du choix de l'outil afin de réaliser les meilleures performances

Le quatrième chapitre est une description des différents facteurs qui influent sur la vitesse d'avancement et qui doivent être améliorées afin de réaliser des ROP optimaux

Dans le cinquième chapitre, l'étude est portée sur les propriétés des roches forées ainsi que l'interaction entre ses roches et l'outil puis son influence sur la vitesse d'avancement

Le sixième chapitre est une explication détaillée des étapes du modèle d'optimisation « Es-ROP » ainsi que sa particularité par rapport aux autres modèles

Le septième et dernier chapitre sera une application de la méthode sur le champs de Hassi Messaoued et une résolution des divers problèmes rencontrés, ainsi que l'analyse et interprétation des résultats obtenus .

Enfin on clôturera ce travail par des recommandations sur le sujet on ce basant sur les résultats obtenus après l'application du modèle

***Chapitre I : Energie  
mécanique spécifique,  
théorie et Principe de  
base***

## I.1. Définition et généralité sur l'énergie mécanique spécifique (MSE)

On peut définir l'énergie spécifique comme étant le travail exact effectué pour arracher un volume unitaire de la roche.

Le modèle basé sur l'Énergie mécanique spécifique « Mechanical Specific Energy MSE » a été tout d'abord utilisé effectivement dans les laboratoires pour évaluer l'efficacité d'un outil de forage.

Mais c'est bien après que les opérateurs ont commencé à élaborer un modèle qui peut être utilisé au niveau des chantiers, pour maximiser la vitesse d'avancement (ROP).

Ensuite, ce modèle est devenu la base de l'élaboration des programmes des puits, et l'analyse des performances des outils.

À ses débuts, la conception du modèle a été basée sur la notion de la résistance de compression simple « *Unconfined Compressive Strength UCS* » comme étant la résistance apparente de la roche face à l'outil de forage. Mais en réalité, ce n'est pas toujours le cas, puisque cette approche est applicable uniquement lorsque la différence entre la pression de pore et la pression hydrostatique exercée par la boue est considéré comme nul, or ce n'est pas possible, car dans les conditions de fond du puits la différence de pression est permanente puisque c'est une condition nécessaire pour la réalisation du forage

Les solutions et les méthodes globales adressées à ce problème, ont été développées et rendues effectives par « *Chevron Texaco Exploration and Production Technology Company EPTC* » par l'introduction de la notion de CCS « *confined compressive strength* ». L'EPTC Rock mechanics team, constitué d'ingénieurs en forage et en mécanique des roches et des sciences de la terre, ont travaillé ensemble pour développer une méthode simple, robuste et générale pour l'estimation de la résistance apparente de la roche et la performance des outils en premier lieu puis une optimisation de la vitesse d'avancement grâce à la méthode MSE. <sup>1</sup>

## **I.2. Contexte de développement de la méthode**

### **I.2.1. Contexte et problématique**

Il a été longtemps admis dans l'industrie du forage que l'énergie requise pour forer la formation dépend non seulement de la pression de la boue, mais aussi de la pression des pores de la formation.

Généralement, il est accepté que la formation nécessite moins d'énergie pour forer si la pression des fluides contenus dans les pores est plus élevée et il est également observé que l'ampleur de cet effet peut être significativement différente d'un type de roche à l'autre.

L'importance d'une connaissance quantitative de l'influence de la différence entre la pression de pore et la pression de boue sur la performance de l'outil de forage peut être classée en trois aspects : l'optimisation du forage, la conception des outils, et le contrôle du forage en temps réel.

L'optimisation de forage s'appuie sur des informations qui relient les paramètres d'entrée de forage tels que la pression de la boue et la pression des pores aux paramètres de sorties de forage telles que l'énergie spécifique mécanique (MSE). La conception des outils est généralement basée sur des simulateurs de bits qui nécessitent des modèles précis pour prédire la réponse de l'outil compte tenu des paramètres de formation. De plus, il est conseillé de diagnostiquer et d'identifier les formations en se basant sur les changements de réponse de forage en temps réel.

Dans notre étude on s'intéresse à l'optimisation des paramètres de sortie, donc une meilleure compréhension de l'effet de la différence de pression entre la pression des pores et la pression de boue sur la vitesse d'avancement du forage afin d'aider à améliorer les pratiques de ce domaine et ainsi arrivé à foré avec un ROP optimum.<sup>2</sup>

### **I.2.2. Historique et étude bibliographique**

Les faibles taux de vitesse d'avancement et la réduction de l'efficacité des forages ont toujours été un défi pour l'industrie du forage. Pour surmonter ce défi, une compréhension fondamentale de la mécanique du processus de coupe des

roches est nécessaire. Cependant, en raison de la nature complexe de l'interaction outil rock dans les conditions de fond, la compréhension du processus a été très limitée. Dans ce qui va suivre nous présentant une partie des études majeures qui se sont intéressées à ce problème :

Robinson (1959) a présenté une série d'expériences utilisant une installation d'essai de mécanique des roches sur trois types principaux de roches sédimentaires et a conclu que le principal facteur affectant le comportement de défaillance de ces roches est la pression "différentielle". Il a souligné que la pression des fluides de forage et la pression des fluides contenus dans les pores ont peu d'influence sur le mode de défaillance; cependant, la différence entre eux est le principal facteur de contrôle.

Une série de deux études dépendantes à l'Université du Texas à Austin a été publiée, dans lequel des tests d'impact en coin unique sur différents types de roche à différentes conditions de confinement de forage et de pression des pores ont été décrits. Les travaux précédents de Podio et Gray (1965) rapportent les expériences réalisées sur des échantillons de grès dans lesquels la pression des pores et la pression du forage ont été maintenues à la valeur atmosphérique. Plusieurs types d'effets du fluide de la roche ont été observés; l'observation la plus significative était la relation directe que la viscosité des fluides de pores sur le ROP. L'hypothèse était que le fluide plus visqueux tend à augmenter la pression des pores ce qui a influé sur la vitesse d'avancement.

Le travail de suivi de Yang et Gray (1967) ont ensuite amélioré le niveau de complexité en ajoutant les pressions des pores et les pressions hydrostatiques. La pression des pores et la pression du forage dans tous ces essais ont été maintenues égales, ce qui signifie une pression différentielle nulle. Ils ont rapporté que lorsque la pression des pores a augmenté, ce qui signifie que la pression du trou de forage a également augmenté, le mode de défaillance passe de fragile à ductile. Une telle observation n'est pas soutenue par le travail antérieur de Robinson.

D'autre part, l'étude faite par Black et al. (1985) a conclu des résultats plus similaires au travail de Robinson. Ils ont mené des expériences de forage avec un appareil de forage de laboratoire à grande échelle et axé sur le taux de filtration de la boue comme mesure de la pression différentielle. Stephens et al. (1994) ont rapporté

des expériences de laboratoire de forage de schiste dur dans lesquelles la pression des pores était censée être contrôlée dans les expériences. Ils ont signalé que la pression différentielle influe directement sur la performance de forage, mais que la mesure de cette influence reste difficile.

Certains auteurs se sont concentrés sur le côté de la modélisation du problème, en essayant d'expliquer le comportement du ROP. Peltier et Atkinson (1987) ont présenté une étude analytique dans laquelle le taux de pénétration, la diffusion et le taux de filtration sont liés au stress effectif ressenti par la roche. Ils ont conclu que le taux de pénétration lui-même provoque une modification de la pression des pores; ils ont également mentionné l'effet de la vitesse de rotation et de la profondeur de coupe.

Une étude analytique de nature similaire, mais centrée sur le mécanisme de coupe du PDC individuel, a été présentée par Detournay et Atkinson (1991). Ils ont supposé que la MSE du processus de coupe est fonction de la différence de pression entre la pression de confinement et la pression de fluide dans le plan de rupture de rupture. Sur la base de cette analyse, ils ont identifié trois régimes de forage appelés à grande vitesse (non détruits), intermédiaires et à faible vitesse (drainés). Dans le régime à grande vitesse, la pression du fluide disparaît et la MSE devient fonction de la pression de confinement du forage; dans le régime à basse vitesse, la pression du fluide est égalisée à la pression des pores de formation vierge et le MSE devient une fonction de la pression différentielle

Donc on peut prétendre que si nous normalisons le ROP en fonction de ces trois paramètres opérationnels de forage de base, ce paramètre normalisé devrait également être influencé par la lithologie de la formation et par la différence de pression qui influe sur la dureté de la formation, cette affirmation est étayée par l'étude de terrain présentée par Hazov (1994).

### **I.3. Principes de base du modèle**

Dans l'ingénierie la performance du processus de forage est principalement mesurée par le taux de pénétration (ROP) et MSE.

Le MSE est un indicateur plus supérieur en ce sens puisqu'il combine le taux de pénétration et le couple sur l'outil en une seule quantité. Une augmentation de la

MSE peut être un indicateur d'un processus de forage inefficace causé par une gamme de problèmes.

Comme on la déjà vu, différentes études de laboratoire et de terrain ont étudié l'effet de la différence entre la pression des pores et la pression hydrostatique appliquée par la boue sur les paramètres de réponse de forage tel que ROP, MSE ou d'autres paramètres.

Avant de faire une formulation mathématique des phénomènes, il faut bien comprendre comment ce phénomène se déroule, car il est la base du principe d'optimisation par MSE

La **figure I.1** représente une illustration sur l'environnement du fond d'un puits vertical au niveau d'une roche poreuse et perméable. La roche et sa contrainte de fracturation « Overburden Stress » ont été remplacées par un trou ( puits ) rempli de fluide de forage. Dans les conditions normales la pression hydrostatique exercée par ce fluide est légèrement inférieure à la pression de fracturation « Overburden Pressure OB » et légèrement supérieure à la pression de pore « pore pressure PP » sous ces deux conditions la roche se dilate légèrement au fond du trou à cause de la réduction des contraintes «  $P_{hydro}$  exercée par le fluide est inférieure à l'OB ».

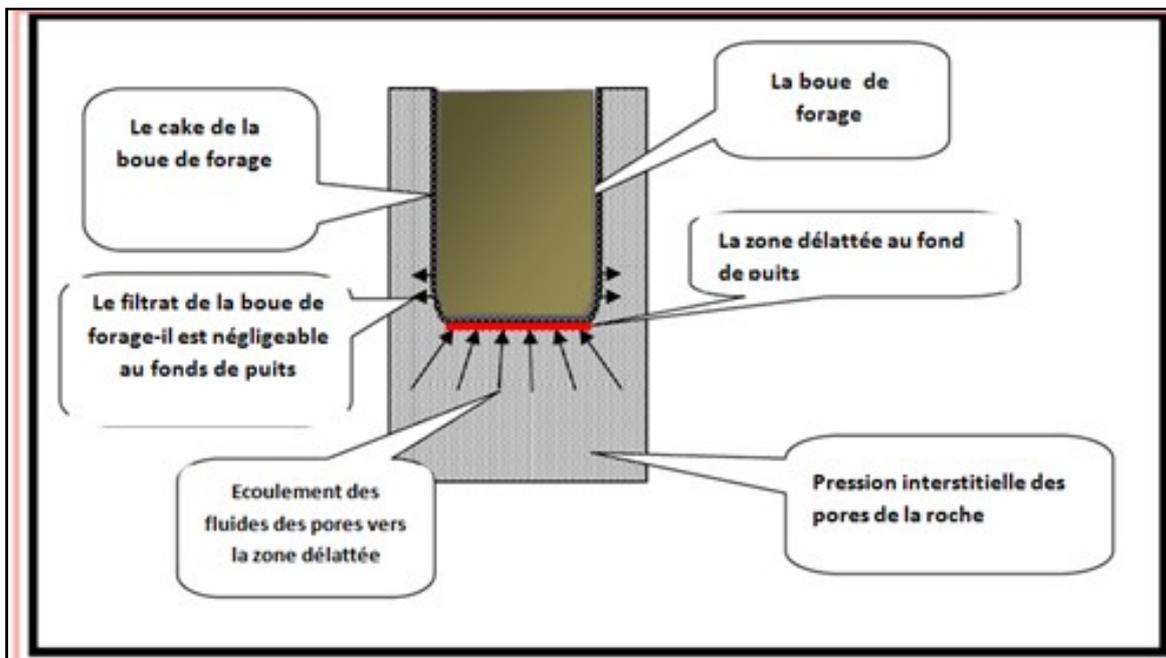


Figure I.1. Environnement du fond d'un puits vertical au niveau d'une roche poro/perméable

Si la roche est poreuse alors il y aura une réduction immédiate dans la pression de pore de la zone délattée « expanded rock » ce qui mène a une augmentation de la différence de pression et donc une augmentation de la résistance de la roche.

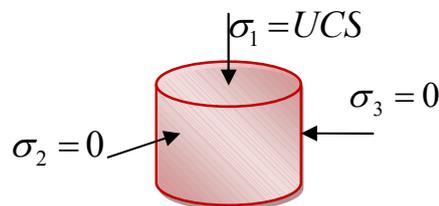
Pour les roches imperméables « comme l'argile, etc. », les phénomènes cités au-dessus sont insignifiants et négligeables, par conséquent, la pression interstitielle des pores au niveau de la zone délattée est en fonction des variations des contraintes, propriétés de la roche, et des propriétés interstitielles des fluides des pores, mais ceci n'empêche pas que la différence de pression appliquée sur la roche engendre une difficulté et une réduction du ROP

Les différents modèles d'optimisation utilisés au par avant ont négligé l'effet de cette augmentation de la dureté de la roche sur la vitesse d'avancement. Alors pour pallier a ce problème le modèle d'optimisation par MSE introduit la notion de résistance a la compression confinée CCS qui représente l'augmentation de la dureté.<sup>1</sup>

## I.4. Notions générales sur la mécanique des roches

### I.4.1. Résistance à la compression simple UCS « *Unconfined Compressive Strength* »<sup>2</sup>

C'est la résistance de la roche à un effort de compression uni axial, qui reste libre d'effort dans le plan perpendiculaire (voir **figure I.2**).



**Figure I.2. Détermination de l'UCS**

Au niveau des Laboratoire on la détermine à partir des essais suivants :

➤ **Essai de compression simple**

L'essai consiste à placer un échantillon de roche cylindrique dans une cellule uniaxiale. Il est alors soumis à une pression axiale croissante jusqu'à sa rupture. La pression de rupture représente sa résistance à la compression.

➤ **Essai de traction indirecte (essai brésilien)**

On exerce une compression suivant deux génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette de roche jusqu'à sa rupture.

Il existe une corrélation entre le module de Young statique et la résistance à la compression simple (Plumb 1994) qui s'écrit :

$$UCS = 2.280 + 4.1089 E_{stat} \dots \dots Eq 1.1$$

Où :  $E_{stat}$  en GPa et l'UCS en MPa

D'autre part, la corrélation de Coates et Denno (1981) pour la résistance à la compression simple est donnée en fonction de l'apport en argile  $V_{sh}$  et de module statique de Young. Elle s'écrit comme suit :

$$UCS = E_{stat} (0.008 V_{sh} + 0.0045 (1 - V_{sh})) \dots \dots Eq 1.2$$

Où :  $E_{stat}$  et l'UCS en MPa et  $V_{sh}$  en fraction.

Une autre corrélation a été développée par Lal's (1999) qui s'applique uniquement pour les argiles :

$$UCS = 2C \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \dots \dots Eq 1.3$$

C : Cohésion en MPa

$\phi$  : Angle de frottement interne en radians.

#### **I.4.2. Résistance à la compression confinée CCS « *Confined Compressive Strength* »**

L'industrie a largement adopté la pratique consistant à utiliser UCS pour la sélection et la performance des bits . Cela peut convenir à une roche poreuse / perméable forée avec des fluides clairs (pas de paroi gâteau), mais cela ne représente qu'une petite fraction de la pierre forée au cours du forage d'un puits.

Cette approche est erronée pour la roche poreuse / perméable forée avec une boue dont le cake est épais et pour la roche imperméable forée avec n'importe quel type de fluide de forage.

Les experts en conception des bits et optimisation des performances comprennent l'effet de la pression de confinement pour augmenter la force apparente de la roche et son impact significatif sur la performance de l'outil.

En tant que tels, beaucoup ont développé des algorithmes de prédiction de performance basés sur UCS, pression de boue, pression des pores, propriétés de la boue, etc. Certains fournisseurs d'outil ont mis en place des méthodes de calcul et d'utilisation d'une compression confinée. Au début la majeure partie de ces méthodes avait les inconvénients suivants :

- Propriétés pas largement disponibles ;
- Erronées ;
- Manque de robustesse pour une application globale sans étalonnage local ;
- Absence de simplicité intuitive basée sur les premiers principes.

Mais aujourd'hui il existe une méthode bien documentée et largement acceptée pour calculer le CCS basée sur : l'UCS, le stress limitant, la pression des pores et l'angle de friction interne de la roche. La technique est une approche commune de la mécanique des roches.

Cette approche est basée sur le principe développé par Terzaghi qui suppose que dans un milieu poreux saturé et non réactif la contrainte appliquée « Contrainte effective » est égale à la somme de la pression interstitielle supportée par la phase aqueuse  $P$  avec la contrainte effective supportée par la phase solide.

Si on est en présence d'un milieu poreux saturé de fluides, la résolution des problèmes de mécanique devient donc un peu plus compliquée et nécessiterait l'introduction de l'effet d'une interaction entre le fluide et la matrice solide.

### I.4.3. Angle de frottement interne

L'angle de frottement interne est un paramètre très difficile à estimer à travers les logs. Il existe cependant une corrélation linéaire entre ce dernier et le log du gamma Ray .

Cette corrélation s'écrit sous la forme suivante :

- Pour les formations argile- grès :

$$\phi = 30^\circ - \frac{30 - 25}{110 - 20} (\gamma_{ray} - 20) \dots \dots \dots Eq 1.4$$

- Pour les formations argiles -carbonates:

$$\phi = 38^\circ - \frac{38 - 25}{110 - 20} (\gamma_{ray} - 20) \dots \dots \dots Eq 1.5$$

Avec  $\phi$  en degrés

- Pour les argiles (Lal's, 1999):

$$\phi [rad] = \sin^{-1}(V_p - 1)(V_p + 1) \dots \dots \dots Eq 1.6$$

### I.4.4. Cohésion C

La cohésion C est obtenue par la relation suivante:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \dots \dots \dots Eq 1.7$$

$\tau$  : Contrainte de cisaillement [MPa]

$\sigma$  : Contrainte normale [MPa]

C : Cohésion [MPa]

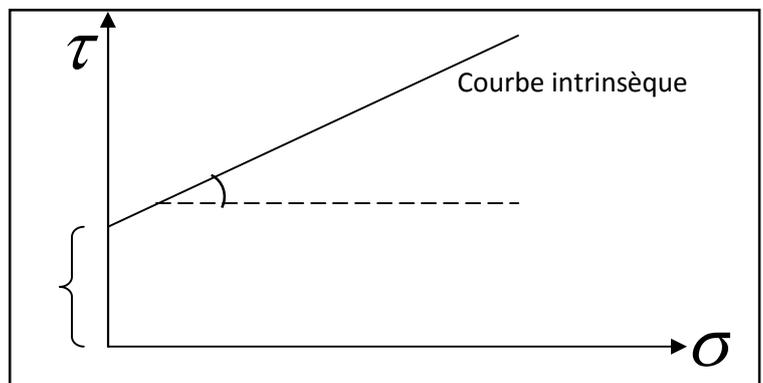


Figure I.3. Détermination de C et  $\phi$

***Chapitre II : Généralités  
géologiques sur la zone  
étudiée***

## II.1. Présentation du champ de Hassi Messaoud

Le champ de Hassi Messaoud est un vaste anticlinal, situé dans la partie centrale du Sahara Algérienne. Il a été découvert en 1956 et mis en exploitation en 1958.

Le réservoir se situe dans le Combro-Ordovicien entre 3300 et 3500m de profondeur.

Après plusieurs années de la mise en production du gisement, on a constaté que des ensembles de puits se comportent d'une manière indépendante les uns par rapport aux autres. D'où la définition des zones dont les pressions moyennes évoluent d'une manière différente. <sup>13</sup>

## II.2. Situation du champ de Hassi Messaoud

### II.2.1. Situation géographique

Le champ de Hassi Messaoud est considéré comme l'un des plus grands gisements dans le monde. Il fait partie d'un ensemble de structures formant la partie nord de la province triasique, et se situe à environ 850 km au Sud, Sud-est d'Alger, à 280 km au Sud-est du gisement de gaz à condensât de Hassi R'mel. et à 350 km à l'ouest de la frontière tunisienne. Il a pour coordonnées Lambert :

<b>X</b>	<b>790.000 - 840.000 Est</b>
<b>Y</b>	<b>110.000 - 150.000 Nord</b>

La concession sur laquelle se trouve Hassi Messaoud, dont la superficie est de l'ordre de 2200 km<sup>2</sup>, avait été octroyée le 1er novembre 1961, à l'association SN.REPAL - C.F.P.A.

### II.2.2. Situation géologique

Le champ de Hassi Messaoud est limité :

- Au nord-ouest par les gisements d'Ouargla (Guellela, Ben Kahla et Haoud Berkaoui) ;

- Au sud-ouest par les gisements d'El Gassi, Zotti et El Agreb;
- Au sud-est par le gisement de Rhoude El Baguel et Mesder.

La mole de Hassi Messaoud est le résultat d'une histoire paléotectonique assez compliquée, c'est le prolongement de la dorsale d'Amguid El Biod de plus de 800km de long. Sa structure fait partie d'un ensemble de structures formant la province triasique nord-orientale.

Géologiquement, le champ de Hassi Messaoud est limité :

- À l'ouest par la dépression d'Oued Mya ;
- Au sud par la mole d'Amguid El Biod,
- Au nord par la structure Djammaa – Touggourt ;
- A l'est par les hautes – fonds de Dahar, Rhoud El Baguel et la dépression de Ghadamès.<sup>13</sup>

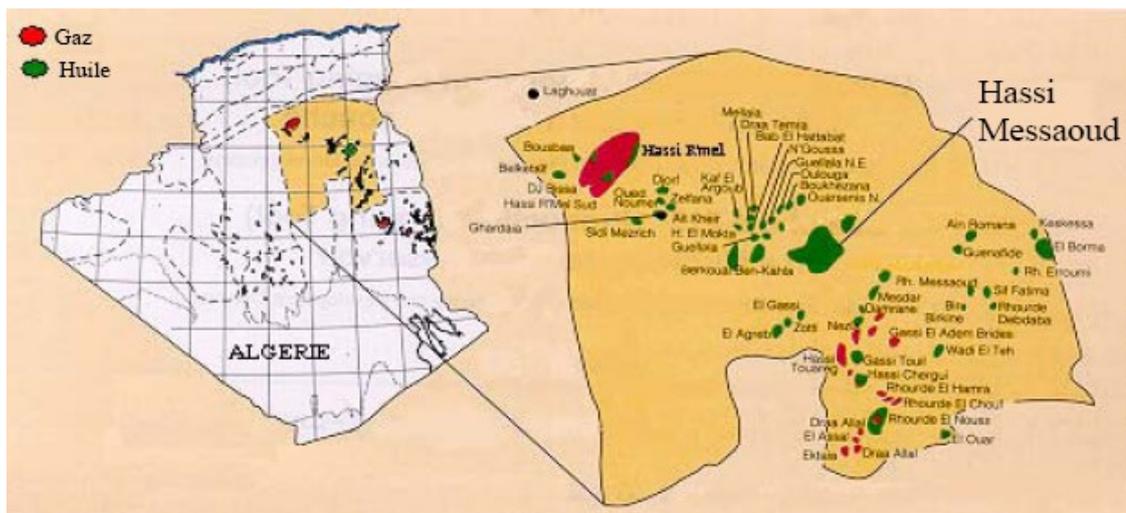


Figure II.1. Situation géographique du champ de Hassi Messaoud

### II.3. Situation du puits OMJ 642

#### II.3.1. Description du puits

OMJ 642 est un puits de développement vertical, qui doit être foré dans la subdivision OMJ du champ de Hassi-Messaoud, situé dans la partie hors zones du nord-ouest de la zone 4, ce puits est destiné à produire de l'huile dans le cadre du développement du terrain de Hassi Messaoud de la hausse du nord.<sup>12</sup>

### II.3.2. Emplacement du puits

Le puits OMJ 642 est situé dans le secteur nord du gisement de Hassi Messaoud.

- **Les coordonnées LSA « Lambert sud Algérie »** de la plate forme sont les suivantes [12] :

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Zs</b>	<b>Zt</b>
797368.05 m	128091.93 m	149.5 m	158 m

- **Les coordonnées UTM**

<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Zone</b>
778 575.996	3 529 152.004	31

- **Les coordonnées GEOG**

<b>Latitude</b>	<b>longitude</b>
31°51'59.46439"	05°56'39.67663"

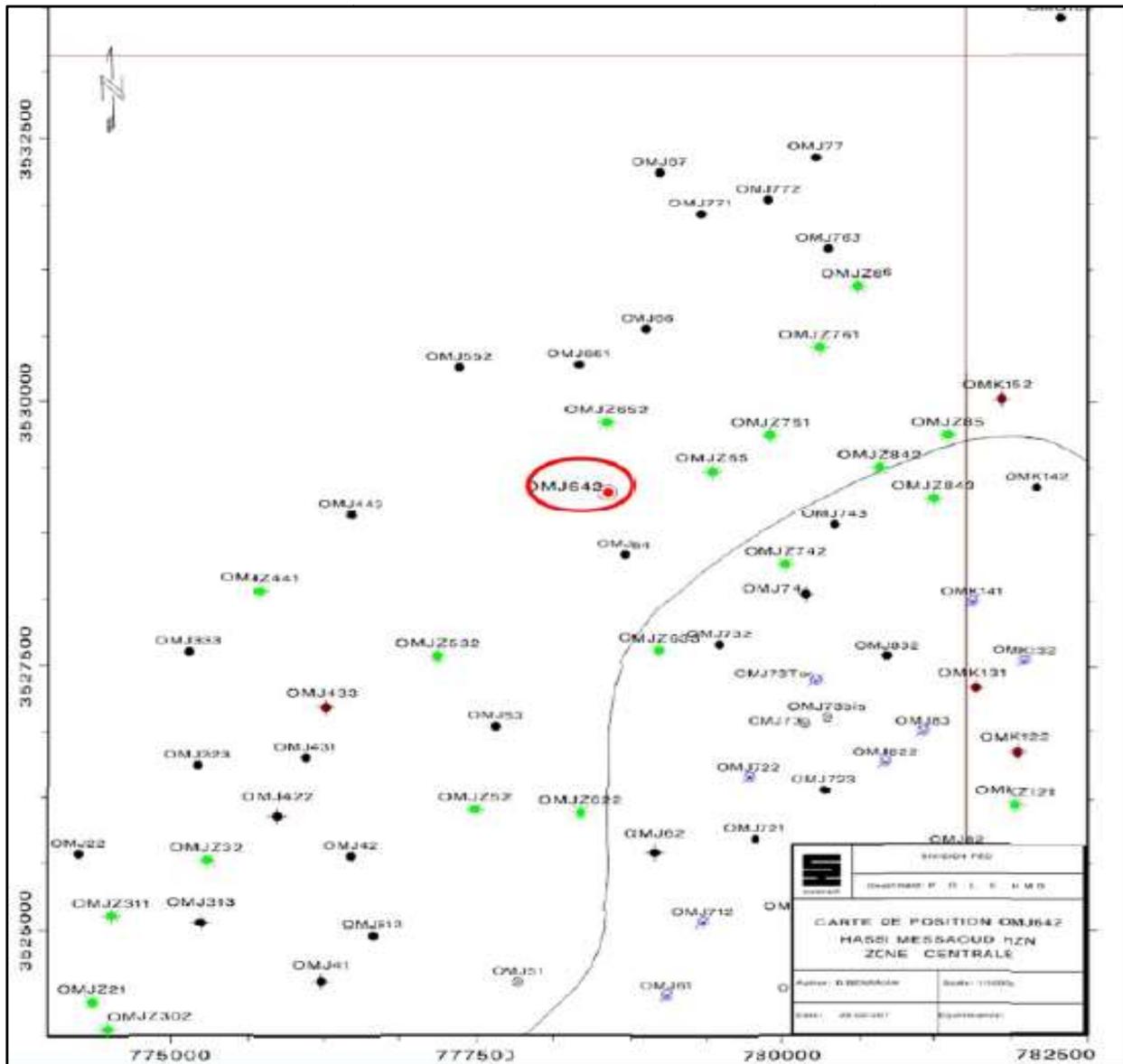


Figure II.2. Situation géographique du puits OMJ 642

II.3.3. Programme de Forage du puits OMJ 642

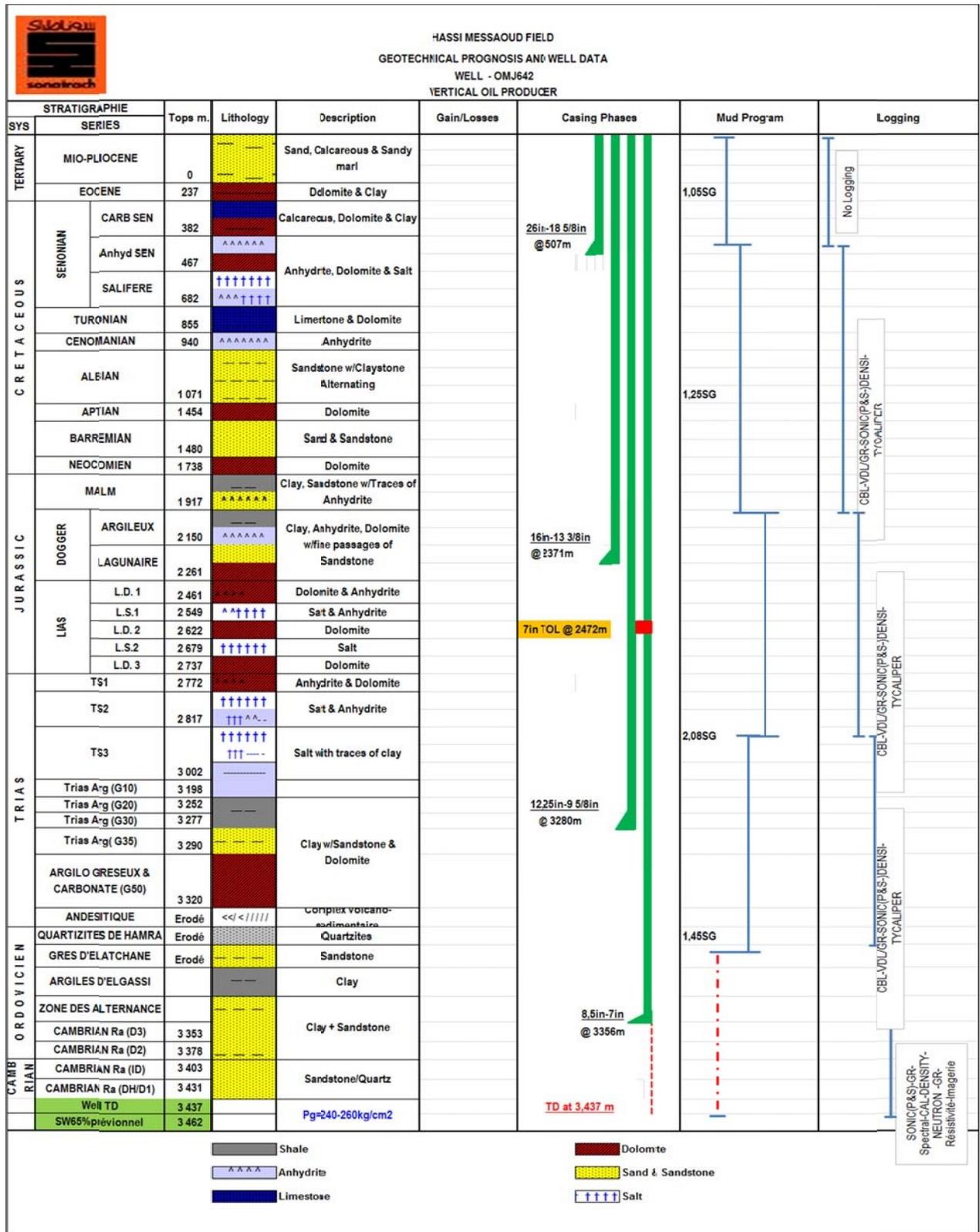


Figure II.3. Programme de forage du puits OMJ642

#### II.3.4. Objectifs opérationnels du puits <sup>13</sup>

- Atteindre une profondeur finale de 3437 m ;
- Atteindre le réservoir ciblé qui est le Cambrian Ra (D3, D2, ID) ainsi que 6 m dans D1 à 3431 m ;
- Pression de réservoir prévue à 240-260 kg/cm<sup>2</sup> ;
- Ne pas dépasser un NPT globale < 15% ;
- Réaliser les diagraphies (logging) prévues ;
- Ne pas dépasser un temps total de 85 jours pour la réalisation du puits.

#### II.3.5. Description des séries stratigraphique traversée <sup>14</sup>

##### ➤ Mio- pliocène

Le Mio- pliocène commence de 0 m (surface) avec une épaisseur moyenne de 250m, composés de : Croûte calcaire et gypse en surface, de sable et argile sableuse jaunâtre à rougeâtre, fine à grossière, comportant à la base des bancs marno-calcaires

##### ➤ Éocène

Son épaisseur moyenne est de 110 mètres. Formation: Dolomie blanche, dolomie calcaire ou argileuse blanche à grise, localement à silex.

##### ➤ Sénonien

Son épaisseur moyenne est de 450 mètres. À la base , une série lagunaire présentant des bancs massifs de sel et des alternances d'anhydrite , dolomie et d'argile grise , au sommet une série carbonatée présentant des bancs de calcaire dolomitique argileux et des bancs d'anhydrite .

##### ➤ Sénonien carbonaté

Son épaisseur moyenne est de 105 mètres. Le sénonien carbonaté est topé suite apparition d'un banc d'anhydrite massive blanche d'environ 15 m d'épaisseur.

Formation: Anhydrite massive blanche au sommet et dolomie argileuse, marne dolomitique à la base.

➤ **Sénonien anhydritique**

Son épaisseur moyenne est de 205 mètres. Le sénonien anhydritique est topé suite apparition de l'anhydrite. Formation: Anhydrite massive et marne ou argiles dolomitiques dans les premiers 70 m, pour le reste : des séries de marne dolomitique, des argiles grises à verdâtres, une dolomie argileuse grise à rares intercalations d'anhydrite blanche.

➤ **Sénonien salifère**

Son épaisseur moyenne est de 140 mètres. Le sénonien salifère est topé suite apparition d'un banc d'anhydrite d'environ 10 m d'épaisseur, et se termine par un autre banc d'épaisseur identique. Formation: Sels massifs blanc encadré d'anhydrite et comportant des argiles salifères ou anhydritiques.

➤ **Turonien**

Son épaisseur varie de 70 à 120 mètres. Moyenne : 105 m. le turonien est topé suite apparition des calcaires blancs. Alternance de calcaire argileux, calcaire dolomitique et calcaire crayeux; au sommet apparaissent les bancs de calcaire. Le Turonien présente une nappe d'eau salée.

➤ **Cénomanién**

Son épaisseur moyenne est de 145 mètres. Le cénomanién est topé suite apparition d'un banc d'anhydrite d'environ 3 à 5m d'épaisseur. Alternance d'anhydrite et d'argile rouge-brun, de marne grise et de dolomie. La limite Cénomanién-Albien coïncide avec le passage des séries évaporitiques aux séries plus gréseuses de l'Albien.

➤ **Albien**

Son épaisseur moyenne est de 325 mètres. L'Albien est topé suite apparition du premier banc de sable (5 m d'épaisseur). (Top du Vraconien qui est constitué essentiellement d'argile). Constitué de grès et de sable fin, avec des intercalations d'argile silteuse, l'Albien représente une immense nappe aquifère.

➤ **Aptien**

L'Aptien est topé suite apparition de la dolomie microcristalline beige. Il présente une épaisseur moyenne de 24 m. (La vitesse ROP est très nette dans cet étage) et son épaisseur est de 24 mètres. Il est représenté par deux bancs dolomitiques encadrant un niveau argileux. La limite Aptien-Barrémien coïncide avec la barre calcaire-dolomitique qui représente un bon repère sismique.

➤ **Barrémien**

Le Barrémien est topé suite apparition de l'argile et disparition de dolomie. Son épaisseur moyenne est de 260 mètres. Il est formé de grès fins à moyen carbonaté à plages d'anhydrite, alternant avec des niveaux d'argile gréseuse et dolomitique. Formation : alternance de grès moyen à grossier, rouge ou blanc compact, à ciment argileux ou argilo-dolomitique, de sable grossier, d'argile silteuse parfois gypseuse et de rares passées dolomitiques, au bottom.

➤ **Néocomien**

Le Néocomien est topé suite apparition des argiles grises et vertes gypseuses. Son épaisseur est de 205 mètres. Il comprend deux niveaux, à la base un terme gréseux constitué de grès et de quelques passées d'argiles avec des passées de grès, au sommet un terme argileux représenté par des argiles avec nombreuses intercalations de calcaire et de dolomie. Formation : Argile grise et verte gypseuse au top et argiles vertes et brunes gypseuses quelquefois dolomitiques à passées silteuses et grès blancs ou rose au milieu, Argile brun rouge et vert souvent dolomitique ou gypseuse à la base.

➤ **Le Jurassique**

Son épaisseur moyenne est de 844 mètres. Le Jurassique est un ensemble argilo-gréseux à intercalations de calcaire au sommet (Malm) et à alternances de faciès lagunaires et marins à la base (Dogger et lias).

➤ **Malm**

Son épaisseur moyenne est de 230 mètres. Il est caractérisé par les dépôts d'argile et de marne avec des intercalations des bancs de calcaire et dolomie

accompagnés de quelques traces d'anhydrite. Le Malm commence et se termine par une dalle carbonatée (Carbonates + Anhydrite).

➤ **Dogger argileux**

Son épaisseur moyenne est de 105 mètres. Le D. Argileux est topé suite apparition de 100% d'argile après la disparition des carbonates de la base du Malm. Formation : Série d'argiles bariolées silteuses ou dolomitiques, à fines passées de marnes dolomitiques et de calcaire argileux.

➤ **Dogger lagunaire**

Son épaisseur moyenne est de 225 mètres. Le D. Lagunaire est topé suite apparition du 1<sup>er</sup> banc d'anhydrite. Formation : Alternance d'anhydrite compacte blanche à grise, d'argile, marne et de dolomie argileuse grise.

➤ **Lias dolomitique (LD1)**

Son épaisseur moyenne est de 75 mètres. Un banc d'argile de 4 à 5 m d'épaisseur au TOP. Et au bottom. Formation : Alternance d'anhydrite d'argile et de dolomie.

➤ **Lias salifère (LS1)**

Son épaisseur moyenne est de 95 mètres. Un banc d'anhydrite de 4 à 5 m d'épaisseur au TOP. Et de 7 à 10 m au bottom. Formation : Alternance de sel blanc, d'anhydrite blanche à grise et d'argile à anhydrite ou dolomitique

➤ **Lias dolomitique (LD2)**

➤ **Lias salifère (LS2)**

➤ **Lias dolomitique (LD3)**

➤ **Trias Salifère (TS1)**

Unité constituée d'anhydrite et argile dolomitique avec intercalations de sel d'épaisseur moyen de 50 m. Formation : Argiles plastiques brun rouge injecté d'anhydrite et anhydrite massive. Un (01) banc de sel massif blanc rosé ou top.

➤ **Trias Salifère (TS2)**

➤ **Trias salifère 3 (TS3)**

➤ **Trias Argileux gréseux**

Le Trias Argilo-Gréseux (T.A.G) couvre une série de terrains comprise entre la base du dernier banc épais de sel massif et l'assise paléozoïque. La puissance moyenne de ces formations est d'environ 190 m. on y distingue deux zones (l'argileux à la partie supérieure et le gréseux à la base).

➤ **Ordovicien**

**a- Quartzite de Hamra :** Quartzite grise blanche, fine à moyenne localement grossière à fissures surs horizontales à tracés des tigilites.

**b- Grés d'élat chance :** Elle est caractérisée par une succession d'argile et de grés sont fines à moyenne, quartzitique, argile silteuse et glauconieuse E=25 m.

**c- Argile d'el grossi :** Série homogène composée d'argile verte ou noire, indurée, micacée, carbonatée et glauconieuse.

**d- zone des alternances :** elle est désignée ainsi en raison de la succession irrégulière d'argile silteuse noire, des siltstones et des grés très fins quartzitiques de la glauconie et par l'abondance des tigilites.

➤ **Combrien :** il est constitué de :

**a- Lithozone grés isométriques <R<sub>1</sub>> :** il est représenté par des grés isométriques moyens à fins à ciment argileux, caractérisé par une mauvaise forabilité au-dessous de 1850m à 1900m avec passées silteuse, les tigilites y sont abondant, il repose sur le Ra supérieur par une surface d'abrasion E=42 m.

**b- Lithozone grés amisométriques <R<sub>a</sub>> :** composé d'un ensemble des grés quartzitiques anisométrique à stratification doliques cette Lithozone est marquée par l'apparition des tigilites au sommet E=125 m.

**c- Lithozone <R<sub>2</sub>> :** Elle est constituée des grés moyens à grossiers et à ciment argile ces grés renferment des barminers d'argile jaune verdâtre E=100 m.

**d- Lithozone <R<sub>3</sub>>** : Elle est représentée par une série de comblement des grés arkosique et. Les grains de quartz sont très grossiers et mal classés, le ciment est composé essentiellement d'illite (E=370 m).

➤ **Intra combrien**

Il correspond à ses grés argileux ranges, mis en résidence au nord du champ par le forage OMG 57 sous une épaisseur de 45 m.

# ***Chapitre III : Outils de forage***

### III.1. Introduction

L'outil de forage est le premier élément à s'attaquer aux terrains, autrement dit c'est la face d'attaque de notre garniture. Il est la pièce la moins volumineuse, mais la plus importante pour la réalisation de notre puits.

Le choix d'un outil de forage dépend essentiellement de la nature des terrains à traverser.

Les outils de forge se distinguent par le mode de destruction des roches qui sont :

- **Destruction par raclage ou décolletage** : Ce sont des outils adaptés pour les terrains tendres.
- **Destruction par burinage ou écaillage** : Ce sont les outils adaptés pour les terrains durs.
- **Destruction par abrasion** : Ce sont les outils au diamant. Ils sont adaptés pour les terrains très durs et abrasifs.
- **Destruction par broyage** : Ce sont les outils sertis de pastilles de carbure de tungstène. Ils conviennent pour les terrains durs tels que les quartzites, le granite, le basalt...

Les outils de forage 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 une soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de friction, avec ou sans système de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression.
- **Les outils à éléments de coupe fixes** : Ils ne possèdent pas de pièces tournantes, ce sont des outils monobloc. Des diamants naturels ou synthèse sont utilisés pour leur fabrication. Les outils à diamants naturels travaillent à la façon d'une lime tandis que les outils à Diamants synthétiques travaillent à la façon d'un rabot. <sup>3</sup>

### III.2. Outils à molettes

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

Il existe plusieurs types d'outils à molettes, notamment :

- les bicônes (2 cônes) ;
- les tricônes (3 cônes).

Le bicône utilisé auparavant pour la déviation est aujourd'hui peu utilisé.

Le tricône (outil à trois 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.

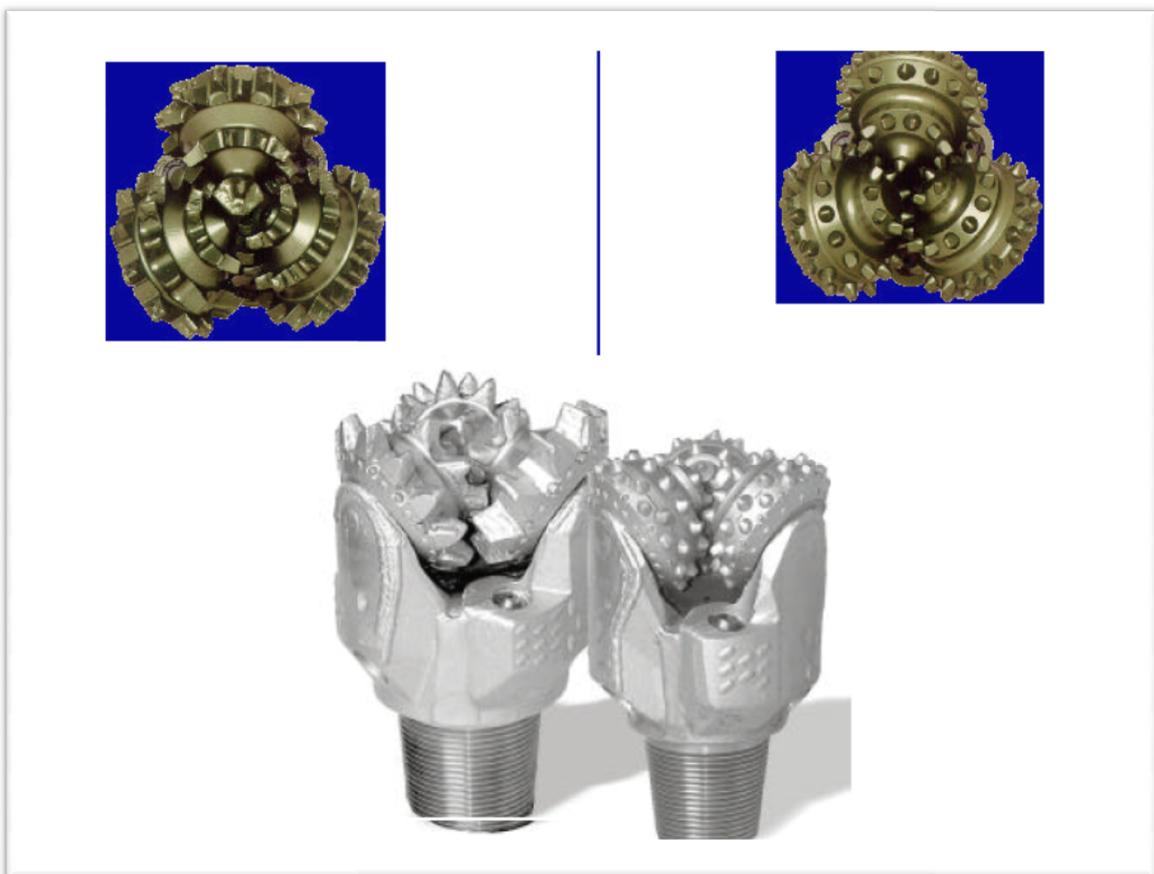


Figure III.1. Outils à molettes (tricône)

Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures. Là où les outils à dents ne pouvaient ne forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible. 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 roulement à rouleaux).<sup>3</sup>

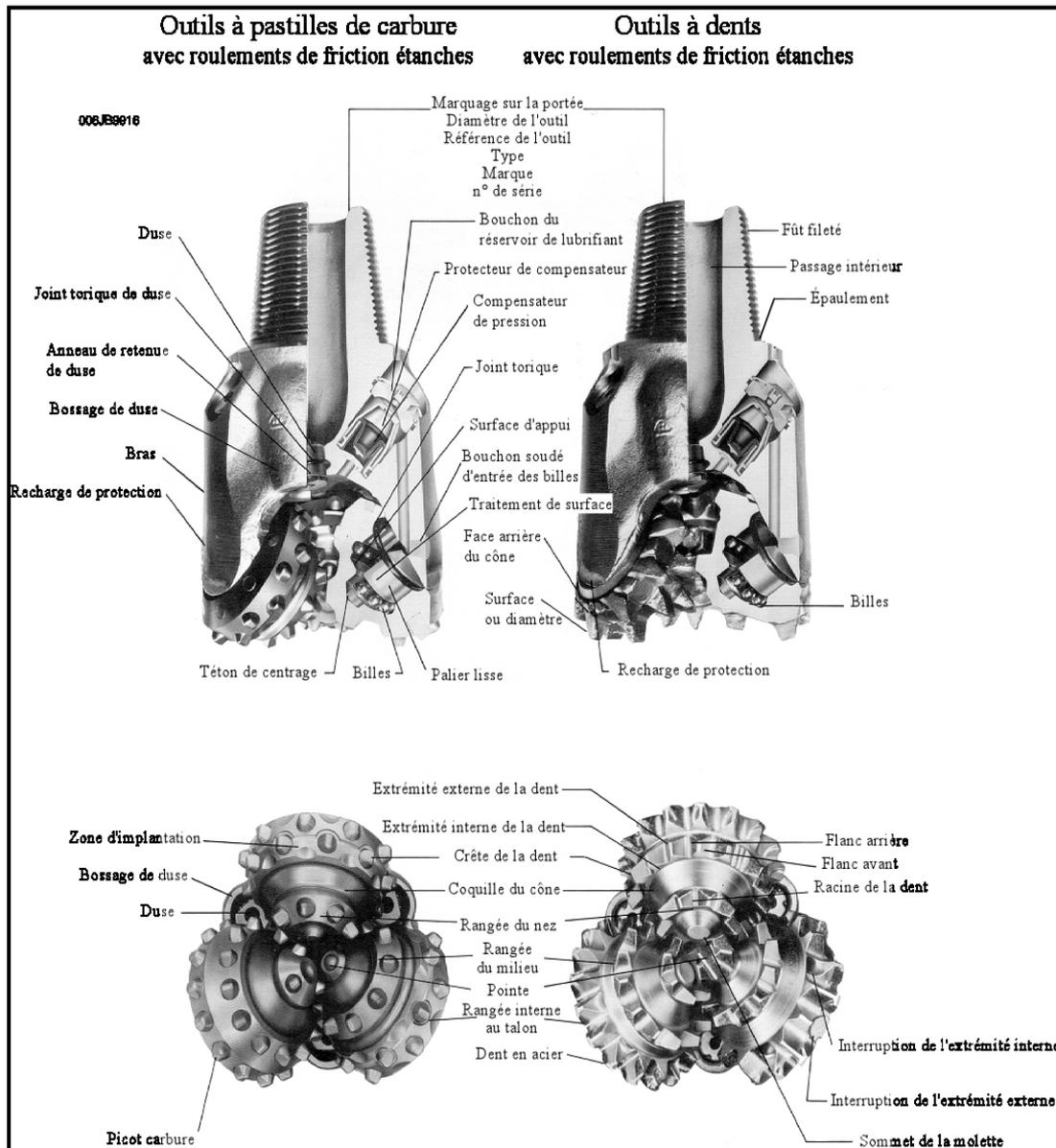
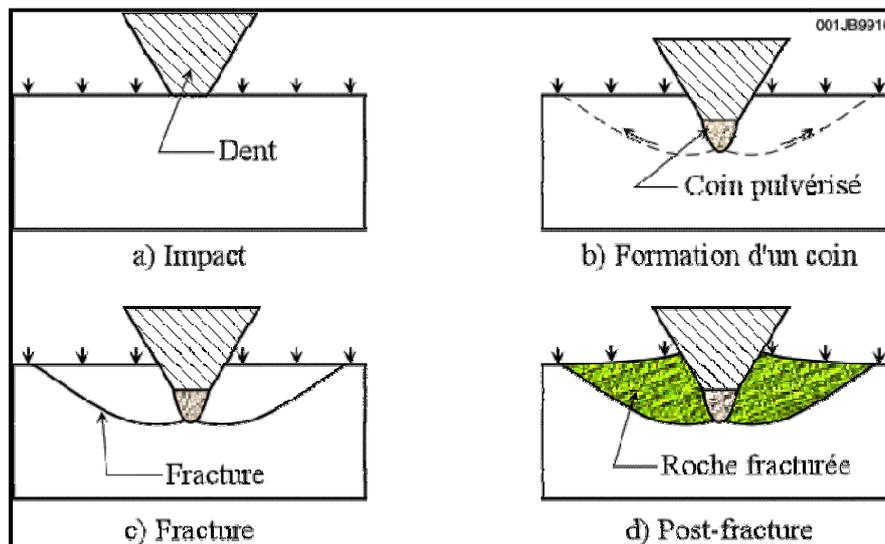


Figure III.2. Nomenclature des tricônes

### III.2.1. 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 III.3. 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.<sup>3</sup>

### III.2.2. Structure de coupe

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

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

Les structures de coupe sont réparties en plusieurs rangées :

- la rangée de nez (nose row) la plus au centre de l'outil ;
- la rangée médiane (middle row) ;
- la rangée de talons (heel row) la plus extérieure.

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

Le pas (écartement entre les éléments de coupe d'une même rangée) est également un point important. Si les dents sont régulièrement réparties sur un cercle, elles vont retomber toujours au même endroit sur le front de taille réduisant ainsi la pénétration et la destruction de la roche. Pour éviter cela, la répartition des dents n'est pas régulière. <sup>3</sup>

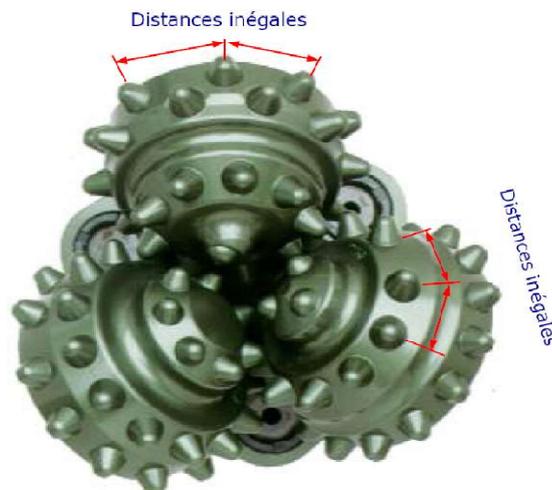


Figure III.4. Répartition des éléments de coupe sur un cône

### III.2.2.1. Dents

Les outils à dents en acier sont utilisés en début de trou, dans les formations tendres, avec de grandes vitesses de rotation, ainsi que dans les zones où l'épaisseur des couches rend les outils à picots non économiques.

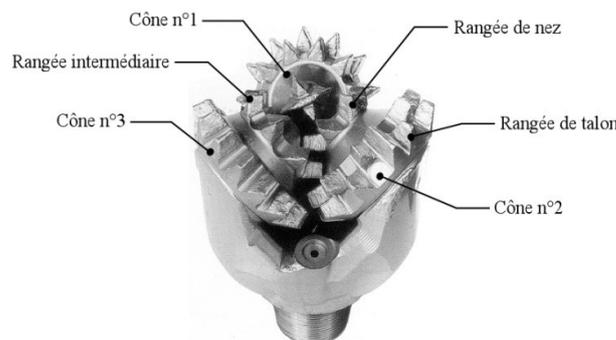
Les dents de la rangée de talons ont des profils de crête adaptés aux formations à forer ; le but étant de limiter leur usure et ainsi de réduire la perte de diamètre de l'outil.

Les 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 dents des outils pour ce type de formation peuvent être conçues pour s'auto-affûter en s'usant. Cela est réalisé en rechargeant seulement un côté de la dent.

Les 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.

Les dents pour formations dures ne sont pas rechargées. Elles présentent la même dureté sur les deux faces. Ces dents en s'usant ne s'affûtent pas. Il sera nécessaire d'appliquer un poids de plus en plus important sur l'outil pour obtenir le même avancement au fur et à mesure qu'il s'use.<sup>3</sup>



Outil à dents

Figure III.5. Outil a dents

### **III.2.2.2. Picots de carbure**

L'outil à picots (insert bit) de 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.

Les picots cylindriques en carbure de tungstène fritté sont sertis dans des trous usinés dans les cônes. Cet assemblage donne une structure de coupe présentant une grande résistance à l'usure par abrasion ainsi qu'aux efforts de compression.

Grâce aux progrès de la métallurgie, différentes formes de picots sont actuellement disponibles, ce qui permet d'utiliser ce type d'outil pratiquement dans tous les types de terrain.

- 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 tendres pour un avancement maximum grâce à une action de gouge et de raclage. Des formes spécifiques de ciseau sont choisies en fonction de la formation et des propriétés géométriques de l'outil.

Les picots utilisés sur la rangée de talons sont plus courts et plus arrondis que ceux des autres rangées, car ils supportent des charges plus importantes.<sup>3</sup>

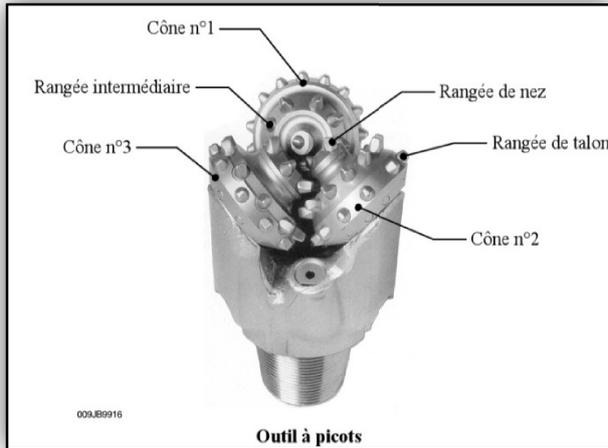


Figure III.6. Outil à picots

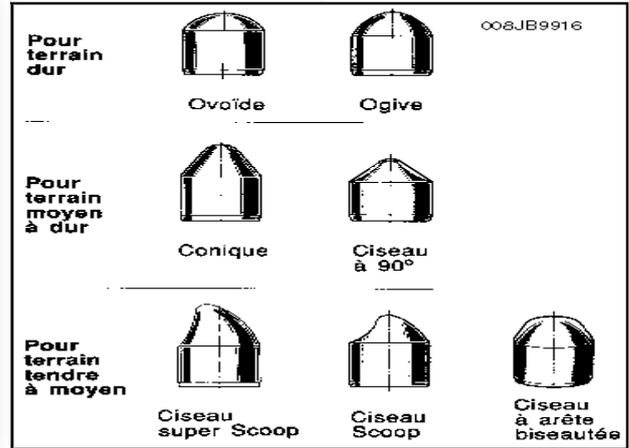


Figure III.7. Différents types de picots

### III.2.2.3. Géométrie des cônes

De part la disposition des éléments de coupe, les trois cônes d'un outil ne sont pas identiques et sont numérotés de la façon suivante :

- Cône n° 1 : le cône ayant la pointe qui occupe le centre ;
- Cônes n° 2 et 3 : ce sont ceux que l'on rencontre successivement en partant du cône n°1, dans le sens des aiguilles d'une montre, en faisant face aux trois cônes.

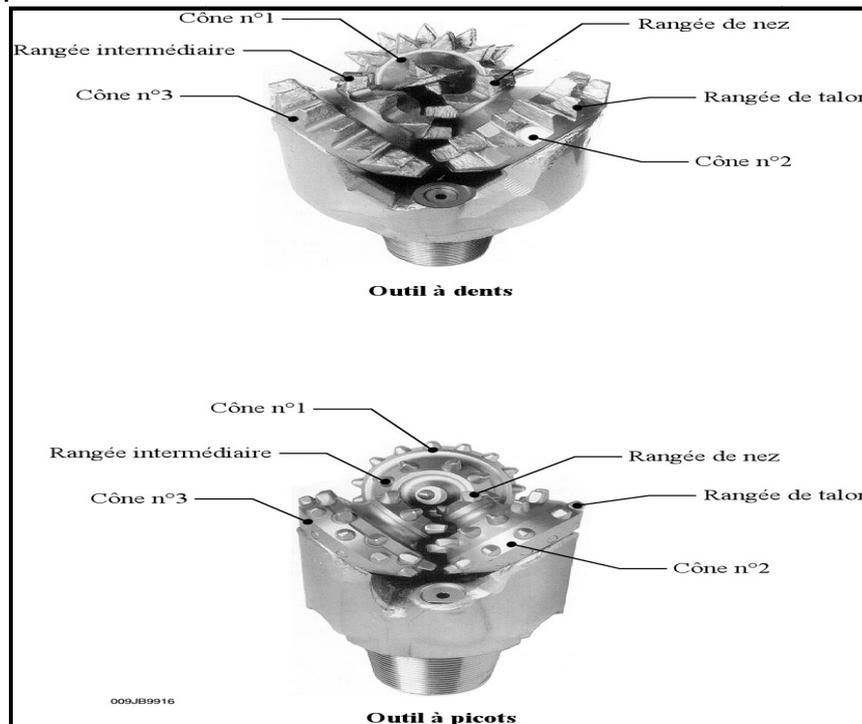


Figure.III.8. Numérotation des cônes

Pour obtenir l'effet de glissement ou ripage, l'axe de chaque molette est décalé et ne passe pas par le centre de l'outil. L'angle entre l'axe du cône et l'axe joignant le centre de l'outil est d'autant plus grand que l'outil est destiné à des formations tendres. Il est nul sur les outils destinés aux formations dures, l'arrachage des copeaux n'est plus possible et l'effet de glissement serait nuisible aux dents de l'outil.

Cet angle est de l'ordre de 5 à 6° sur les outils pour formations tendres, de 3° sur les outils pour formations moyennement dures et de 0 sur les outils pour formations dures.<sup>3</sup>

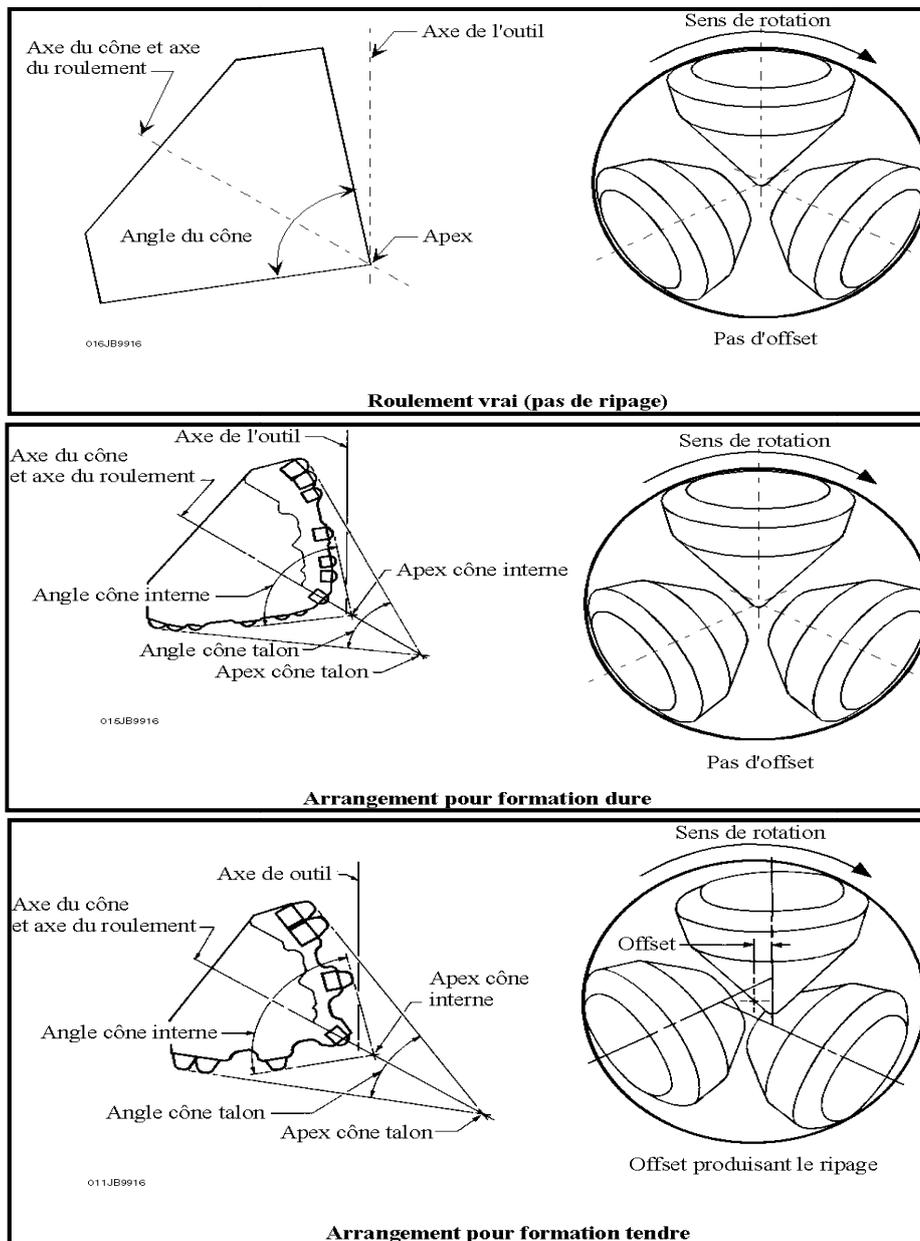


Figure III.9. Offset et inclinaison des cônes

### III.3. Outils à éléments de coupes fixes

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.

#### III.3.1. Diamants naturels

C'est une cristallisation du carbone de densité de 3,52. De point de vue chimique, le diamant et le graphite sont identiques alors que de points de vue physiques, ils sont totalement contradictoires : le graphite est fragile de couleur noire, par contre, le diamant est extrêmement dur, meilleur conducteur thermique, hautement abrasif et la plupart du temps transparent.

Grâce à ses qualités remarquables, le diamant est utilisé depuis trop longtemps dans l'industrie minière.

Le poids de diamant s'exprime en Carat (1carat = 0,2g). Un diamant d'un carat a un diamètre d'environ 5mm. Le plus souvent, la taille des pierres est indiquée en nombre de pierres par carat. <sup>6</sup>

#### III.3.2. Diamants synthétiques

##### III.3.2.1. *Diamants PDC (polycristalline diamond compacte)*

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 T°C élevés (10000 bars et 1500°C).

La fine couche de diamant, grâce à la présence de cobalt, peut être fixée sur un support en carbure de tungstène. Le produit obtenu est appelé – *STRATAPAX* - ou -*COMPACT*.

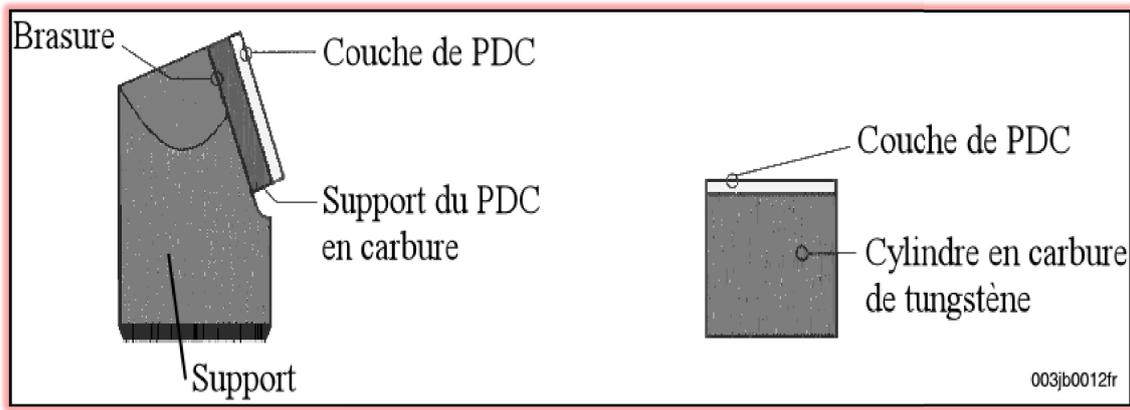


Figure III.10. Structure d'un PDC

### III.3.2.2. TSP (Thermally Stable Polycrystalline)

Pour pallier à l'instabilité thermique des diamants PDC, General 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 1200°C. 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 ont 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.

Les diamants TSP présentent de nombreux avantages sur les autres types de diamants :

Il résiste mieux à la T°C que les PDC ;

Grâce à sa structure polycristalline, il résiste mieux chocs que le diamant naturel, à l'exception de carbonado qui est également cristallin, son usure irrégulière produit des faces tranchantes alors que le diamant naturel s'émousse. De ce fait, les performances des diamants TSP diminuent peu ou pas au cours de la vie de l'outil.

En définitive, le diamant TSP a l'efficacité du diamant PDC et la résistance du diamant naturel. <sup>6</sup>



**Figure III.11. TCP**

### **V.3.3. Mode de destruction de la roche par les différents types de diamants**

#### ***III.3.3.1. Diamants naturels***

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

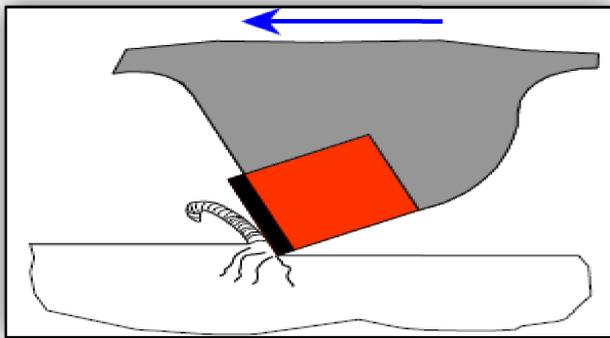
Le handicap du diamant naturel est la faible dimension des pierres utilisées. La profondeur de l'entaille produite dans la roche est très faible (de l'ordre de 0.1 mm). Cela limite l'utilisation du diamant naturel aux terrains les plus durs et abrasifs. Les vitesses d'avancement obtenues seront donc relativement faibles (de 2 à 5 m/h).

#### ***III.3.3.2. PDC***

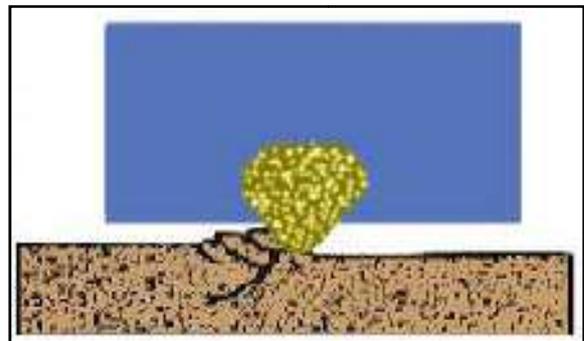
Ils travaillent à la façon de l'outil d'une machine en cisillant la roche. La mise en action de l'élément de coupe nécessite en premier un effort d'écrasement entraînant la pénétration dans la formation.

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

Dans les formations tendres, c'est le mécanisme qui demande le moins d'énergie pour détruire la roche, mais qui produit le plus de couples. Des vitesses d'avancement élevées sont obtenues avec des poids sur l'outil beaucoup plus faibles qu'avec les autres types d'outils. <sup>6</sup>



**Figure III.12. Action d'un outil à diamant naturel**



**Figure III.13. Action d'un PDC**

#### **III.3.3.3. TSP**

L'action du TSP dépend de l'orientation et de la hauteur d'exposition du taillant. Il combine le mécanisme de destruction des PDC et des diamants naturels. Lorsque l'outil est conçu pour forer des formations tendres, le TSP cisaille la roche. Dans les formations dures, il laboure la roche de la même manière que le diamant naturel.

Quel que 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.

#### **V.3.4. Efforts appliqués sur le cutter**

- La force de coupe  $F_c$  (force horizontale) ;
- La force normale  $F_n$  (poids sur l'outil) ;
- La force latérale  $F_L$ .

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

Les efforts latéraux de chaque pastille sont équilibrés entre eux de sorte que l'effort latéral est nul. <sup>6</sup>

### V.3.5. Désignation d'un outil PDC

On désigne un outil par :

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

## III.4. 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, temps 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.

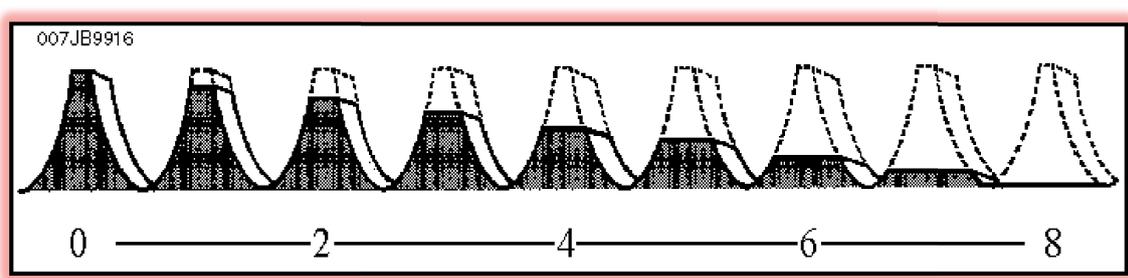
Elle sera grandement facilitée en comparant l'outil à évaluer avec un outil neuf.

L'ancienne façon de rendre compte de l'usure de l'outil ne considérait que l'usure globale des éléments de coupe, l'état des roulements et le diamètre de l'outil. La façon actuellement utilisée introduite en 1987 est plus complète. Elle s'applique aussi bien aux outils à molettes (dents et picots) qu'aux outils diamants (naturels, PDC, TSP).

✓ **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. [3]



**Figure III.14. Codification de l'usure des dents**

Pour les outils diamant, le chiffre indique la perte de hauteur du taillant (0 = le taillant n'a pas perdu de hauteur, 8 = perte totale de la hauteur disponible de taille).

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

- ✓ **Deuxième colonne** (rangées extérieures) indique, également par un chiffre de 0 à 8, l'usure des éléments de coupe des rangées extérieures (soient les 1/3 extérieurs des éléments de coupe).
- ✓ **Troisième colonne** (caractéristique de l'usure) utilise un code à 2 lettres pour indiquer la caractéristique principale de l'usure des structures de coupe.
- ✓ **Quatrième colonne** (localisation) utilise une lettre ou un chiffre pour indiquer l'emplacement de l'usure reportée dans la 3e colonne.

**Tableau III.1. Quatrième colonne d'usure**

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

✓ **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 utilisée est 0 (roulements neufs), 8 indique que le % de durée de vie utilisée 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.).

✓ **Sixième colonne** (calibrage en 1/16 de pouce)

Indique la perte de diamètre : 1 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. [3]

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 3e 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 deux.

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

- ✓ **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. Elle utilise les mêmes codes que la colonne 3
- ✓ **Huitième colonne** (raison de la remontée) indique la cause de la remontée de l'outil. <sup>3</sup>

***Chapitre IV : Influence des  
différents paramètres sur  
le ROP***

## IV.1. Introduction

Le choix des paramètres de forage non judicieux, ou plus simplement non précis entraîne une augmentation du coût de forage, qui en absolu, représente un prix important. C'est donc dans le but de réduire les dépenses correspondantes qu'on cherche à faire un choix optimal des paramètres, que cette étude a été entreprise.

Cependant pour parvenir à cette fin, il est nécessaire de réaliser une étape intermédiaire, qui consiste à modéliser, ce qui permet en second lieu de simuler, les lois régissant le forage et les paramètres définissant la nature du terrain traverse.

Si cette identification correspond à une image relativement exacte du processus réel, on peut alors étudier théoriquement les Paramètres les mieux adaptés à la conduite de forage.

Les paramètres de forage sont très nombreux puisque ce sont tous les facteurs qui influent sur la vitesse d'approfondissement du forage. Citons en quelques un :

- *La nature de la roche*, sa forabilité, sa tendance à dévier, son abrasivité.
- *Le type d'outil* utilisé pour détruire les roches.
- *Le poids* (WOB : Weight on bit) et *la vitesse de rotation* (RPM : Rotation per minute) de l'outil.
- *Les caractéristiques du fluide de forage* utilisé pour le nettoyage du front de taille ...

Tous les paramètres de forage ne sont pas forcément connus ou à fortiori choisis, comme, par exemple, la nature de la roche. Néanmoins, plus on aura d'éléments pour définir les meilleurs paramètres, plus on aura de chance d'utiliser l'appareil de forage avec le maximum d'efficacité.

En fait, on a coutume d'appeler paramètres de forage les facteurs dont on est maître en permanence. On peut les regrouper en deux catégories :

- **Les paramètres mécaniques** : le type d'outil, le poids (WOB) et la vitesse de rotation (RPM).

- **Les paramètres hydrauliques** : l'énergie hydraulique au niveau de l'outil, la nature du fluide de forage.

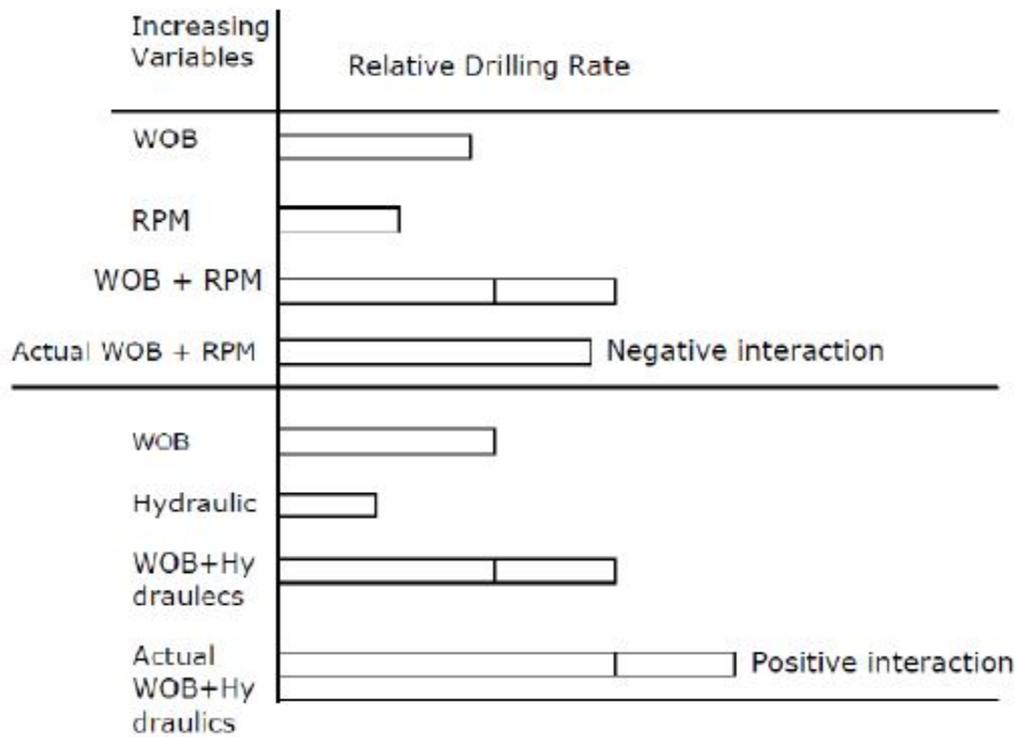
Les modèles de ROP essaient généralement d'exprimer les effets des variables contrôlables sur ROP pour un type spécifique de formation parce qu'ils peuvent être changés et optimisés pour réduire le coût de forage, ces variables incluent: la vitesse de rotation, le WOB, le type de l'outil, l'hydraulique de l'outil et l'usure des dents de l'outil.

Les propriétés de la formation ont un effet sur la façon dont le ROP répond au changement des paramètres de forage, par exemple dans des formations perméables l'effet de la pression d'overbalance est réduit par la filtration du fluide de forage dans la zone proche du puits sous le fond du trou qui égalisera la pression entre le puits et la formation, tandis que dans des formations moins perméables la ROP sera plus affectée et tendra à diminuer avec l'augmentation de la pression hydrostatique.

La minéralogie de la formation peut également affecter l'effet des paramètres mécaniques sur la ROP qui répond positivement à une augmentation de WOB et/ou de vitesse de rotation, mais dans quelques formations argileuses l'effet de l'augmentation de WOB sera masqué par un mauvais nettoyage du trou ou par le bourrage de l'outil parce que ces formations ont été hydratées par l'eau.

Les propriétés de la formation comme la résistance à la compression, la densité, la perméabilité, la porosité et la minéralogie auront une influence sur la ROP et dicteront les variables de forage qui devraient être appliquées pour forer une formation spécifique telle que le WOB, la vitesse de rotation, le type et les propriétés de l'outil et les propriétés de la boue.

En outre il y a une interdépendance entre les variables de forage contrôlables qui signifie que le changement d'une variable peut rendre nécessaire le changement des autres, cette interdépendance s'appelle l'interaction entre les variables, elle existe quand l'augmentation de deux variables de forage ne produit pas le même effet sur la ROP si comparée à la somme des effets individuels de chaque variable, la **figure IV.1** donne un exemple pour expliquer l'effet de l'interaction entre les variables.<sup>5</sup>



**Figure IV.1. Exemple des interactions positives et négatives**

L'interaction entre les variables peut être négative ou positive, le **tableau IV.1** illustre les interactions ordinaires entre quelques variables de forage pour donné une idée.<sup>7</sup>

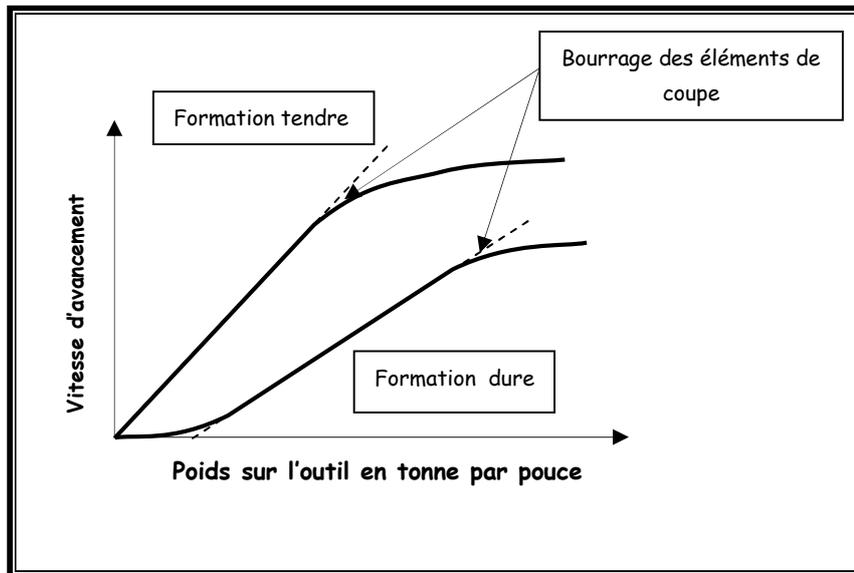
**Tableau IV.1. Interactions typiques entre les variables**

Variable Combination	Interaction
WOB-RPM	Negative
WOB-Hydrolics	Positive
RPM-Hydrolicx	Non
Low solids-Hydrolics	Positive
Low solids-WOB	Positive
Bit type-Formation	Either
Low solids-Bit type	Positive
RPM-Formation	Negative

## IV.2. Influence de paramètre mécanique sur le ROP

### IV.2.1. Effet de WOB sur le ROP

La **figure IV.2** montre pour un débit (Q) et de RPM constant la variation de la vitesse d'avancement en fonction du poids appliqué sur l'outil et de la dureté de la formation.



**Figure IV.2. Influence du WOB sur le ROP**

On constate sur la figure que :

- Dans une certaine gamme de WOB, l'augmentation du ROP est proportionnelle à l'augmentation de WOB. À partir d'une certaine valeur du WOB, l'augmentation du ROP diminue rapidement et devient quasiment nulle.

La raison de cette très faible variation du ROP lorsque le WOB devient important peut être due au fait que :

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

- Les éléments de coupe pénètrent complètement dans la formation (roche plus lit de déplaïs) : il se produit un bourrage des éléments de coupe (ce n'est pas pour cela que l'outil est bourré).
- Suivant la dureté de la formation, l'allure de la courbe varie lorsque le WOB appliqué est faible :
  - Dans un terrain tendre, l'outil avance dès que l'on applique du WOB (si la formation est suffisamment tendre et/ou peu l'on applique du WOB sur l'outil).
  - Dans un terrain dur, il faut appliquer un certain WOB pour que l'outil avance.
- L'augmentation de WOB 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 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.

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

En règle générale, ne pas dépasser 500 kg de poids sur l'outil par taillant PDC de ½" (13 mm) actif (c'est à dire participant activement à la destruction de la roche, ne pas compter les taillants de grande servant à maintenir le diamètre) ; ceci fait grosso modo 12 tonnes sur un outil 6" comportant 9 lames et 25 PDC actifs de 13mm. <sup>5</sup>

#### **IV.2.2.Effet de la rotation (RPM) sur le ROP**

La **figure IV.3** montre, pour un débit et un WOB donnés, la variation du ROP en fonction de RPM.

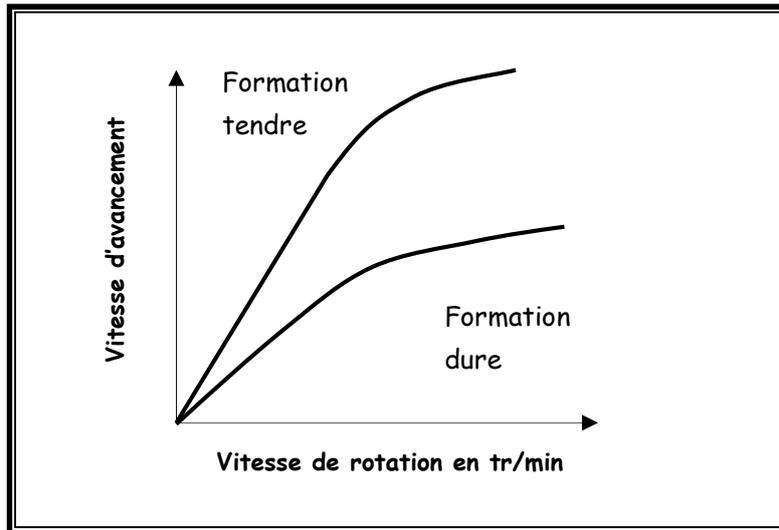


Figure IV.3. Influence du RPM sur le ROP

On constate sur cette figure que :

- Dans une certaine gamme de RPM, l'augmentation du ROP est proportionnelle à l'augmentation du RPM.
- À partir d'une certaine valeur du RPM, l'augmentation du ROP diminue fortement devient quasiment nulle. La raison de cette faible augmentation du ROP lorsque le RPM devient relativement important est due au fait que le temps entre les impacts des éléments de coupe sur la roche et 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 du RPM produit une diminution de couple à l'outil) et pour évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille.
- Contrairement au WOB, il n'existe pas de seuil de vitesse pour les formations dures, l'outil avancer dès qu'il commencer à tourner.
- L'augmentation du RPM a beaucoup plus d'effet sur les formations tendres que les formations dures (pente de variation du ROP plus élevée pour les formations tendres que pour les formations dures).

Le RPM joue sur la durée de vie de l'outil (usure des roulements) et sur la trajectoire de puits. Les paramètres WOB et RPM à appliquer sur un outil varient suivant le type de l'outil. Les fabricants indiquent pour chaque type la plage de WOB et RPM que l'on peut appliquer (il est recommandé de rester à l'intérieur de ces

plages pour ne pas dépasser les capacités des roulements et des structures de coupe).

Pour les outils à diamant naturel, le poids est un paramètre important. Par contre pour les outils PDC, la vitesse de rotation est le paramètre le plus important, c'est pour cela qu'il est important de ne pas appliquer tout de suite des poids trop importants quand l'outil est encore neuf et donc très agressif et fragile. <sup>5</sup>

### IV.2.3. Influence des propriétés de la Formation sur le ROP

Les caractéristiques des formations à forer sont très importantes et auront un grand effet sur la ROP résultant et affecteront le choix des autres variables comme le type de l'outil et les paramètres mécaniques (WOB et RPM).

La résistance de la roche qui dépend de sa composition et la profondeur d'enfouissement ou la compaction de la formation est généralement caractérisée par la résistance à la compression confinée (CCS), quand le CCS de la roche augmente, l'usure de l'outil augmentera et la ROP diminue (**figure IV.4**), le type de la roche i.e. schiste ou grès et la granulométrie des particules définiront l'abrasivité de la roche qui affecte considérablement l'usure des dents de l'outil.

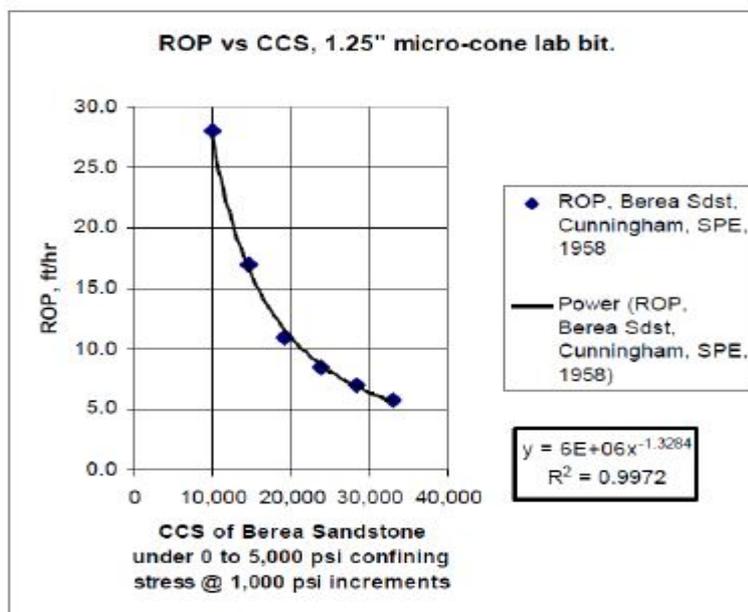


Figure IV.4. Effet de la résistance sur le ROP

La pression de pore de la formation a également un grand effet sur la ROP, quand la pression de pore augmente et équilibre la pression hydrostatique appliquée par la colonne de boue, elles diminueront les efforts appliqués sur le fond du trou et

mènent à une augmentation de ROP, généralement une augmentation brusque de ROP, ou ce qui s'appelle 'drilling break', est employée comme un signe qu'une zone à haute pression a été pénétrée. La perméabilité de la roche peut réduire l'effet de la différence de pression sur la ROP (**figure IV.5**) par la filtration de la boue dans la zone près du puits et égalisation des pressions entre le puits et la formation.<sup>5</sup>

En ce qui concerne l'influence des formations sur les autres paramètres mécaniques utilisent :

- **Roches abrasives** : privilégier le poids et réduire le ROP (augmentation de la profondeur de coupe diminuer le nombre de révolutions par mètre et diminuer d'autant le trajet total que les taillants auront à faire dans la roche abrasive).
- **Roches compactes** : et/ou plastique : garder un poids suffisant, mais augmenter le ROP (zone de proportionnalité) ; dans les roches non abrasives (carbonates, argiles, évaporites), la vitesse n'endommage pas notamment la structure de coupe, mais influence très favorablement les coûts de forage

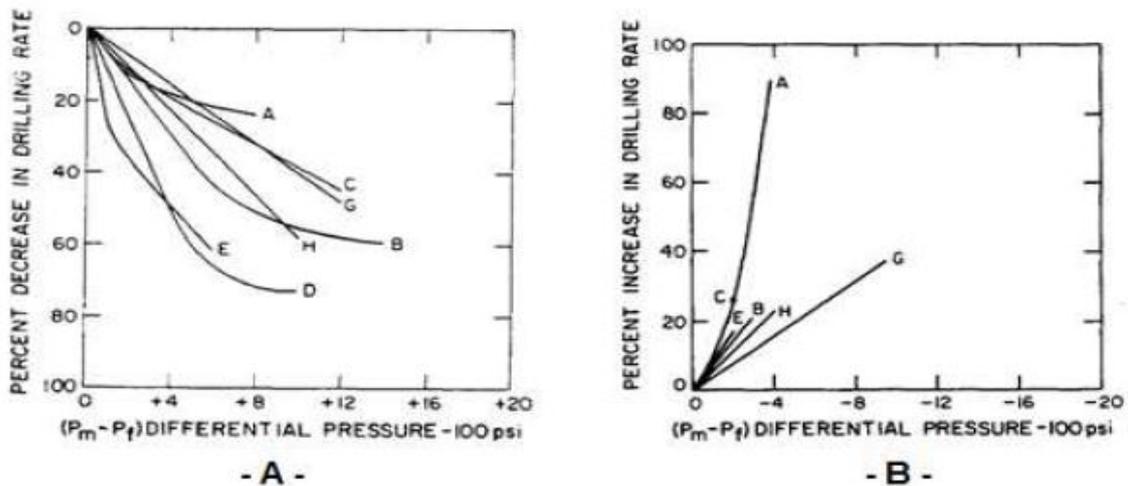


Figure IV.5. Effet de la pression différentielle sur le ROP

#### IV.2.4. Effet du type d'outil sur le ROP

La sélection du type d'outil pour forer une formation ou une section est extrêmement importante afin d'obtenir une bonne valeur de ROP. La vitesse à laquelle l'outil pénètre dans la formation dépend des paramètres de forage et de la longueur des dents; de longues dents pénètrent dans la formation et produisent plus de

déblais chaque fois que les cônes tournent, le meilleur exemple de cela est l'utilisation d'un outil tricônes avec des dents longues et largement espacées pour forer la section de surface où les formations sont généralement friables.

Comme la dureté de la formation augmente, les dents longues peuvent être cassées facilement et l'outil sera rapidement usé, donc pour les formations dures les dents deviennent plus courtes et étroitement arrangées et l'outil nécessite plus de poids pour être divisé par le grand nombre des dents. L'autre caractéristique importante des outils à molettes est l'angle de décalage des cônes de l'axe de l'outil qui est généralement important pour les formations tendres pour augmenter l'action de creusage de l'outil et moins important pour les formations dures. Les outils à structure de coupe fixe n'utilisent pas des parties tournantes; ils intègrent un certain nombre des dents fixé sur des lames pour couper la formation par cisaillement lorsque l'outil tourne.

Ces outils sont soit des outils à diamant ou des outils PDC, ces derniers ont un certain nombre des dents cylindrique composé d'un substrat de carbure de tungstène et une couche de diamant polycristallin compact.

Le ROP atteint par un outil PDC dépende de la taille et le nombre des dents et de l'angle à laquelle ils attaquent la formation (Back Rake angle); les outils avec un angle d'attaque élevée peuvent résister plus à l'usure et aux chocs et sont conçus pour forer les formations dures, tandis que les outils plus agressifs avec un angle d'attaque faible sont conçus pour forer plus rapidement, la **figure IV.6** montre l'effet des différents paramètres de conception des outils PDC sur la ROP.

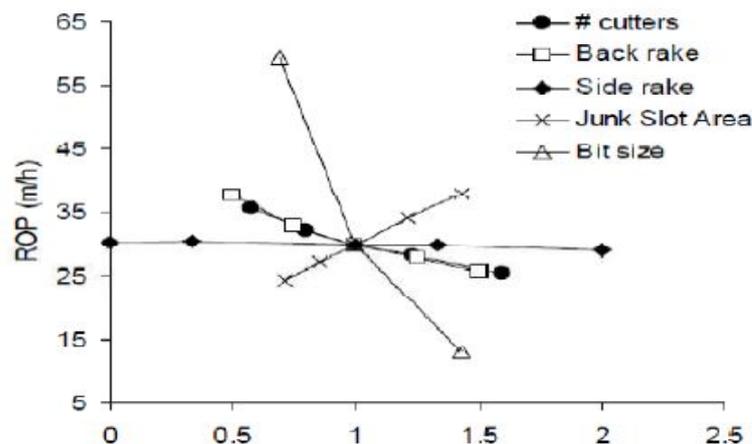


Figure IV.6. Effets normalisés des paramètres de conception des outils PDC

Les outils à diamant sont conçus pour forer par meulage les formations très dures et abrasives et ils produisent généralement des ROP très faibles qui ne dépassent pas 2 m/heure.

Les figures IV.7 et IV.8 récapitulent les effets des variables opérationnelles sur le ROP pour les outils à molettes et les outils PDC respectivement; elles montrent que pour les deux types d'outils l'augmentation du débit, du WOB, de RPM et de l'hydraulique de l'outil augmente la ROP tandis que l'augmentation de la densité et la viscosité plastique de boue et la taille des duses d'outil ont un effet négatif sur la ROP. <sup>5</sup>

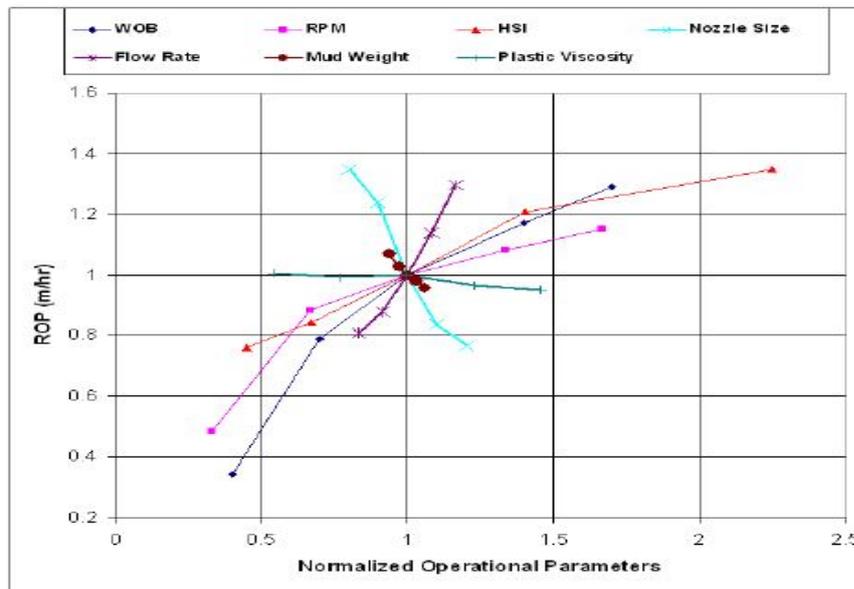


Figure IV.7. Effet normalisés des variables de forage sur ROP pour les outils

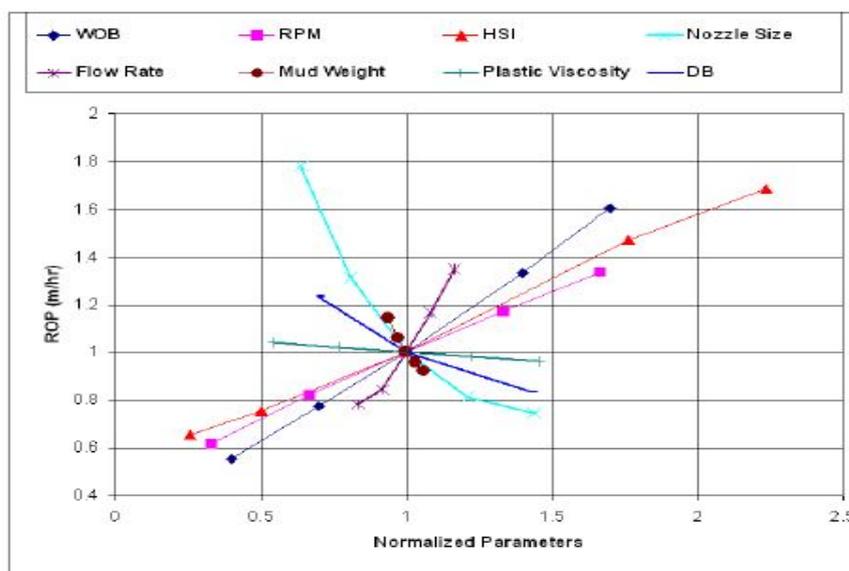


Figure IV.8. Effets normalisés des variables de forage sur ROP pour les outils

#### IV.2.5. Effet de l'usure des dents de l'outil sur le ROP

L'optimisation de forage a pour but de maximiser la ROP et réduire l'usure des dents de l'outil, comme l'outil perce plus rapidement il accélère l'usure de ses dents qui aura un effet négatif sur la ROP jusqu'à l'arrêt de l'outil quand ses dents sont complètement usées (**figure IV.9**), pour cette raison beaucoup de recherches ont été conduites pour développer une méthode pour prévoir l'usure de l'outil pendant le forage, le mécanisme d'usure change d'un type d'outil à l'autre, les outils tricônes à dents usinés usent par abrasion tandis que les tricônes à dents insérés ont un effet d'auto affilage qui maintiendra la forme conique des dents même si la longueur des dents est réduite.

Les outils PDC forent avec la couche de PDC qui est fixée à la face de chaque coupeur, quand une partie de cette couche est cassée le carbure de tungstène au-dessous de lui sera usé rapidement et la limite pointue de la couche de PDC cisailera toujours la formation, ceci est également considéré comme un effet d'auto affilage et c'est la raison pour laquelle la réduction dans la ROP due à l'usure pour les outils PDC et tricônes à dents insérés n'est pas aussi significative que pour les tricônes à dents usinés. <sup>5</sup>

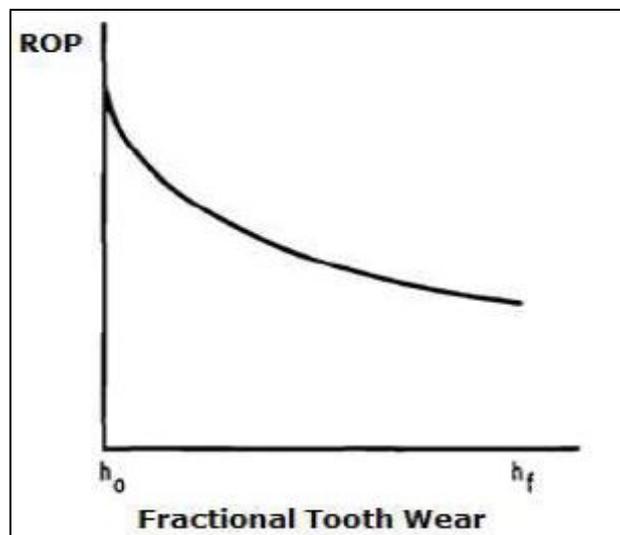


Figure IV.9. Effet de l'usure des dents de l'outil sur ROP

### IV.3. Influence de paramètre hydraulique sur le ROP

#### IV.3.1. Effet du nettoyage du front de taille sur le ROP

La vitesse de boue à la sortie de l'outil doit être suffisante pour évacuer rapidement les déblais du front de taille et pour nettoyer les éléments de coupe de l'outil (si l'évacuation des déblais du front de taille n'est pas rapide, il se forme un lit de déblais réduisant les performances de l'outil et risquant de boucher les éléments de coupe).

Mais si la vitesse est trop élevée, il y a risque d'érosion de l'outil entraînant la perte des éléments de coupe et réduisant sa durée de vie.

Suivant le passage de la boue à l'outil, on distingue deux types d'outils :

- **L'outil conventionnel** : l'outil à molettes classique appelé conventionnel comporte un passage de fluide dans l'axe de l'outil. Le jet de boue est dirigé sur les molettes.

Avec ce système, la vitesse de la boue à la sortie de l'outil ne peut pas être très élevée, car elle produirait une érosion des cônes. Elle est de l'ordre de 30 à 50 m/s, ce qui est insuffisant pour nettoyer efficacement le front de taille et les performances de l'outil sont faibles.

Ce système utilisé sur les premiers tricônes est pratiquement totalement abandonné. Il n'est plus guère utilisé que sur les outils de grand diamètre et sur les outils bon marché destinés aux formations tendres et peu profondes.

- **L'outil à duses (jet bit)** : les événements de l'outil conventionnel ont été remplacés sur le côté de l'outil, une entre chaque molette. Le jet de boue est dirigé directement sur le front de trou. Lorsque la vitesse du jet de boue est suffisante, les déblais sont évacués efficacement de front de taille (les déblais de forage obtenus avec les outils à duses sont de dimensions plus grandes que ceux obtenus avec les outils conventionnels). L'utilisation de duses interchangeables a permis d'augmenter les performances des outils à molettes.

Dans les formations tendres, l'impact de la boue sur le front de taille participe pour une grande part à la destruction de la roche (forage par jetting).

Les duses sont faites en carbure de tungstène pour réduire l'érosion. Leur mode de fixation varié suivant les fabricants (le clip est le système le plus couramment utilisé). Le diamètre est exprimé en 32<sup>e</sup> de pouce.

Une vitesse à la sortie des duses comprise entre 80 à 150 m/s permet de nettoyer correctement le front de taille. Une vitesse supérieure à 150 m/s risque de produire une érosion de l'outil. Le diamètre des duses sera choisi en fonction du débit de circulation utilisé pour nettoyer le trou et de la vitesse que l'on veut avoir à la sortie de l'outil.

On constate que plus la duse est près du front de taille, le nettoyage est efficace. Les fabricants proposent des outils avec des duses rallongées (extended nozzles). Avec des duses inclinées, avec une quatrième duse au centre de l'outil. Toutes ces adaptations ont pour but d'améliorer le nettoyage du front de trou, d'éviter le bourrage de l'outil et donc d'accroître le ROP (jusqu'à 30 % d'augmentation du ROP dans certaines formations).

Le gain en performance obtenu avec ces différentes adaptations peut ne pas être rentable dans certains types de formations à cause du coût supplémentaire de l'outil.<sup>7</sup>

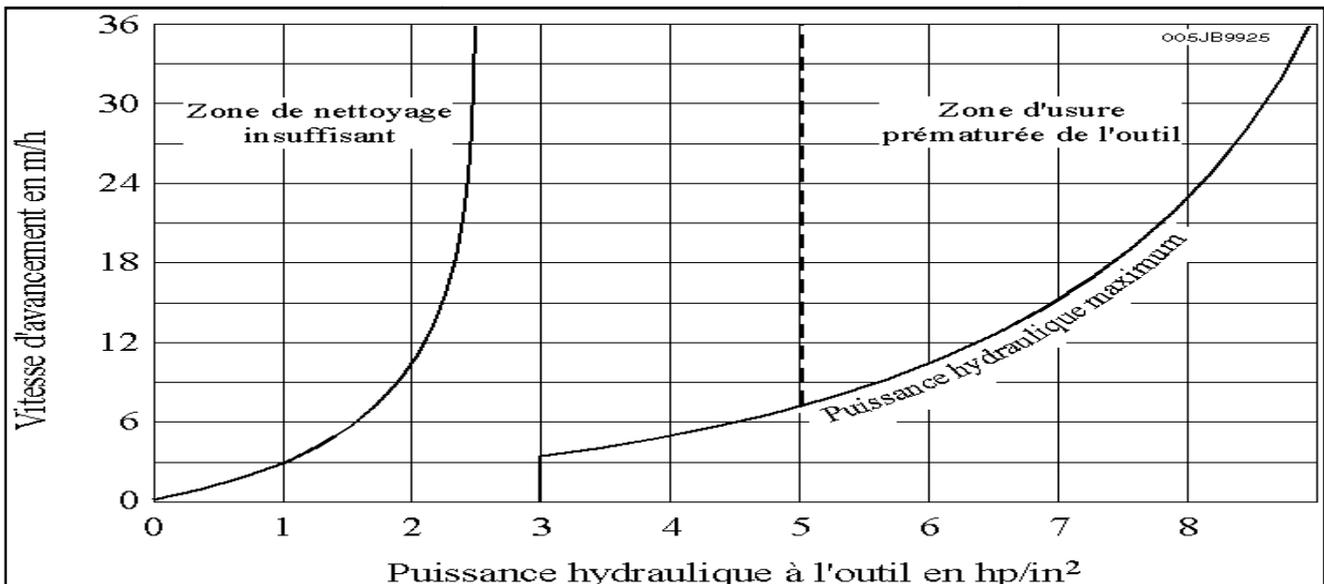
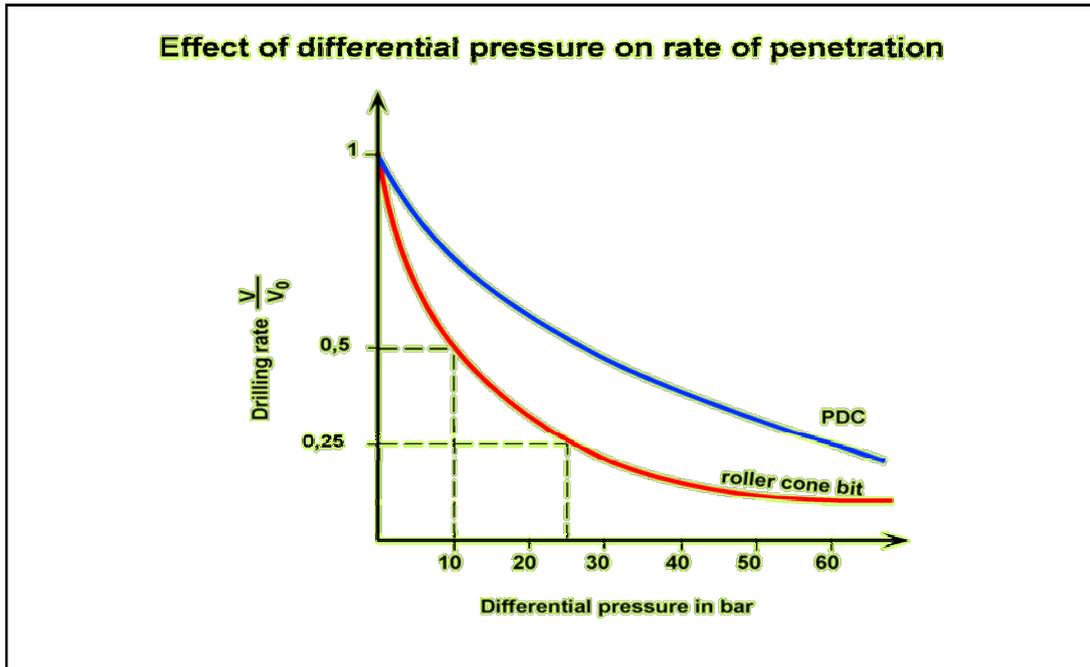


Figure IV.10. Effet du nettoyage du front de taille sur ROP

### IV.3.2. Effets des caractéristiques de la boue sur le ROP <sup>7</sup>

#### ➤ Densité

La **figure IV.11** montre l'effet de la pression différentielle (différence entre la pression exercée par le fluide de forage dans le puits à un niveau donné et la pression de pore dans la formation au même niveau) sur le ROP.



**Figure IV.11. Effet de la densité sur ROP**

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

Les meilleurs ROPs sont obtenus en forant avec une boue de densité la plus faible possible.

#### ➤ Filtration

Dans le cas d'une formation poreuse et perméable, les éléments solides de la boue se déposent sur la paroi du puits et forment le cake tandis que le filtrat (phase

liquide de la boue) pénètre dans la formation. La filtration s'arrête lorsque le cake est étanche.

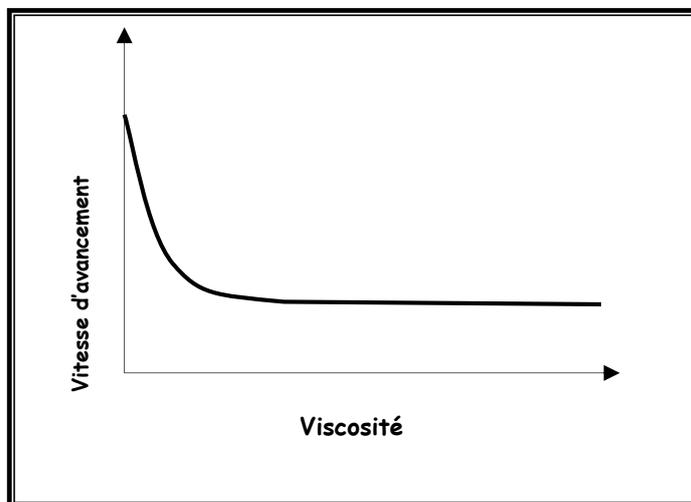
Sur le front de taille, la progression de l'outil ne permet pas la formation de cake.

Dans une formation perméable, la filtration tend à équilibrer la pression entre le puits et la formation sous le front de taille. La filtration facilite donc le décollement des déblais et leur évacuation.

Dans les formations non perméables, l'augmentation du filtrat jusqu'à une valeur API d'environ 10 produit une augmentation du ROP. Au-delà de cette valeur, le ROP ne varie plus.

Dans le cas de formations réactives (argiles, gonflantes, etc.), l'effet de la filtration peut devenir rapidement un inconvénient entraînant le bourrage de l'outil.

#### ➤ Viscosité



**Figure IV.12. Effet de la viscosité sur le ROP**

La viscosité agit sur la mobilité des déblais. Avec une viscosité élevée, les déblais ont tendance à rester collés sur l'outil, les meilleures ROP seront obtenues avec un fluide ayant la plus faible viscosité à la sortie des duses de l'outil.

#### ➤ Teneur en solide

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

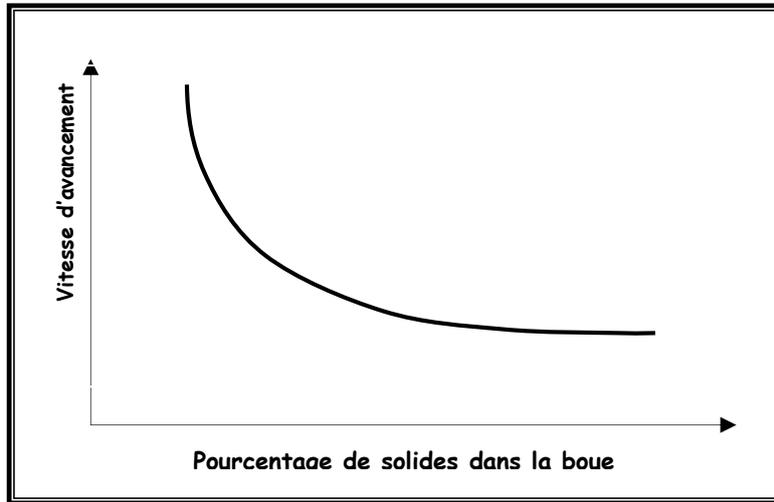


Figure IV.13. Effet de Teneur en solide sur le ROP

➤ **Nature de la boue**

À l'exception des formations facilement réactives à la boue à base d'eau et devenant collantes (argiles gonflantes), la boue à l'huile a un effet plutôt négatif sur les performances des outils à molettes à cause de son action lubrifiante qui retarde la pénétration des dents dans la roche.

Dans les formations réactives, l'huile mouille les déblais, les réactions entre le fluide et les déblais sont limitées, le nettoyage des éléments de coupe et de la taille se trouve amélioré.

D'une façon générale, la boue à l'huile réduit la filtration et limite l'avancement en milieu perméable.

# ***Chapitre V : Interaction roche-outil***

## V.1. Introduction

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

Donc à partir de tout cela on peut dire que l'étude de l'interaction qui provient entre l'outil de forage et la roche qu'il détruit est un facteur primordial afin d'obtenir un meilleur modèle qui caractérise le ROP et ainsi pouvoir faire une meilleure optimisation de notre ROP

## V.2. Caractéristiques mécaniques des roches

### V.2.1. Dureté

La notion de dureté d'une roche, sur un chantier de forage, traduit en fait pour l'opérateur la résistance que celle-ci offre à l'avancement de l'outil et ceci de façon tout à fait empirique. <sup>4</sup>

#### a) Dureté de MOHS

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

La dureté suivant MOHS traduit une résistance de la roche à la pénétration, par rayage. Il est rare qu'un outil réel détruise la roche uniquement par rayage ( sauf parfois avec l'emploi d'outils diamant). Il est rare également qu'une roche soit pratiquement composée d'un seul minéral, et la notion de rayage devient beaucoup plus compliquée dans le cas des roches constituées de plusieurs minéraux de dureté différente. La dureté d'une roche selon MOHS ne peut pas donc traduire la résistance à la pénétration d'un outil, par contre la dureté MOHS d'un minéral de roche a une influence directe sur l'effet abrasif de la roche sur l'outil. [4]

## b) Résistance à la pénétration statique

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

On matérialise la pénétration du poinçon par la réalisation d'une empreinte, dont les dimensions sont d'autant plus faibles d'où la résistance est plus grande.

Cette méthode n'est pas applicable aux roches : en effet dans le cas de celle-ci on n'obtient pas d'empreintes qui reproduisent la forme de poinçon : les empreintes ont une forme irrégulière, les bords en sont ébréchés et il n'est pas, en général, possible d'effectuer une mesure et ceci parce que les roches ne sont jamais parfaitement plastiques.

Par contre, lorsqu'on présente sur une roche un poinçon que l'on charge à sa partie supérieure lentement avec des poids croissants (**figure V.1**), on remarque que le poinçon, à partir de sa mise en contact avec la roche ; s'enfonce d'abord imperceptiblement, puis au-delà d'un certain seuil de la roche, d'une façon beaucoup plus importante lorsque la roche croit, et à peu près proportionnellement à celle-ci ; si l'on continue à accroître la charge, l'accroissement de la pénétration ralentit et la profondeur de pénétration reste à peu près invariable, quelle que soit la charge que l'on continue à exercer.

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

L'expérience montre que pour une roche déterminée et des poinçons différents la charge critique à la pénétration de charge aux accroissements de pénétration, à partir du seuil de résistance critique à la pénétration ; la rigidité d'un couple poinçon- roche traduit la loi de pénétration du poinçon dans la roche à partir de la charge critique. Plus elle est faible et plus la pénétration du poinçon sera importante pour une charge donnée.

Si l'on considère en première analyse qu'un outil est assimilable à un ensemble de poinçons solidaires entre eux, on conçoit que les notions de résistance critique à la pénétration et de rigidité d'un poinçon au contact d'une roche puissent être étendues aux outils eux-mêmes. La dureté d'une roche, considérée comme résistance à la pénétration statique d'un poinçon, est donc très intéressante en tant que propriété liée aux conditions de destruction de ce matériau par forage.<sup>4</sup>

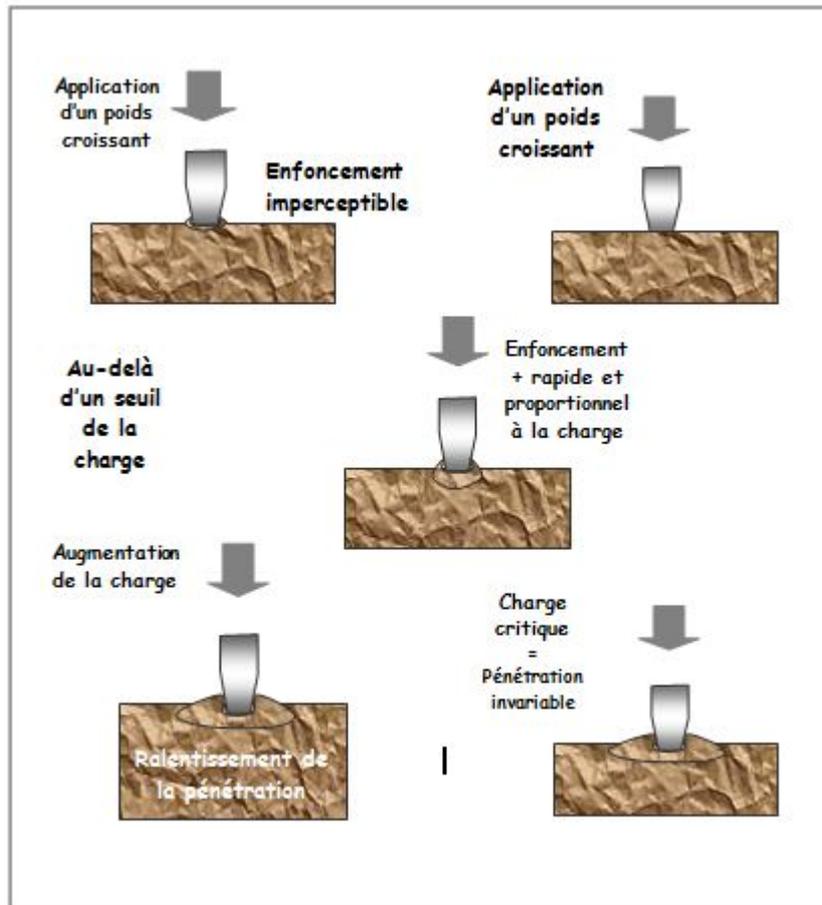


Figure V.1. Résistance à la pénétration

### c) Résistance à la pénétration dynamique

Dans la définition précédente de la résistance de la roche à la pénétration statique du poinçon, on a supposé que la charge était appliquée lentement et progressivement de la valeur zéro à la valeur finale "P" supérieur à la résistance critique. Si on suppose maintenant que la charge  $p$  est appliquée instantanément au poinçon en contact avec la roche, jusqu'à une certaine profondeur.

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

Comme l'outil, assimilé à un ensemble de poinçons, se déplace de façon contenue au fond du trou, de telle sorte qu'en chacune de ses positions son contact sous charge avec la roche ne se fait que pendant une durée finie, on peut penser à priori que la résistance à la pénétration de l'outil dans la roche est fonction de la vitesse de ses déplacements.<sup>4</sup>

#### **d) Résistance à l'écrasement**

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

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

Cependant il n'est pas possible de relier d'une façon formelle ces deux caractéristiques. La raison est essentiellement la suivante : le contact sous charge du poinçon avec la roche engendre au voisinage de la surface de contact de celle-ci un régime de contraintes tri-axiales, alors que l'essai d'écrasement d'éprouvettes

cylindriques ne fait intervenir que les contraintes uniaxiales. Du fait des différences qui existent entre les paramètres élastiques des différentes roches, il ne peut y avoir de relations formelles entre ces deux régimes de compression. <sup>4</sup>

### **V.2.2. Fragilité et plasticité**

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

#### **a) Roches dites plastiques**

Pour certaines roches – dites plastiques – la pénétration du poinçon, au fur et à mesure que la charge croît lentement, se fait de façon continue ; la destruction de la roche, sous le poinçon, se fait par écrasement ; lorsque la charge augmente, les particules écrasées peuvent être écartées latéralement, normalement à la pénétration du poinçon.

Le volume de roche détruite par l'enfoncement du poinçon n'excède pas sensiblement celui de la partie du poinçon qui a effectivement pénétré dans la roche.

Dans cette catégorie entrent aussi bien des roches tendres (c'est-à-dire qui offrent peu de résistances à la pénétration du poinçon), telles que des argiles ou des marnes, que des roches très dures telles que certaines dolomies.

#### **b) Roches dites fragiles**

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

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

Si la pénétration du poinçon au lieu d'être produite par une charge statique est provoquée par un choc, le volume de matériau détruit, dans le cas des roches fragiles, peut être considérablement accru ; la dimension des éclats augmente avec l'énergie de choc (**figure V.2**). Au contraire, dans le cas de roches plastiques les conditions de pénétration par choc ne diffèrent pas des conditions de pénétration statique.

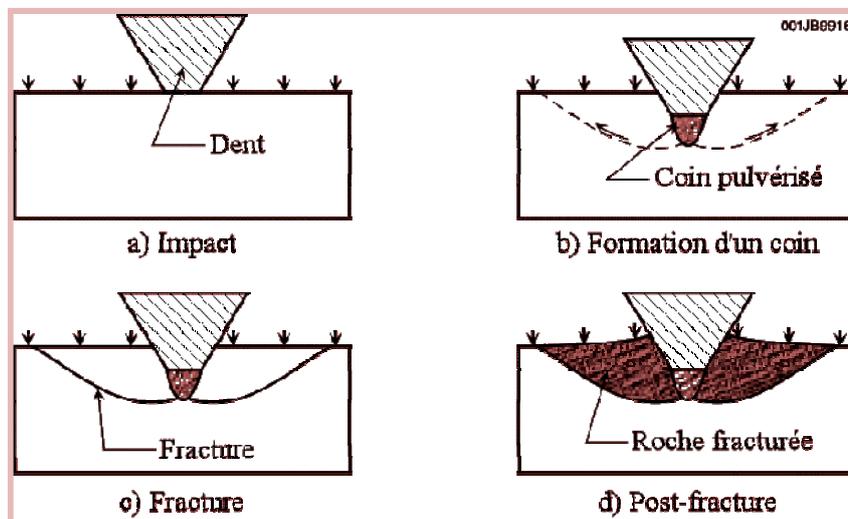


Figure V.2. Roche fragile

### V.2.3. Abrasivité

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

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

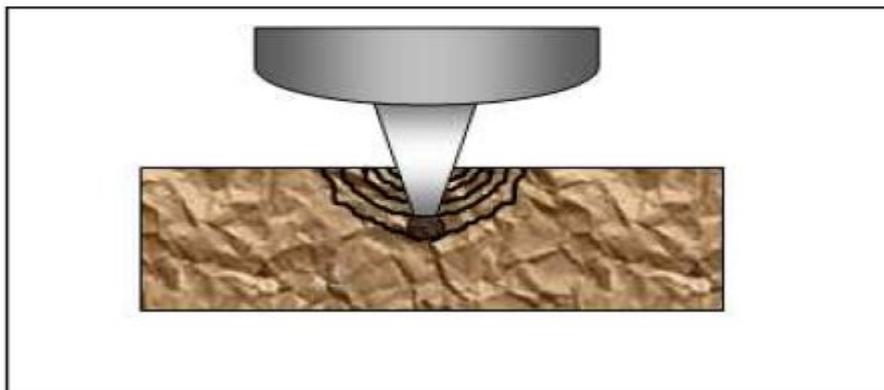
L'usure par frottement dépend de la valeur du coefficient de frottement de la roche au contact de l'outil.

Dureté, c'est-à-dire résistance à la pénétration, fragilité, abrasivité constituent les propriétés essentielles qui caractérisent les roches en tant que matériaux à détruire par les outils. De nombreux autres caractéristiques interviennent en pratique, telles que la porosité, la perméabilité, la structure et l'orientation des différents plis constituant les formations, les contraintes in-situ que supportent les roches aux diverses profondeurs. Mais il s'agit là des caractéristiques liées plus à la technique qu'à celle de la conception et de la réalisation des outils eux-mêmes.<sup>4</sup>

### **V.3. Attaque de la roche par l'outil**

#### **V.3.1. Pénétration et écrasement**

La pénétration de l'outil dans la roche est une première condition de destruction volumétrique des éléments de roche ; l'analyse précédente a permis de déterminer les conditions nécessaires pour obtenir cette pénétration : il faut que la pression de contact des parties actives de l'outil avec la roche soit supérieure à un seuil, qui caractérise la roche ; la profondeur de pénétration de l'outil dans la roche augmentera avec la valeur de la charge ; pour une charge donnée, elle sera d'autant plus grande que la rigidité du couple roche-outil est plus faible.



**Figure V.3. Pénétration et écrasement de la roche**

Dans le forage rotary, la force qui permet la pénétration de l'outil est le poids d'une partie du train de tiges. Ce poids est nécessairement limité. Pour avoir une pénétration effective de l'outil, il est donc nécessaire que les surfaces de contact de

l'outil avec la roche soient elles-mêmes d'autant plus limitées que la résistance de la roche à la pénétration est plus grande.

Par ailleurs la charge qui s'exerce sur l'outil est, si on néglige les vibrations longitudinales du train de tiges, une charge continue. <sup>8</sup>

### V.3.2. Cisaillement

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

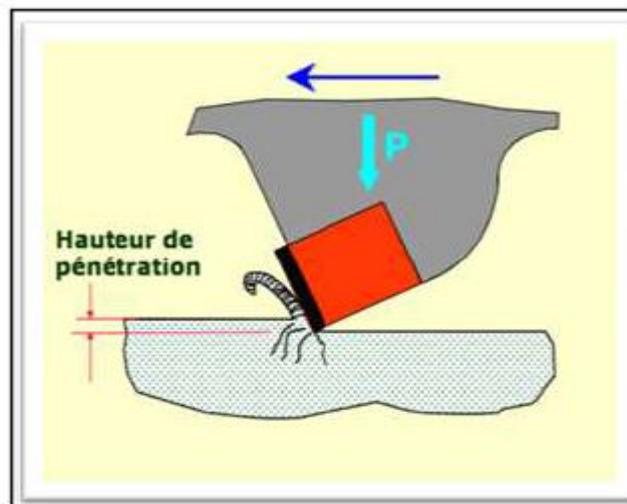


Figure V.4. Cisaillement de la roche par l'outil

### V.3.3. Percussion

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

la rotation autour de l'axe de forage ; elles doivent donc avoir un mouvement propre, générateur de percussion.

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

Lorsque l'outil appuyé sur le fond du trou par la charge verticale est entraîné dans le mouvement de rotation d'ensemble, les moletés roulent sur la roche et les dents viennent frapper celle-ci, l'écrasent, et en se dégageant font éclater des éléments. <sup>8</sup>

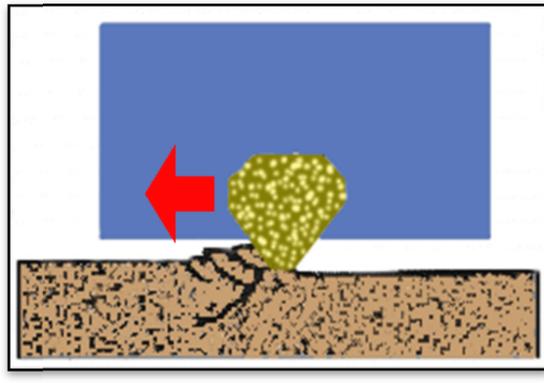


**Figure V.5. Percussion**

#### **V.3.4. Abrasion**

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

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



**Figure V.6. Abrasion**

### **V.3.5. Erosion**

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

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

## **V.4. Attaque de l'outil par la roche**

### **V.4.1. Réactions de la roche sur l'outil**

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

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

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

En particulier, les outils à molettes, qui comportent des roulements, auront à supporter des phénomènes de fatigue, qui interviennent dans le fonctionnement des palies à roulement du fait de la variation périodique des charges et des contraintes.

#### **V.4.2. Usures des parties actives de l'outil**

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

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

### **V.5. Optimisation des outils**

Pour obtenir un rendement optimal des outils de forage, il faut réunir un ensemble de facteurs qui favorisent au mieux les conditions d'attaque de la roche par l'outil et qui protègent au mieux l'outil de son attaque par la roche.

#### **V.5.1. Adaptation des outils aux formations**

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

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

#### **V.5.2. Protection des parties actives des outils**

Par construction, tous les outils de forage sont protégés sur leurs parties actives par des rechargements en métaux durs.

On utilise surtout à cet effet du carbure de tungstène ; dans l'échelle de MOHS, la dureté du carbure de tungstène vient immédiatement en dessous de celle du diamant, elle est pratiquement supérieure à la dureté de toutes les roches.

Les carbures de tungstène utilisés pour le rechargement des outils de forage sont soit fondus, soit frittés. Ces carbures se présentent soit sous forme de plaquettes ou bâtonnets, soit sous forme de pains obtenus par brisure de petites coulées. Ces plaquettes et grains sont disposés par soudure au chalumeau ou à l'arc après ou sans fraisage préalable d'alvéoles de formes appropriées.

On peut encore utiliser des tubes en acier doux, contenant des pains de dimensions convenables. L'acier du tube servant de liant au moment du dépôt est fait généralement aux chalumeaux.

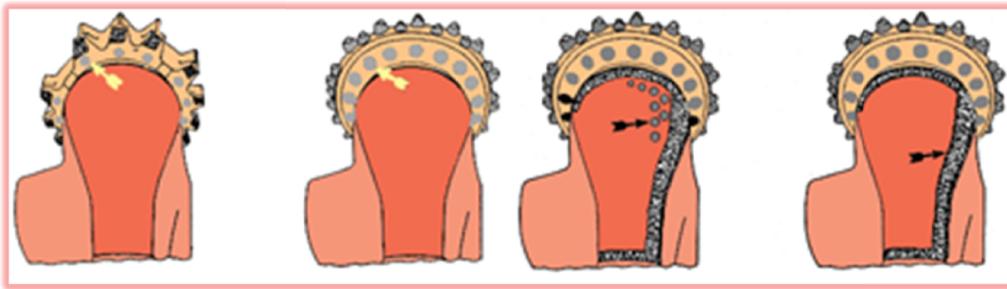


Figure V.7. Protection des parties actives des outils

### V.5.3. Adaptation des paramètres de forage aux outils et aux formations

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

La vie d'un outil dépend des paramètres de forage, au même titre que son avancement. <sup>12</sup>

***Chapitre VI : Modèle  
d'optimisation par énergie  
spécifique***

## VI.1. Introduction

Plusieurs méthodes ont été développées pour optimiser les paramètres de forage. Bien entendu, le détail de la plupart de ces méthodes reste confidentiel, car elles restent la propriété industrielle de la société qui a investi sur cette recherche.

Néanmoins, les éléments de base de chaque recherche sont publiés dans les revues internationales. Mais le problème majeur de l'ensemble des modèles développés par les scientifiques reste l'estimation très approximative voire erronée de la dureté de la roche et de son influence sur le ROP.

Donc pour remédier à ce problème un modèle basé sur l'énergie spécifique offre aujourd'hui une meilleure approche de la vitesse d'avancement et donc une meilleure estimation des paramètres adéquats à appliquer pour l'obtention d'un ROP optimum.

## VI.2. Etude bibliographique sur les modèles d'optimisation du ROP

### VI.2.1. Bourgoyne et Yong

Ont fait l'un des études d'optimisation de la vitesse d'avancement les plus importantes. Ils ont construit un modèle linéaire de la vitesse d'avancement et ils ont effectué une analyse régressive des données de forage afin de calculer le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, et l'hydraulique de l'outil optimale. Dans leur analyse ils ont inclus l'effet de la résistance de la formation, sa profondeur, sa compaction, la pression différentielle au fond, le diamètre de l'outil, le poids sur l'outil, la vitesse de rotation, l'usure de l'outil et son hydraulique. Ils ont trouvé que cette procédure d'analyse régressive peut être utilisée systématiquement pour évaluer plusieurs constantes dans l'équation de la vitesse d'avancement. Ils ont mentionné qu'on doit avoir les données de plusieurs puits pour l'évaluation des constantes par régression. Ils ont utilisé les données de 25 puits pour calculer les constantes  $a_1, a_2, \dots, a_8$ . Ils ont conclu que l'utilisation d'une équation d'optimisation relativement simple peut réduire les coûts de forage de 10%.

Et voilà l'équation de Bourgoyne et Yong :

$$ROP = \exp(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j * x_j) \dots \dots \dots Eq VI.1$$

### VI.2.2. Speer

A été le premier qui a proposé une méthode compréhensive en 1958 pour la détermination de la technique de forage optimale. Dans son étude des corrélations empiriques entre la vitesse d'avancement, le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et l'énergie hydraulique et la forabilité de la formation ont été démontré.

### VI.2.3. Graham et Muench

Ils sont parmi les premiers chercheurs qui ont conduit une évaluation des données de forage pour déterminé la combinaison du poids sur l'outil et de la vitesse d'avancement optimale.

Ils ont utilisé une méthode d'analyse mathématique du coût de forage. Des expressions mathématique empirique ont été établit pour la durée de vie de l'outil et la vitesse d'avancement en fonction de la profondeur, de la vitesse de rotation et du poids sur l'outil. Les relations mathématiques proposées contiennent des constantes représentatives de formations forées. Leur étude a abouti à la capacité de proposer un poids sur l'outil et une vitesse de rotation optimale à l'aide du calcule dans tous les conditions de forage afin de minimiser les coûts totale du forage.

### VI.2.4. Maurer

Il a élaboré l'équation de la vitesse d'avancement pour les outils à molettes en considérant le mécanisme de destruction de la roche. L'équation a été fondée sur la condition «nettoyage parfait» où tous les débris de roche sont considéré être enlevés des dents et transporter vers la surface. Une relation entre la vitesse d'avancement, le poids sur l'outil et la vitesse de rotation de la garniture a été obtenue. Cette relation a été fonction de la profondeur du forage aussi.

Et voila l'équation de la vitesse d'avancement :

$$\frac{dF}{dt} = \frac{4}{\pi * D_b^2} * \frac{dV}{dt} ) \dots \dots \dots Eq VI.2$$

Dont F est la distance foré par l'outil, t est le temps, V et le volume de roche enlevé, et D<sub>b</sub> est le diametre de l'outil.

### VI.2.5. Galle et Woods

Ils ont rapporté des graphes et des procédures pour l'application sur champs pour déterminer la meilleure combinaison du poids sur l'outil et la vitesse d'avancement.

L'équation donnée est limitée à une application du poids de 10 000 lbf / in de diamètre de l'outil.

Ils ont également publié une équation donnant la relation entre le taux d'usure des dents et la vitesse de rotation pour les outils à dents fraisées conçus pour formations tendres.

Dans leur graphe le coût de forage, la profondeur forée, le temps de forage et l'état des dents et des roulements de l'outil utilisé peuvent être déterminés. Le coût de forage peut être réduit en utilisant les combinaisons recommandées des paramètres de forage. Ils ont présenté l'équation de la vitesse d'avancement en fonction de WOB et RPM :

$$\frac{dF}{dt} = C_{fd} * \frac{\overline{W}^k * r}{a^p} ) \dots \dots \dots Eq VI.3$$

Où C<sub>fd</sub> est le paramètre de forabilité de la formation;

$$a = 0.028125 h^2 + 6h + 1) \dots \dots \dots Eq VI.4$$

K= 1 (pour tout les formations à l'exception de ceux les plus tendres).

K= 0.6 (pour les formations les plus tendres).

P= 0.5

$$r_{formation-dur} = \left[ e^{\frac{-100}{N^2}} * N^{0.428} + 0.2N * \left(1 - e^{\frac{-10}{N^2}}\right) \right] \dots \dots \dots Eq VI.5$$

$$r_{formation-tend} = \left[ e^{N^2} * N^{0.75} + 0.5N * \left(1 - e^{\frac{-100}{N^2}}\right) \right] \dots \dots \dots Eq VI.6$$

$$\bar{W} = \frac{7.88 WOB}{D_b} \dots \dots \dots Eq VI.7$$

### VI.2.6. Bingham

A proposé une équation de taux de pénétration basée sur des données de laboratoire. Dans sont équation le poids sur l'outil seuil a été supposé négligeable et la vitesse de pénétration est fonction du poids appliqué sur l'outil et la vitesse de rotation de la garniture. L'exposant du poids sur l'outil a5 est déterminé expérimentalement dans les conditions actuelles.

$$R = K \left( \frac{wob}{D_b} \right)^{a_5} N \dots \dots \dots Eq VI.8$$

### VI.3. Théorie d'optimisation par le model de l'énergie mécanique spécifique « MSE »

Les principes de la théorie d'énergie spécifique fournissent un moyen de prédire ou analyser la performance de l'outil de forage, elle est basée sur les principes fondamentaux en rapport avec la quantité d'énergie exigée pour détruire un volume de l'unité de la roche et l'efficacité d'un outil à détruire la roche.

En appliquant cette théorie on peut déterminer :

- L'énergie « WOB et RPM » exigée pour un tell type d'outil, pour forer avec une ROP donnée un type de roche donné.
- La ROP qu'un outil particulier peut réaliser dans un type de roche donné.

Cette théorie n'est pas nouvelle, elle a été utilisée comme un critère rapide de comparaison entre les outils, pendant de nombreuse années puis utilise afin d'optimise le ROP. <sup>1</sup>

Taele a donnée une équation pour calculer l'énergie spécifique dans le forage rotary, sous les conditions atmosphériques

$$Es = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * N * T}{ROP * A_B} \dots \dots \dots Eq VI. 9$$

avec :  $Es$  : l'énergie spécifique (psi) ;

$WOB$  : le poids sur l'outil (lbf) ;

$A_B$  : La section de puits 'l'outil' (in<sup>2</sup>) ;

$N$  : RPM ;

$T$  : Torque (ft-lbf) ;

$ROP$  : la vitesse d'avancement (ft/h).

En suite Pessier a validé l'**Eq VI.9** pour sous la pression hydrostatique, donc au fond du puits.

La théorie de l'énergie spécifique a introduit des coefficients spécifiques aux outils de forage quand va aborder dans les points qui suivent. <sup>1</sup>

### **VI.3.1. Coefficient de frottement « Coefficient of Sliding Friction $\mu$ »**

Le coefficient de frottement  $\mu$  a été introduit pour exprimer le Torque (T) tant que une fonction de poids sur l'outil (WOB), ce coefficient sera utilisé par la suite pour calculer les valeurs de l'énergie spécifique imposée dans les cas ou les mesures du Torque (T) sont fiables. Comme suite :

$$\mu = 36 \frac{T}{WOB * D_B} \dots \dots \dots Eq VI. 10$$

avec :  $T$  : Torque en ft-lbf ;

$WOB$  : le poids sur l'outil (lbf) ;

$D_B$  : diamètre de l'outil (in) ;

$\mu$  : Le coefficient de frottement (sans unité)

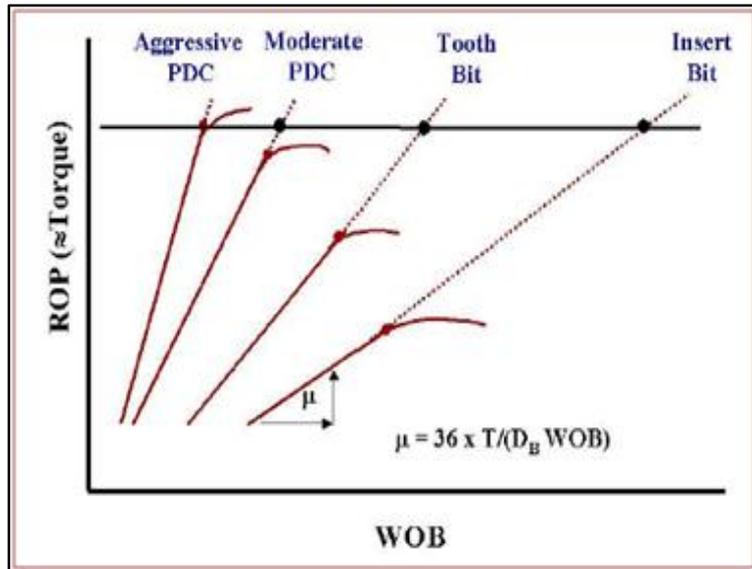


Figure VI.1. Variation de  $\mu$  selon le type de l'outil

### VI.3.2. Efficacité mécanique « the Mechanical Efficiency $E_{ff}$ »

Teale a introduit aussi la notion de l'énergie spécifique minimale  $E_{s\text{MIN}}$  et l'efficacité mécanique maximale  $E_{ff\text{MAX}}$ .

L'énergie spécifique minimale est approximativement égale à la résistance de compression de la roche (CCS) donc pour espère détruire la roche il faut applique une énergie supérieur a celle ci.

En ce qui concerne  $E_{ff\text{MAX}}$  on peut dire que c'est le rendement qui correspond à une efficacité optimum de l'outil

Pour calculer  $E_{ff\text{MAX}}$  on utilise cette formule :

$$E_{ff\text{max}} = 100 * \frac{E_{s\text{min}}}{E_s} \dots \dots \dots \text{Eq VI.11}$$

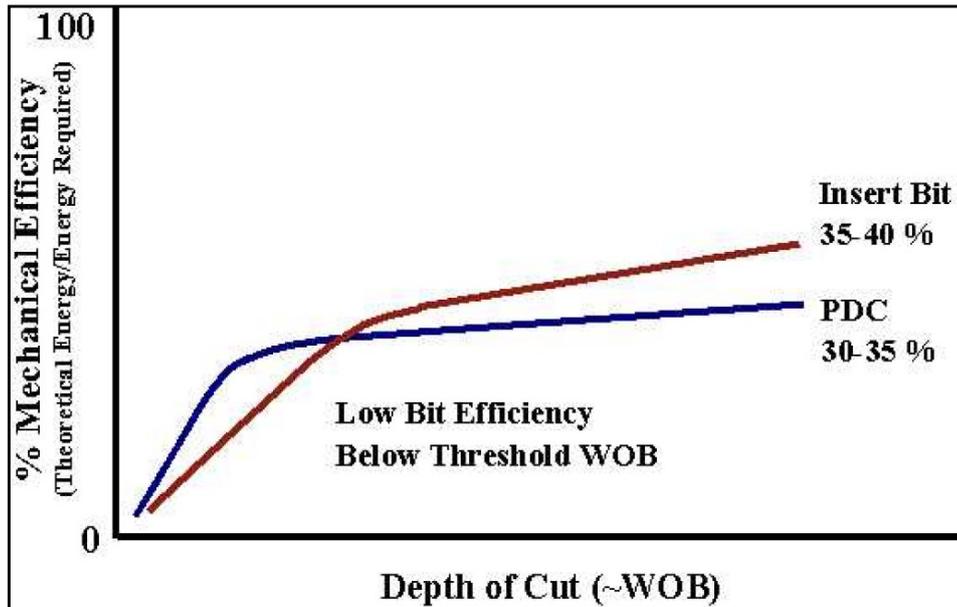


Figure VI.2. Variation d' $E_{ff}$  selon le type de l'outil

On peut dire que l'efficacité mécanique est un coefficient qui caractérise le type d'outil utilisé puisque on peut constater depuis le graphe (représenté dans la **figure VI.2**) que pour la même augmentation de WOB, l'augmentation de l'efficacité mécanique n'est pas la même pour deux différent type d'outil, ceci renforce le fait que le choix du type d'outil adéquat joue un rôle très important pour l'optimisation du ROP

Le Torque associe à l'outil forant une roche de CCS connu et avec un ROP précis donné par l'**Eq VI.12** :

$$T = \left( \frac{CCS}{EF_M} - \frac{4 * WOB}{\pi * D_B^2} \right) * \left( \frac{D_B^2 * ROP}{480 * N} \right) \dots \dots \dots Eq VI. 12$$

À partir de ces quatre équations on peut évaluer ROP comme suite :

$$ROP = \frac{13.33 * \mu * N}{D_B \left( \frac{CCS}{EFF_M * WOB} - \frac{1}{A_B} \right)} \dots \dots \dots Eq VI. 13$$

D'après cette **Eq VI.13**, on peut conclure qu'il est utile et indispensable de déterminer le coefficient de frottement, l'efficacité mécanique, WOB, et RPM en fonction de la résistance à la compression (CCS) pour chaque type d'outil.

## VI.4. Estimation de la résistance a la compression (CCS)

Comme on a déjà vu, la détermination de CCS reste difficile et les méthodes de calcul sont basées sur l'UCS.

La formule la plus utilisée dans l'industrie est comme suite :

$$CCS_{\Delta P} = UCS + \Delta P + 2\Delta P \frac{\sin\phi}{1 - \sin\phi} \dots \dots \dots Eq VI. 14$$

Avec :

CCS : la résistance a la compression de la roche.

UCS : la résistance a la compression simple.

$\Delta P$  : La pression différentielle « *Confining Stress* ».

$\phi$  : L'angle de frottement interne.

Cette équation n'est applicable que pour les roches poro/perméables en prenant :

$$\Delta P = ECD_{pression} - PP \dots \dots \dots Eq VI. 15$$

Avec :

$ECD_{pression}$  : la pression exercée par la densité équivalente de la boue au fond de puits « *Equivalent Circulating Density* ».

PP : pression de pores.

Pour les roches imperméables et dans un puits vertical, une relation a été donnée par *Skempton* pour estimer la pression des pores PP de la zone délatée « *expanded rock* » :

$$CCS_{sk} = UCS + \Delta P_{sk} + 2\Delta P_{sk} \frac{\sin\phi}{1 - \sin\phi} \dots \dots \dots Eq VI. 16$$

Avec :  $\Delta P_{sk} = ECD_{pression} - PP_{sk}$ .

$PP_{sk}$  : Skempton pore pressure =  $PP - (d_{fract} - ECD)/3$ .

Skompton a pensé à cette équation en supposant que la variation de pression interstitielle -modifiée par la pression des pores- est égale à la variation moyenne des contraintes principales. cette dernière est égale dans un puits vertical a  $(d_{\text{fract}} - \text{ECD})/3$ .

Dans le cas des puits horizontaux, la densité de fracturation est remplacée par les contraintes terrestres qui existent au fond de puits dans les équations de calculs.

Les deux formules de  $CCS_{\Delta P}$  et  $CCS_{sk}$  sont considérée comme des points limite de CCS. une méthode d'interpolation a été appliquée pour généralisée la formule de CCS :

- $CCS = CCS_{\Delta P}$  pour les roches perméables pour  $\varphi \geq 0,2$  ;
- $CCS = CCS_{sk}$  pour les roches imperméables pour  $\varphi \leq 0,05$  ;
- $CCS = CCS_{\Delta P} \left( \frac{\varphi - 0,05}{0,15} \right) + CCS_{sk} \left( \frac{0,2 - \varphi}{0,15} \right)$  pour  $0,2 \geq \varphi \geq 0,05$  .

Avec  $\varphi$  : Porosité effective.

## VI.5. Modèle Energie spécifique – ROP (Es-ROP)

L'EPTC a développé une méthode pour la prédiction des coefficients indiqués dans l'équation du ROP (l'Eq VI.13) en fonction de la résistance à la compression de la roche CCS, et cela a été faite pour tous les types des outils :

- Tricône à dents fraisés ;
- Tricône à pastilles insérées ;
- PDC, TSP ;
- Les outils imprégnés ;
- Et les outils à diamant naturel.

Une fois que les relations de coefficient de frottement pour l'outil «  $\mu = f(CCS)$  » et l'efficacité mécanique maximale «  $Eff_{max} = f(CCS)$  » en fonction de CCS ont été établis, on peut estimer ROP pour chaque type d'outils en déterminant les paramètres mécaniques « WOB et RPM », par l'utilisation de l'Eq VI.13

En plus le modèle *Es-ROP* fournis trois valeurs de ROP pour chaque type d'outils :  $ROP_{max}$ ,  $ROP_{min}$ , et  $ROP_{moy}$  a cause des valeurs de l'efficacité mécanique de l'outils «  $Eff_{max}$ ,  $Eff_{min}$ , et  $Eff_{moy}$  » utilisés pour chaque test.

Cella étant dit il faut bien noter que c'est généralement le ROP max qui est pris le plus en considération.

Par exemple, pour un outil PDC > 7 lames, les testes de détermination des coefficients  $\mu$  et  $Eff_M$  ont données ces valeurs.

$$\mu = 0.9402 * EXP(-8E - 06 * CCS) \dots \dots Eq VI.17 \text{ (représenté dans la figure VI.3)}$$

$$\left. \begin{aligned} Min Eff_M &= 0.0008 * CCS + 8.834 \\ Max Eff_M &= 0.0011 * CCS + 13.804 \\ Moy Eff_M &= 0.00095 * CCS + 10.319 \end{aligned} \right\} \dots Eq VI.18 \text{ (représenté dans la figure VI.4)}$$

Notons ici qu'il faut faire des corrections pour les deux facteurs «  $\mu$  et  $Eff_{max}$  » dues à l'effet de la densité de la boue et la taille des cutters des outils PDC. Les résultats de cette correction sont présent dans les figures VI.5 et VI.6. <sup>1</sup>

tel que :

$$Eff_m = f(CCS) * [-1.0144 * \ln(\text{Mud weight}) + 302836] \dots \dots \dots Eq VI.19$$

$$\mu = f(CCS) * [0.8876 * \ln(\text{Mud weight}) + 2.998] * [0.0177 * \text{Cuter size} + 0.6637] \dots \dots Eq VI.20$$

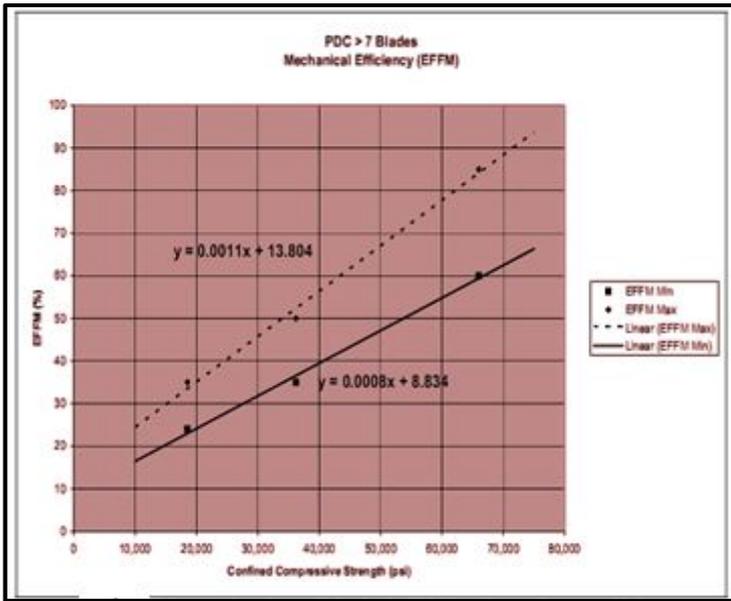


Figure VI.3. Efficacité max et min d'un outil PDC

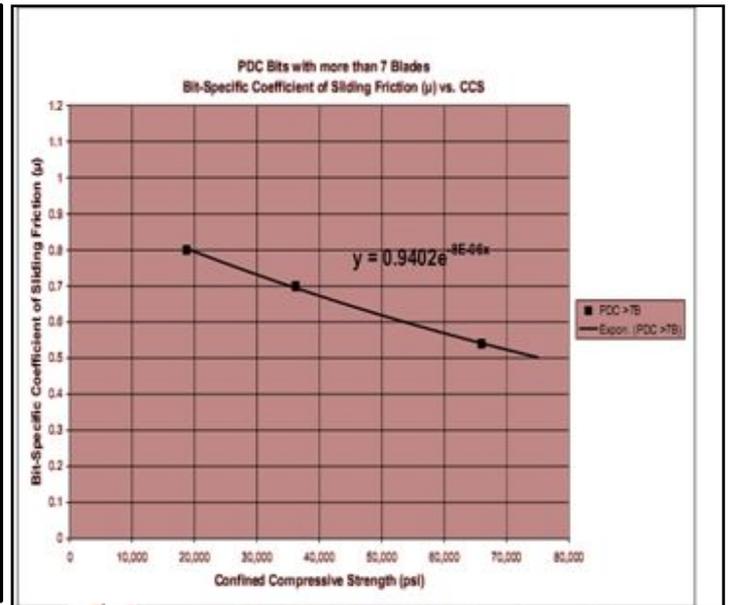


Figure VI.4. Coefficient de frottement pour un outil PDC

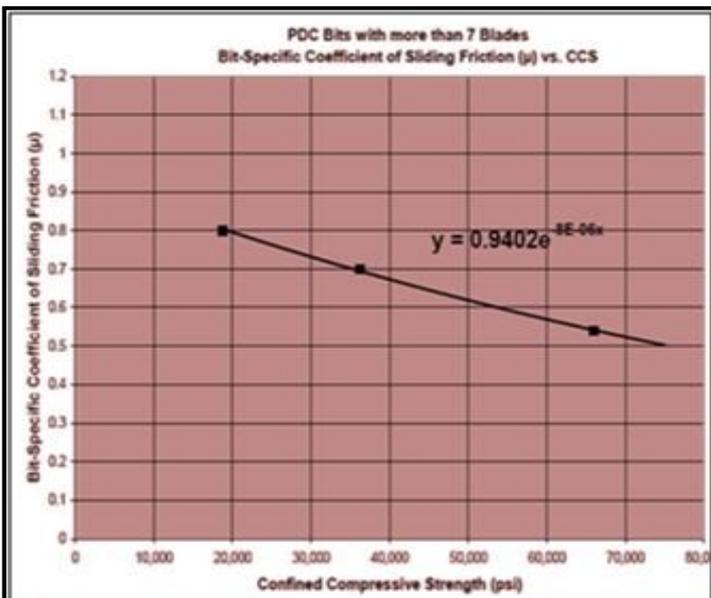


Figure VI.5. Correction du coefficient de frottement du a l'effet de la boue

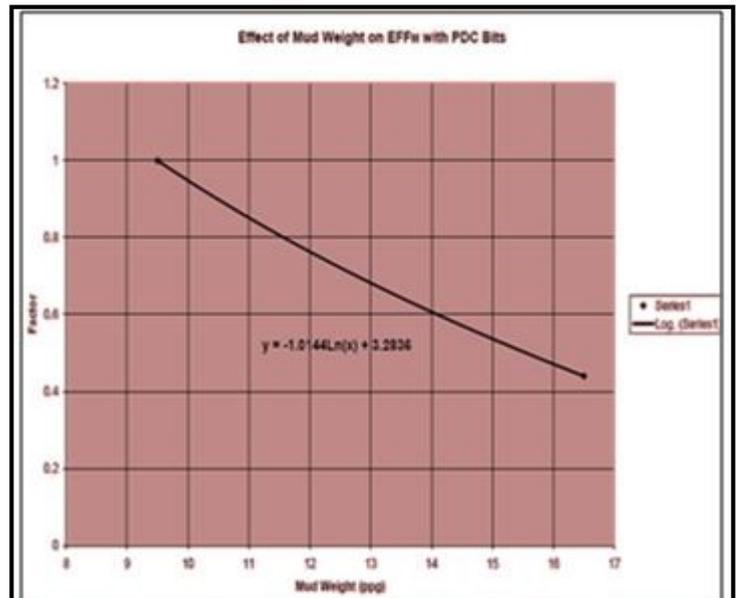
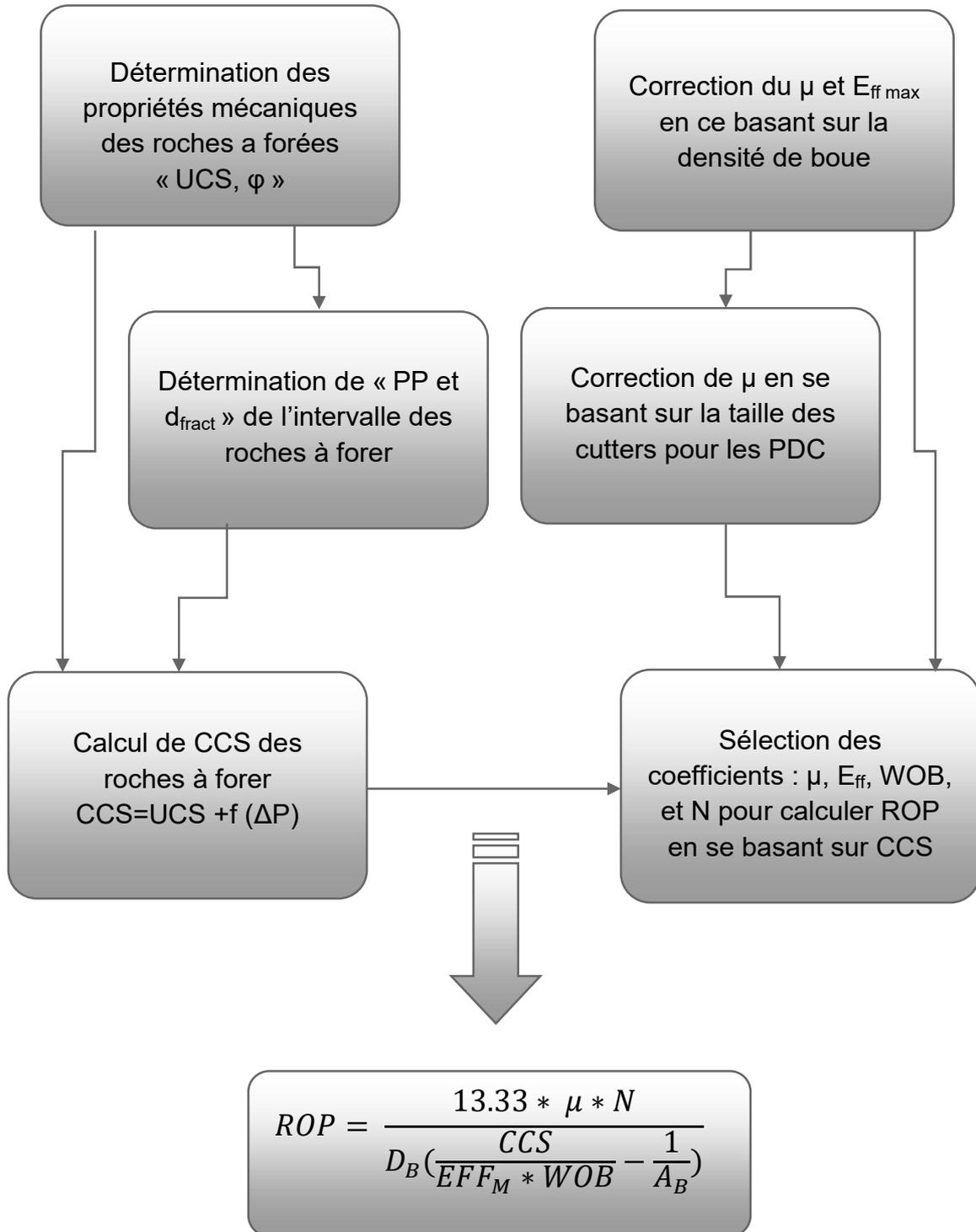


Figure VI.6. Correction de l'efficacité du a l'effet de la boue

## VI.6. Organigramme théorique du modèle Es-ROP



### **VI.7. Limites du modèle**

- Il ne prend pas en charge quelques spécificités de conception des outils telle que : l'offset, le diamètre, pour les tricônes, et le profil des outils PDC.
- Il n'y a pas de différence entre les différents types de boues : boue à base d'eau et à base d'huile.
- Il suppose que les paramètres hydrauliques sont optimums.
- Pour les outils PDC, les résultats sont meilleurs chaque fois que le nombre de lames augmente. <sup>1</sup>

***Chapitre VII : Application  
du modèle d'optimisation  
par MSE***

## VII.1. Problématique et contexte

Durant la préparation de mon projet de fin d'études j'ai eu le privilège, d'effectuer un stage au sein de la société nationale « SONATRACH », ou j'ai été affecté à un chantier de forage afin de pouvoir développer mon thème et disposer de toutes les données nécessaires.

Le puits sur lequel j'ai décidé d'effectuer mon étude était le OMJ 642, qui est un puits de développement foré dans la subdivision OMJ du champ de Hassi Messaoued par la société chinoise SINOPEC (la description détaillée du puits se trouve au niveau du **Chapitre II**)

Mon attention s'est portée sur l'optimisation de la vitesse d'avancement de la deuxième phase du forage, soit la phase 16" puisque sur le champ de Hassi Messaoued elle représente la phase la plus longue (plus de 1800 mètres à forer) donc la plus intéressante pour effectuer une étude d'optimisation sur le ROP.

Après mon séjour au chantier et ma visite aux bureaux de l'ingénierie de SONATRACH j'ai pu constater que malgré le fait que la méthode d'optimisation du ROP par MSE soit la plus fiable et la plus utilisée au niveau mondial, elle est très peu utilisée en Algérie, à cause du manque d'une base de données concernant la dureté de la roche ; en occurrence le CCS et l'UCS et cela pour les diverses zones des grands champs pétroliers du pays.

Dans ce qui va suivre j'ai essayé de modifier l'algorithme d'application de la méthode MSE afin de l'adapter à mon cas et pouvoir surmonter les différents obstacles rencontrés et spécialement le problème de manque de données (UCS et CCS)

## VII.2. Méthodologie de travail

Afin de prévoir une méthode adéquate pour entamer notre travail, il est nécessaire de faire une liste des données (input) nécessaires afin de réaliser notre étude et qui sont les suivantes :

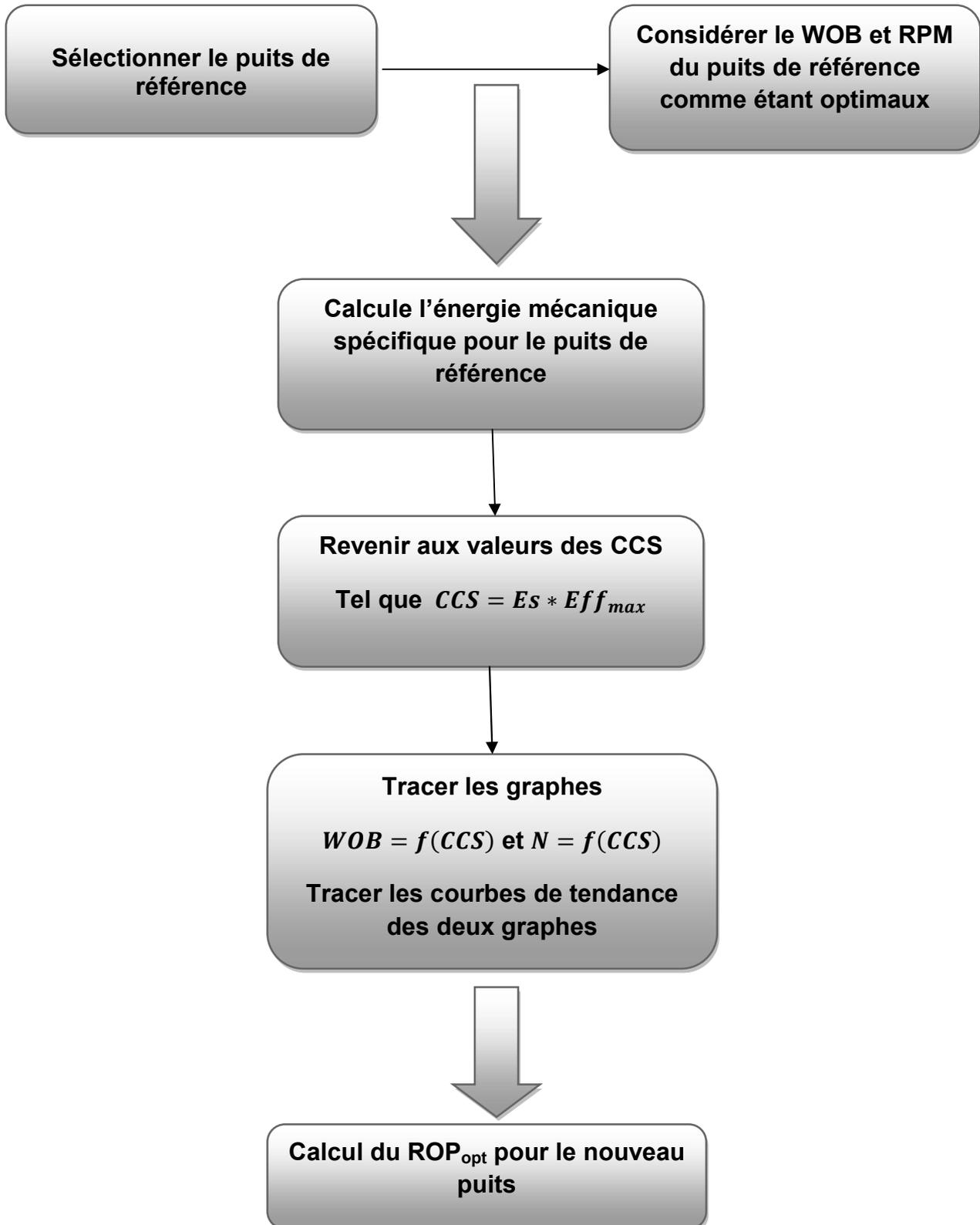
- Enregistrement de l'outil : bit record (ROP, WOB, RPM, Flow, Torque, bit drilling time)

- Dimension de l'outil
- Propriétés des couches traversées (minéralogie,.....ect)
- Dureté des roches traverses (CCS, UCS, l'angle de frottement interne)

On peut conclure de cette liste que toutes les données peuvent être réunies sauf celle en relation avec la dureté de la roche et le calcul du CCS. Donc à partir de ceci et dans le but de pouvoir appliquer le modèle MSE dans la subdivision OMJ du champ de Hassi Messaoued je propose la procédure suivante :

- Choisir un puits déjà foré dans la zone OMJ ayant réalisé un record ou une performance remarquable lors du forage de la phase 16" et le considérer comme un puits de référence (il faut qu'il soit le plus proche possible du OMJ642 et avec un programme de forage similaire à notre puits)
- Supposer que les paramètres mécaniques (WOB, RPM) appliqués lors du forage de la phase 16" du puits de référence comme des paramètres optimaux (en partant du fait que ce puits a effectué un record de forage)
- Calcul de l'énergie mécanique spécifique pour le puits de référence puis revenir aux valeurs des CCS grâce à l'équation reliant le CCS et l'énergie spécifique telle que :  $CCS = E_s * E_{f_{max}}$
- Tracer les graphes reliant les CCS aux WOB et au RPM (WOB=f(CCS), N=f(CCS)).
- Tracer les courbes de tendance afin de pouvoir déterminer les paramètres mécaniques optimaux pour le nouveau puits
- Estimer et calculer les valeurs du coefficient de frottement  $\mu$  et l'efficacité mécanique  $E_{ff}$
- Calculer le  $ROP_{optimum}$  du nouveau puits (grâce à l'Eq VI.11)

### VII.3. Organigramme proposé pour l'application du modèle « Es-ROP »





### VII.5.2. Détermination des CCS « *Unconfined Compressive Strength* »

À partir des données récolté dans la cabine de MUD logging (bit record) du puits de référence, on peut facilement calcule l'énergie spécifique pour chaque mètre foré, et ainsi revenir vers les valeurs des CCS on appliquant les équations :

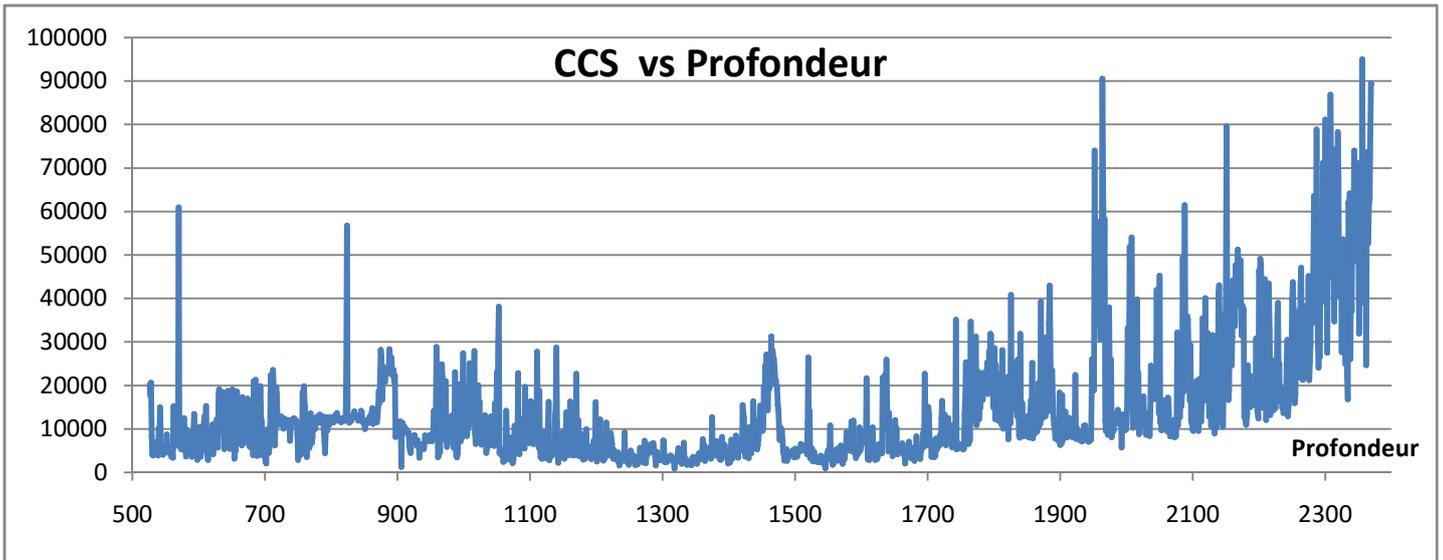
- $Es = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * N * T}{ROP * A_B}$
- $Eff_{max} = 0,36$
- $CCS = Es * Eff_{max}$

La valeur de  $Eff_{max}$  est de 36% qui est la valeur moyenne du paramètre lors du forage du puits OMJ66. elle est prise constante pour facilité les calcules

Le **tableau VII.1** montre une petite partie du tableau dans le quelle les calcule ont était effectué

**Tableau VII.1. Exemple sur le mode de calcul afin de déterminer les CCS**

PROFONDEUR	ROP OMJ66 (m/h)	ROP (f/h)	WOB (ton)	WOB (pounds)	RPM [rpm]	T [lbf-ft]	A <sub>B</sub>	Es	CCS
526	11,2	36,745408	12	26455,44	90	12251	201,0619	56364,6865	20291,2872
527	12,8	41,994752	12	26455,44	95	11511	201,0619	48931,9076	17615,4867
528	11,2	36,745408	13	28660,06	95	11814	201,0619	57382,4096	20657,6675
529	29,6	97,112864	12	26455,44	96	12515	201,0619	23316,5432	8393,95554
530	58,8	192,913392	12	26455,44	96	11833	201,0619	11166,8961	4020,08258
531	62,4	204,724416	11	24250,82	97	11955	201,0619	10735,9262	3864,93345
532	50,9	166,994756	12	26455,44	96	12122	201,0619	13190,9956	4748,75843
533	46,2	151,574808	12	26455,44	101	12133	201,0619	15282,6609	5501,75791
534	42,9	140,748036	10	22046,2	100	11825	201,0619	15854,5492	5707,63772
535	48,2	158,136488	11	24250,82	102	12512	201,0619	15244,9362	5488,17704
536	48	157,48032	12	26455,44	102	13652	201,0619	16702,6762	6012,96342
537	41,9	137,467196	12	26455,44	113	12594	201,0619	19532,581	7031,72917
538	58,3	191,272972	11	24250,82	115	12325	201,0619	14007,7364	5042,78512



**Figure VII.2. Evolution du CCS en fonction de la profondeur**

➤ **Analyse du graphe**

À partir du graphe précédant décrivant la variation du CCS par rapport à la profondeur on peut facilement remarquer qu'au niveau de certaines couches telles que le Sénonien anhydritique, l'Aptien et le Néocomien il y a une augmentation évidente du CCS, et cela est très logique et peut être facilement interprété par le fait que ces couches sont composés de Dolomites et d'Anhydrites et donc elles ont une grand résistance (dureté de la roche).

On peut aussi constater qu'au niveau des profondeurs correspondantes a certaines autres couches telles que l'Albien ou le Barrémien les valeurs du CCS sont beaucoup plus faible, et cela est d'autan plus logique, car ces couches sont constituées essentiellement de sable et donc ils possèdent une dureté et une résistance très faible.

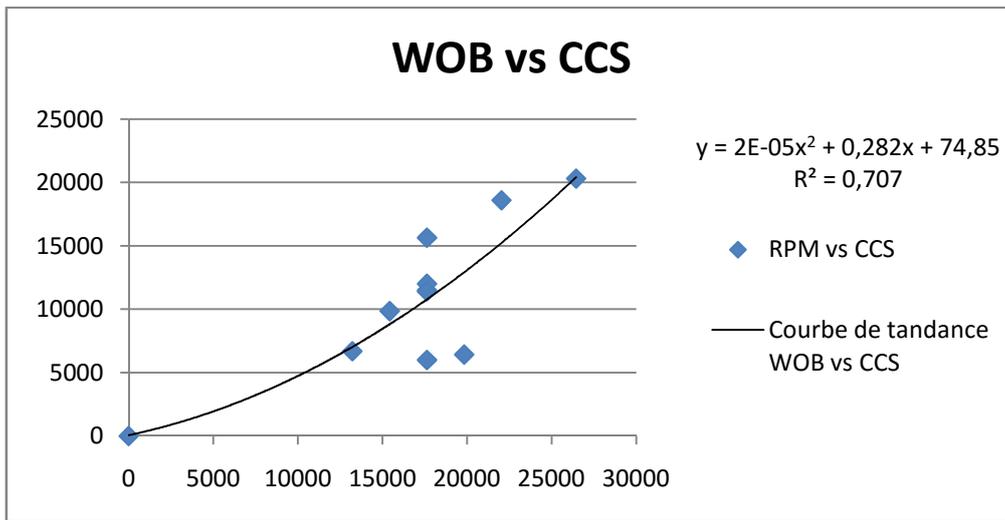
Donc à partir de l'interprétation précédente on peut conclure que les résultats de CCS obtenus sont logiques et acceptables et peuvent être utilisés pour l'exécution de la suite des étapes

**VII.5.3. Détermination des paramètres mécaniques optimaux**

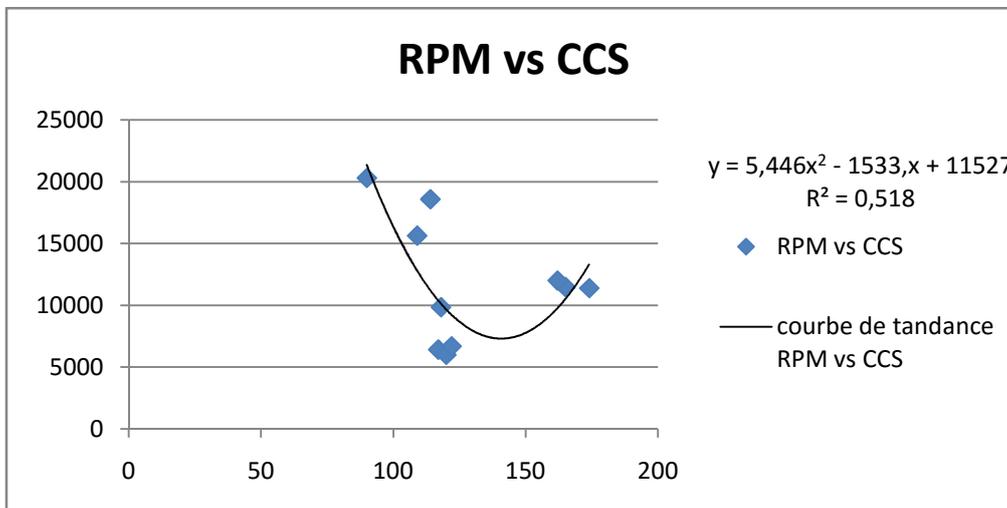
Après la détermination des CCS on peut facilement tracer le nuage de points reliant les paramètres mécaniques optimaux aux valeurs de cette contrainte

- $WOB = f(CCS)$  (représenté dans la **figure VII.3**)
- $ROP = f(CCS)$  (représenté dans la **figure VII.4**)

Une fois le nuage de points réalisé, il faut tracer les courbes de tendance afin d'avoir l'équation généralisée reliant les  $WOB_{opt}$  et  $RPM_{opt}$  au CCS ce qui va nous permettre de généraliser les résultats sur toute la subdivision OMJ.



**Figure VII.3. Graphe reliant les  $WOB_{opt}$  et CCS**



**Figure VII.4. Graphe reliant  $RPM_{opt}$  et CCS**

En traçant les courbes de tendances pour chaque graphe, on a pu déterminer facilement les équations de variation du  $WOB_{opt}$  et le  $RPM_{opt}$  pour être utilisé durant le forage d'autre puits dans la même zone.

Les résultats obtenus sont donnée comme suite :

- Pour le WOB :  $WOB_{opt} = 2E-05*(CCS)^2 + 0,282*(CCS) + 74,85$
- Pour le RPM :  $RPM_{opt} = 5,446*(CCS)^2 - 1533*(CCS) + 11527$

#### VII.5.4. Calcule de l'efficacité mécanique du le puits OMJ642

Afin de pouvoir calculer et déterminer les valeurs de l'efficacité mécanique on peut procède selon les deux méthodes suivantes :

- ✓ On peut directement travailler avec les résultats du graphe illustré dans la **figure VI.4** et l'**Eq VI.18**, car cette étude était portée sur un outil PDC et avec 7 lames (ou plus) et cela correspond exactement à notre cas puisque lors du forage de la phase 16'' du puits OMJ642 l'outil utilisé était un PDC de type MM96R.
- ✓ On peut aussi utiliser une méthode beaucoup plus pratique, en essayant de calculer l'efficacité mécanique pour chaque mètre foré par l'utilisation de l'équation  $Eff_{max} = \frac{CCS}{Es}$ , puis on trace la courbe de tendance afin de généraliser le résultat sur toute la subdivision

Dans notre cas je me suis penché sur l'utilisation de la 1<sup>re</sup> méthode, car l'équation utilisée est issue d'une étude effectuée en laboratoire ce qui nous permettra d'avoir des résultat beaucoup plus exacte que ceux qu'on peut avoir en utilisant la 2em méthode qui est beaucoup plus pratique et qui nécessite une série de calcule ce qui permet d'augmenter la marge d'erreur

#### VII.5.5. Calcule du $ROP_{opt}$ pour le puits OMJ642

À partir des données de forage obtenu dans la cabine du mud-legging et grâce au différent calcule effectué précédemment on peut calcule la vitesse d'avancement optimum pour le forage de la phase 16'' du puits OMJ642 en utilisant l'**Eq VI.13** suivante :

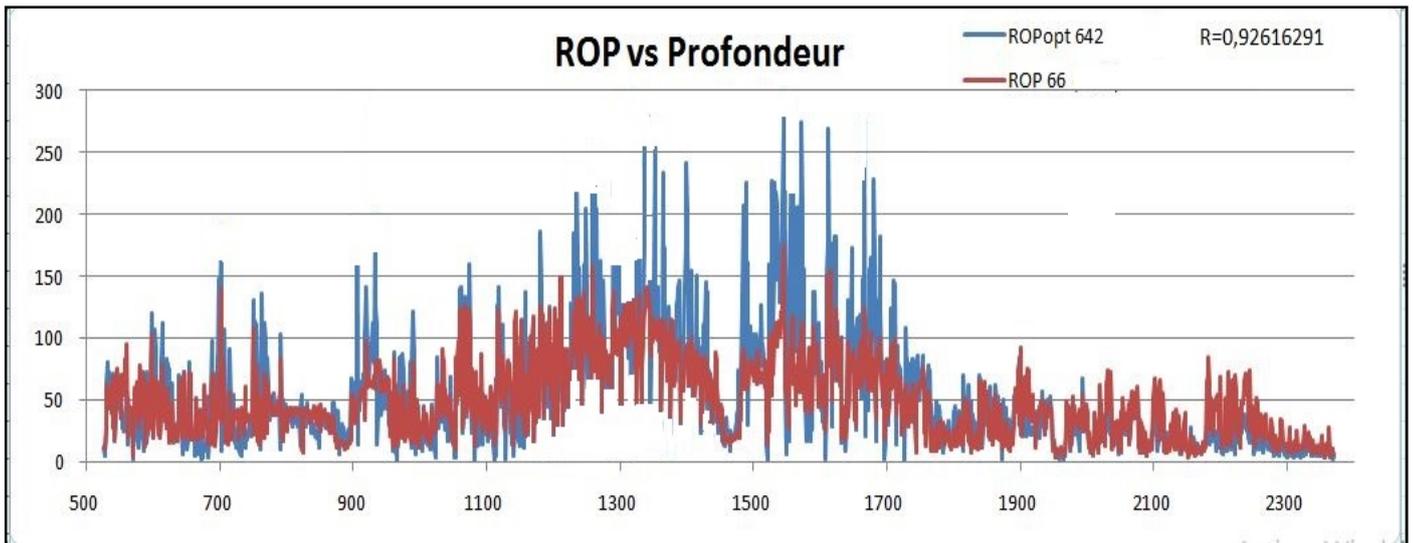
$$ROP = \frac{13.33 * \mu * N}{D_B \left( \frac{CCS}{EFF_M * WOB} - \frac{1}{A_B} \right)} \dots \dots \dots Eq VI. 13$$

**Tableau VII.2. Exemple de calcul du ROP<sub>opt</sub> pour le puits OMJ 642**

PROFONDEUR	CCS	WOB* 642 (T)	WOB* (lb)	RPM* (rpm)	Torque* (ft.lbf)	A <sub>B</sub>	μ	ROP opt (F/h)	ROP <sub>opt</sub> (m/h)
526	20291,28716	6	13227,72	90	13730	201,0619	0,18584816	35,01387487	10,6722287
527	17615,48674	7	15432,34	90	5478	201,0619	0,06355694	16,09816288	4,90671989
528	20657,66747	6	13227,72	90	11689	201,0619	0,15822135	29,27969583	8,924451
529	8393,955535	12	26455,44	90	13952	201,0619	0,09442657	86,38636424	26,330563
530	4020,082583	15	33069,3	90	16215	201,0619	0,08779397	211,5105059	64,4684001
531	3864,93345	17	37478,54	130	13507	201,0619	0,06452811	265,397866	80,893267
532	4748,758426	13	28660,06	130	14268	201,0619	0,08913715	226,7027577	69,0989983
533	5501,757908	15	33069,3	130	12900	201,0619	0,06984534	176,9062686	53,9210289
534	5707,637721	13	28660,06	130	18097	201,0619	0,11305824	238,8086159	72,7888638
535	5488,177039	15	33069,3	130	16131	201,0619	0,08733916	221,7683323	67,5949855
536	6012,963418	15	33069,3	130	16482	201,0619	0,0892396	206,6265392	62,9797671
537	7031,729166	15	33069,3	130	11918	201,0619	0,06452843	127,5845897	38,8877817
538	5042,785121	13	28660,06	130	12482	201,0619	0,07797938	186,6460143	56,8897033

\* nouveau puits (OMJ642)

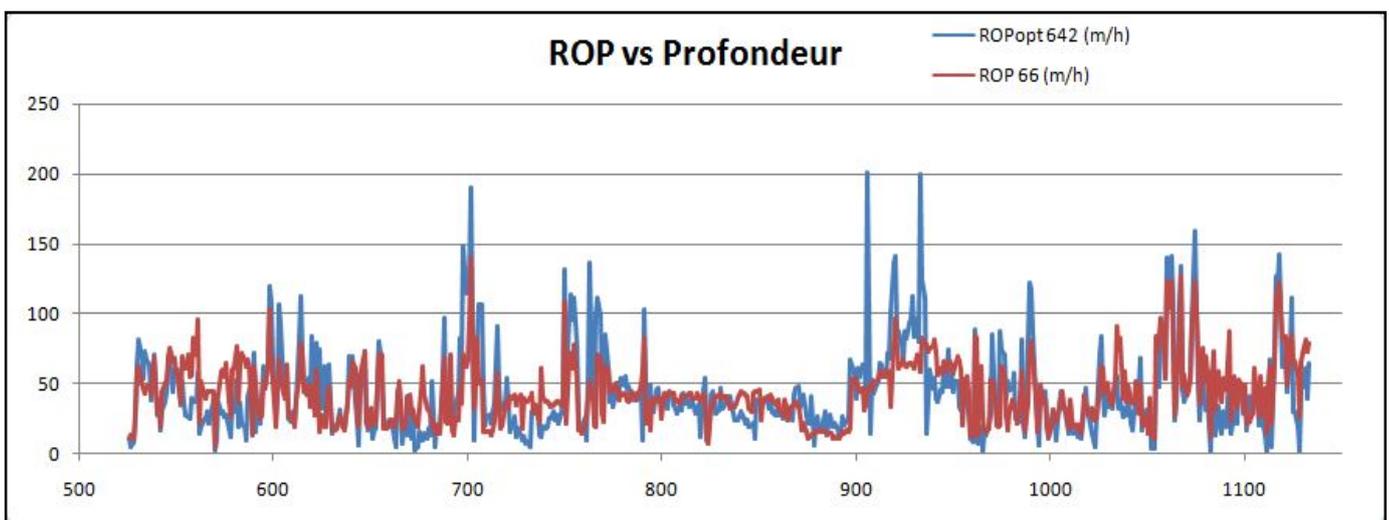
Le **tableau VII.2** montre une petite partie du tableau dans le quel les calculs du ROP<sub>opt</sub> ont été effectués.



**Figure VII.5. Graphe représentant la variation du  $ROP_{opt}$  par rapport au  $ROP_{reference}$**

La **figure VII.5** représente le graphe décrivant l'évolution du  $ROP_{opt}$  du puits OMJ642 et le ROP du puits de référence (OMJ66) par rapport à la profondeur de forage.

On peut remarquer que cette variation est tracé sur plus de 1800 mètres de forage, donc le graphe est légèrement encombré et cela complique un peu l'analyse et l'interprétation des résultats. Pour remédier au problème je propose d'effectuer certaines des analyses sur une partie des résultats obtenus afin de réaliser le meilleur interprétation possible :



**Figure VII.6. Variation des  $ROP_{opt}$  et  $ROP_{reference}$  sur les 600 premiers mètres forés**

## VII.6. Analyses et interprétations des résultats obtenus

### VII.6.1. Interprétation des résultats du $ROP_{opt}$

- À partir des **figures (VII.5) et (VII.6)** on peut facilement remarquer qu'il y a une très forte corrélation entre la variation des deux ROP puisque les deux graphes sont quelque peu intercaler l'un sur l'autre.

En calculant on trouve que le coefficient de corrélation entre  $ROP_{opt}$  et  $ROP_{Réf}$  :  **$R=0,92616291$** , ce qui indique que le modèle d'optimisation par énergie spécifique « Es-ROP » donne de bons résultats, lors de la prédiction du ROP à partir des paramètres mécaniques bien déterminés.

Donc si on connaît la variation des CCS des roches à forer et les lois de variation des coefficients présente dans l'**équation VII.13** «  $WOB = f(CCS), RPM = f(CCS), Eff = f(CCS), et \mu = f(CCS)$  » pour chaque type d'outil, on peut facilement prédire et optimiser le ROP pour avoir la meilleure performance possible.

Pour comparer les résultats obtenus et savoir si le ROP calculé offre une optimisation par rapport au  $ROP_{réel}$  et au  $ROP_{référence}$  on va calculer la moyenne arithmétique pour les trois ROP, on trouve :

$$\overline{RO}_{réel} = 46.547, \quad \overline{ROP}_{réf} = 49.485, \quad \overline{ROP}_{opt} = 54.129 \left[ \frac{m}{h} \right]$$

À partir de cela on peut conclure que le modèle Es-ROP nous a permis de faire augmenter la vitesse sur l'ensemble de la profondeur foré et ainsi accélérer l'avancement pour en faire un gain de temps.

- Suite aux deux analyses précédentes, on peut dire que l'un des objectifs principaux fixés au début est atteint, puisque le  $ROP_{opt}$  calculé est en majorité supérieure ou égale au ROP de référence.

### VII.6.2. Interprétation des résultats des paramètres mécaniques

Pour cela on va essayer de tracer le graphe décrivant l'évolution du WOB et du RMP obtenu au cours du forage sur chaque couche et on obtient :

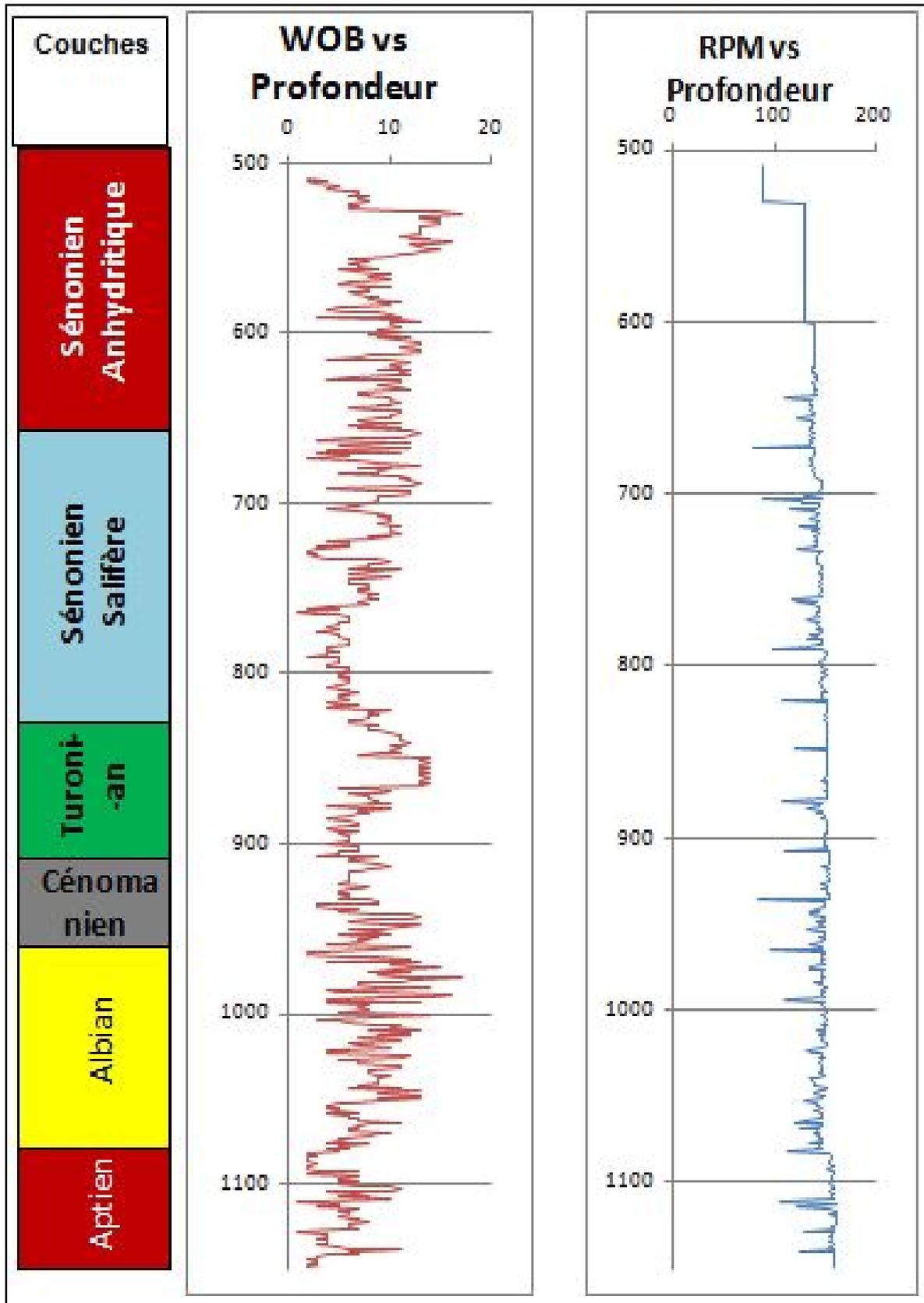


Figure VII.7. Evolution des paramètres mécaniques au cours du forage de certaines couches

À partir de la **figure VII.7** qui représente l'évolution des paramètres mécaniques calculés pour nous permettre d'avoir un ROP optimum, on peut facilement remarque que ces derniers sont très logique et acceptable puisqu'on peut constater que leurs variations est adéquates au changement des formations.

En ce qui concerne le WOB, on remarque que lors de la traversé d'une formation dure telle que le Sénonien ou l'Aptien, le poids sur l'outil applique est élevé et cela est du a la nécessité d'augmenter le poids afin de vaincre la résistance de la roche, tandis que lors du forage d'une formation tendre tel que l'Albian ou le Turonian on peut constater que le poids sur l'outil applique est nettement inférieur a celui applique sur les roches dures, ce qui est très cohérent, car la résistance a la compression de ces roches est moins élevée et leur forage ne nécessite pas autant de poids.

En essayant d'analyser les résultats qui décrive l'évolution du RPM ou la vitesse de rotation pour chaque formation traversée au cours du forage on peut dire que le RPM appliqué doit être maintenu constant lors du forage d'une même formation et que l'augmentation ou la diminution du nombre de tours par minute est généralement exécuté lors d'un changement ou le passage d'une formation a une autre.

Pour conclure, on peut dire que les paramètres mécaniques résultant de l'exécution du modèle d'optimisation par énergie spécifique (Es-ROP) sont adéquats aux formations traversées et donc cohérent et acceptables et leur application est recommandé puisque elles nous permet d'avoir un ROP optimum convoiter au début de notre étude.

## VII.7. Influence de l'application du $ROP_{opt}$ sur le temps de forage

Afin d'étudier l'influence ou bien les résultats de l'application des paramètres mécaniques optimaux sur le temps de forage, je propose de tracer le graphe représentant le temps de forage lors de l'application du ROP réel et lors de l'application du ROP optimum, les résultats obtenus sont les suivantes :

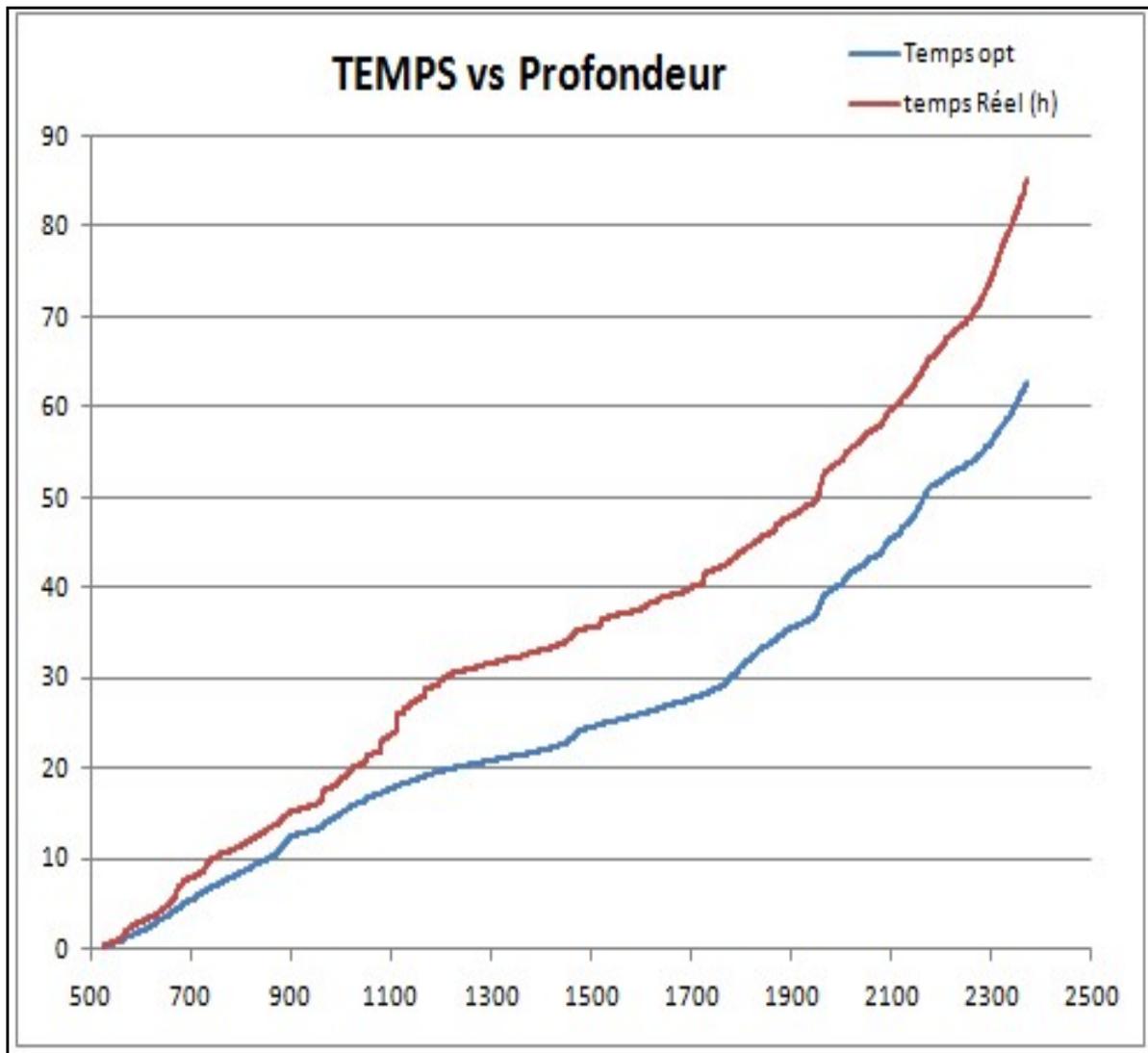


Figure VII.8. Comparaison entre le ROP optimum et le ROP réel

À partir de la **figure VII.8**, on peut remarquer que le  $ROP_{opt}$  simulé a donné un temps de forage largement inférieur au temps de forage réel du puits OMJ642.

Les résultats obtenus peuvent être facilement interprétés par le fait que l'application des paramètres mécaniques optimaux donne des vitesses de pénétration plus grandes à l'outil par rapport aux vitesses de pénétration réelle, ce qui conduit par conséquent à un temps de forage plus petit par rapport au temps de forage réel.

On constate aussi que le temps gagné en appliquant le  $ROP_{opt}$  devient plus important chaque fois que la profondeur augmente.

Pour connaître plus précisément le gain de temps obtenu, on calcule le temps de forage pour les deux cas :

- $T_{réel} = 85,35649333$  heures = 3.55 jours
- $T_{opt} = 62.77871411$  heures = 2.61 jours

Le temps gagné est égal :  $\Delta T_f = (T_{réel} - T_{opt}) = 22.5777792$  Heures

À partir des données récoltées jusqu'à présent, on peut calculer le gain d'argent par mètre foré réalisé en appliquant les paramètres et les ROP optimaux tels que :

$$\Delta P_m = \frac{P_h \Delta T_f}{M} \dots \dots \dots \text{Eq VII.1}$$

Avec :

$P_h$  : le prix de location de l'appareil de forage. Pour le SINOPEC 236, il est de 2200 (kDA)

$\Delta T$  : Temps de forage gagné. (heure)

$M$  : Métrage de la phase. (1844 mètres)

On trouve  $\Delta P_m = 26.936613 \cdot 10^3$  (DA/m)

Sur l'ensemble de la phase, l'argent gagné est de  $\Delta P = 49671.1143 \cdot 10^3$  (DA)

## VII.8. Performance de l'outil en appliquant les paramètres optimaux

Dans ce sous chapitre on va essayer faire une comparaison entre la performance de l'outil lors du forage de la phase 16'' pour le puits de référence (OMJ66) et pour le puits OMJ642 dans le cas de l'application des paramètres réels et le cas des paramètres optimaux

**Tableau VII.3. Performance de l'outil 16'' avec les paramètres réels et optimaux**

FORMATIONS	OMJ66					OMJ642 / ROPréel					OMJ642 / ROPopt				
	Depth		Drilled (mtrs)	Time (hrs)	ROP (mph)	Depth		Drilled (mtrs)	Time (hrs)	ROP (mph)	Depth		Drilled (mtrs)	Time (hrs)	ROP (mph)
	IN	OUT				IN	OUT				IN	OUT			
SENONIAN anhydritique	460	679	219	4,67	46,9	467	682	215	7,75	27,7	467	682	215	4,24	50,7
SENONIAN salifère	679	862	183	5,3	34,5	682	855	173	6,74	25,7	682	855	173	4,87	35,5
TURONIAN	862	941	79	3,04	26,0	855	940	85	7,93	10,7	855	940	85	2,61	32,6
CENOMANIAN	941	1070	129	3,98	32,4	940	1071	131	6,68	19,6	940	1071	131	3,55	36,9
ALBIAN	1070	1459	389	5,9	65,9	1071	1454	383	8,36	45,8	1071	1454	383	5,47	70,0
APTIEN	1459	1740	281	5,75	48,9	1454	1738	284	6,32	44,9	1454	1738	284	5,32	53,4
			1280	29	44,7			1271	43,78	29,0			1271	26	48,8

Pour essayer de mieux interprété ces résultats et faire leur analyse, je propose transformer ces tableaux en graphe en forme d'histogrammes.

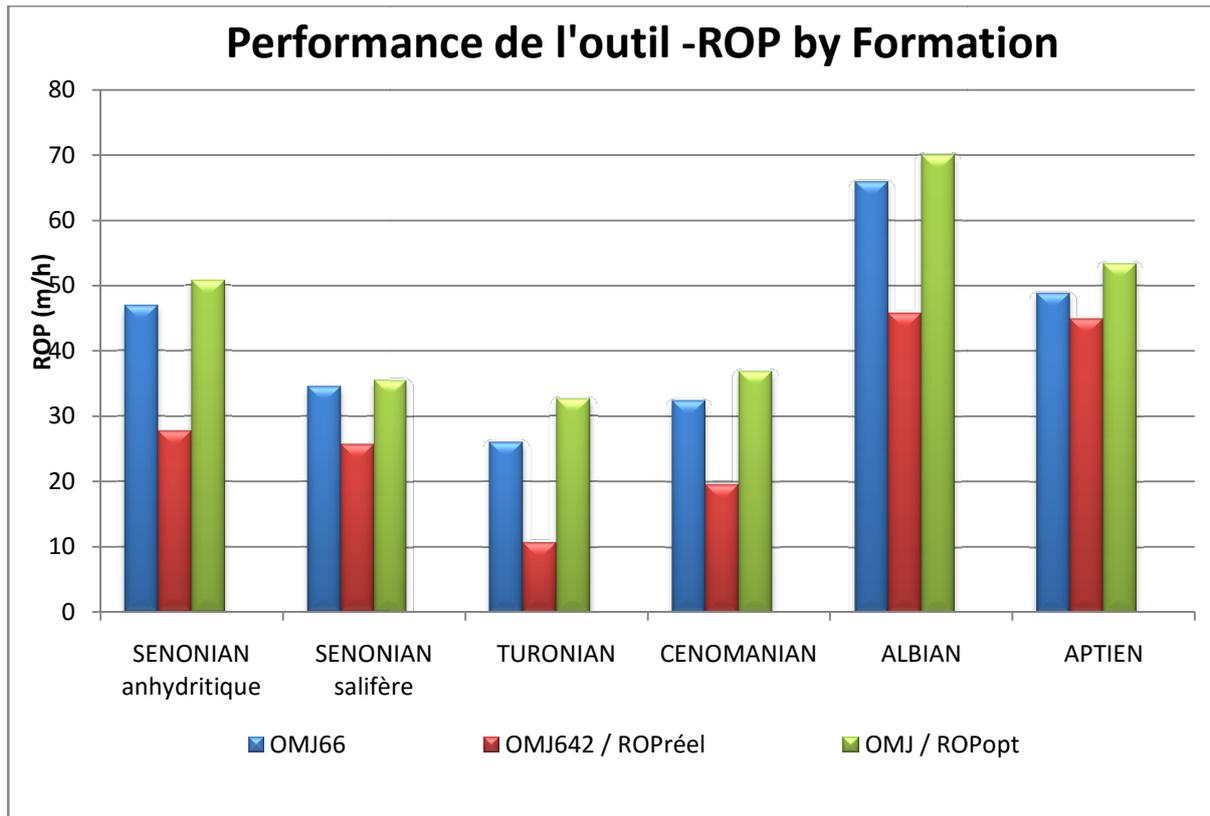


Figure VII.9. Performance de l'outil 16''

➤ **Analyse et interprétation**

La **figure VII.9** représente une comparaison entre les performances de l'outil lors du forage des puits OMJ66 et OMJ642 dans le cas d'un forage avec les paramètres réels et les paramètres optimaux.

Les résultats expriment clairement le fait que la meilleure performance est atteinte lors du forage du puits OMJ642 avec des paramètres mécaniques optimaux, malgré que la performance atteinte lors du forage du puits de référence (OMJ66) reste très proche de la performance optimale, cela s'explique par le fait que pour la comparaison, on a pris les cinq premières formations traversées et donc l'usure de l'outil était minimale ce qui implique un rondement et une performance maximale pour l'outil qui a foré le OMJ66, mais l'écart entre les deux performances a tendance à s'écarter de plus en plus chaque fois que la profondeur augmente.

## VII.9. Étude de l'usure de l'outil et comparaison entre le cas optimisée et le cas réel

L'analyse de l'effet d'application des paramètres mécaniques optimaux sur l'usure de l'outil est sûrement la partie la plus importante de notre étude, car c'est elle qui va validée ou non la possibilité d'une future application du modèle d'optimisation Es-ROP dans la zone OMJ, puisqu'une estimation trop élevée du ROP peut accélérer l'usure de l'outil et donc nous obligé a effectué une manœuvre de montée et descente pour changer l'outil.

Pour pouvoir étudier l'usure on utilise le modèle de Hareland et Rampersad qui définit l'usure des dents de l'outil en fonction des paramètres appliqués et la vitesse d'avancement obtenue et les caractéristiques de formation telles que :

$$W_f = W_{f0} - \frac{1}{8} \sum W_{ci} * WOB_i * ROP_i * A_{abri} * CCS_{ini} = 1 \dots \dots \dots Eq VII. 2$$

$W_f$ : Hauteur des dents finales en fraction. [sans unité]

$W_{f0}$ : Hauteur des dents initiale en fraction. [sans unité]

$W_{ci}$ : Coefficient d'usure dans le mètre i.

$WOB_i$ : Poids sur l'outil appliqué dans le mètre i. [Tonne]

$ROP_i$ : Vitesse d'avancement obtenue dans le mètre i. [rpm]

$A_{abri}$ : Coefficient d'abrasivité de la roche dans le mètre i.

$CCS_i$ : Résistance de la roche à la compression dans le mètre i.[psi]

L'estimation du CCS et  $A_{abr}$  étant approximative, alors l'utilisation de leur valeur pour le calcul de l'usure pourrait faire augmenter la marge d'erreur. Pour remédier à tout ça, on suppose que l'usure est linéaire et on trouve :

$$W_{f0} - W_f = C * (H - H_0) \dots \dots \dots Eq VII. 3$$

$W_{f0}$ : Hauteur des dents initiale en fraction.

$W_f$ : Hauteur des dents à la profondeur H en fraction.

$H$  : Profondeur du forage.[m]

$H_0$  :Profondeur initiale de la descente de l'outil. [m]

$C$  : Coefficient de proportionnalité.

On calcule la constante C à partir des données de forage d'un puits voisin (OMJ66) tel que :

$$C = \frac{W_{f0} - W_{ff}}{H_f - H_0} \dots \dots \dots VII. 4$$

$H_0$  : Profondeur de remonté de l'outil. [m]

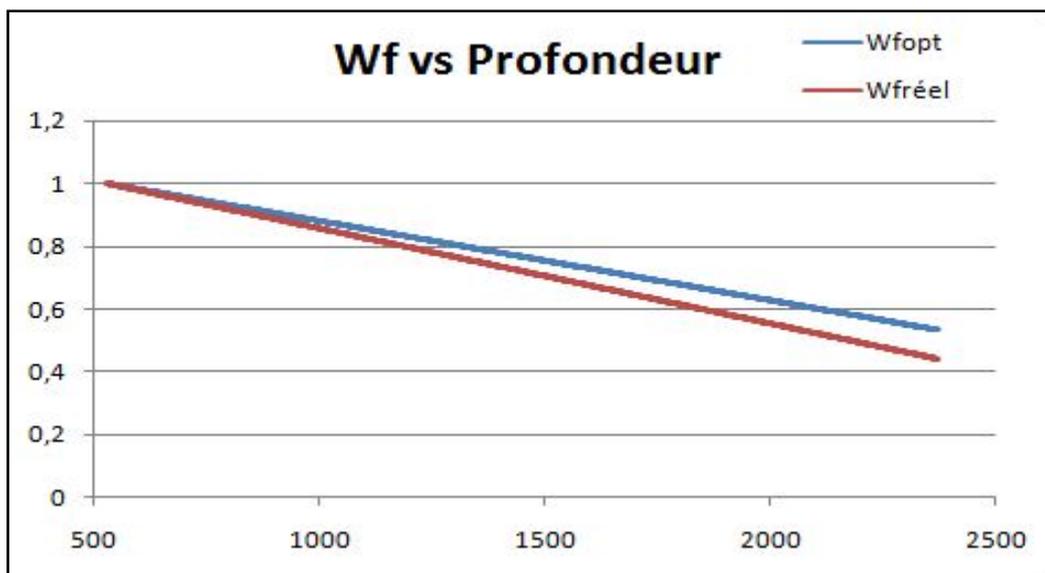
$W_{ff}$  : Usure finale de l'outil en fraction. [m]

On a :  $W_{f0} = 1$ ;  $W_{ff} = 0.427$ ;  $H_f = 2414$ ;  $H_0 = 525$

Alors on trouve que la constante de proportionnalité est **C=0.00303**

Maintenant on peut trouver le  $W_f$  pour chaque mètre foré et pour les deux puits (puits de référence et puits optimisé) et faire la comparaison.

Les résultats obtenus sont représentés par un graphe illustré dans la **figure VII.9**



**Figure VII.10. Comparaison entre le coefficient d'usure réel et optimisé**

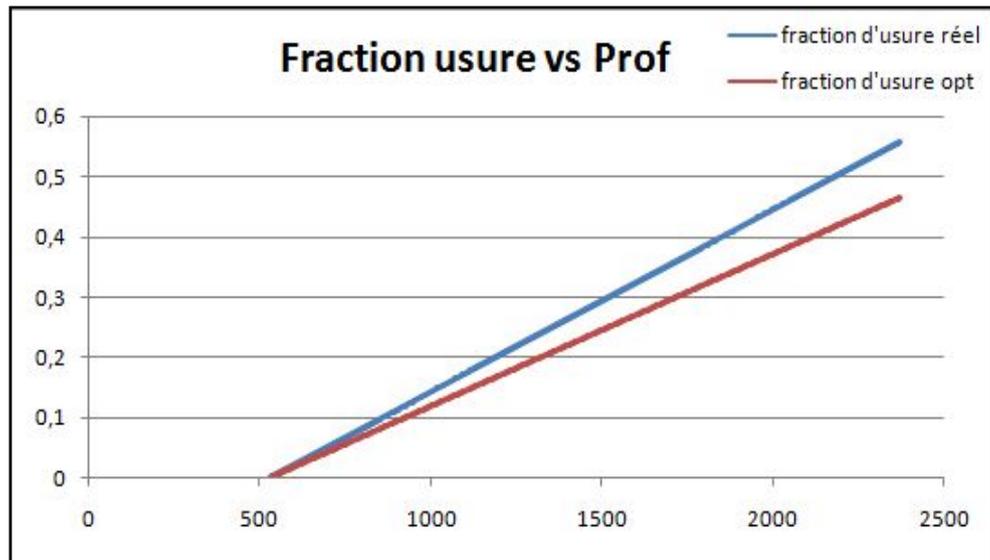


Figure VII.11. Comparaison entre la fraction d'usure réelle et optimisée

### ➤ Analyse et interprétation

La **figure VII.9** représente une comparaison entre le coefficient d'usure de l'outil lors de l'application des paramètres mécaniques réels et les paramètres mécaniques optimaux, tandis que le graphe illustré dans la **figure VII.10** représente l'évolution de l'usure de l'outil pour les deux cas (réel et optimum) en fonction de la profondeur

À partir des deux graphes précédents on peut remarque que l'usure de l'outil lors de l'application des paramètres optimaux est nettement inférieure par rapport a celle engendrée lors de l'application des paramètres réels, et cella laisse pensé que les nouveaux paramètres sont mieux adaptés aux formations traversées ce qui mène a une réduction de la vitesse d'usure de l'outil.

Le fait que le ROP optimum utilisé engendre moins d'usures des cutters de l'outil, sa sous entend que l'équation utilisé pour calculer le ROP optimum (**l'Eq VI.13**) contient un facteur qui tient comptes de la capacité de l'outil qui est l'efficacité mécanique  $E_{ff}$

Enfin, on peut dire que puisque dans notre cas l'usure optimisée est inférieure a l'usure réelle et qu'en même temps l'outil qui a foré la phase avec le ROP réel a pu atteindre la cote prévue avant que les cutters s'usent complètement, sa implique

directement que les résultats obtenus sont acceptables et que l'étude effectuée peut être élargie sur l'ensemble de la subdivision OMJ du champ de Hassi Messaoued

# ***Conclusion***

Après la réalisation de cette étude on peut dire que le modèle d'optimisation par énergie spécifique, fourni un excellent moyen pour augmenter la vitesse d'avancement et ainsi réduire le temps de forage ce qui implique une réduction du prix globale.

Le clé pour l'application de ce modèle est de disposer d'une base de données concernant la dureté de la roche et les coefficients de calcul du ROP, qui peuvent être obtenu par des diagraphies réalisé dans les puits voisins ou par expérience dans les laboratoires.

La fiabilité des résultats obtenus est en fonction de la qualité des données collectées et de l'algorithme de calcul utilisé durant le traitement des données, donc une correction et une actualisation des données s'imposent après chaque exécution du modèle.

L'une des contraintes principales à vérifier pour pouvoir valider les résultats obtenus après l'optimisation des paramètres et du ROP est l'usure de l'outil, car si les paramètres employés risque de provoquer une rupture des cutters de l'outil ou une incapacité de continuer le forage, ceci pourrait compromettre la mise en pratique du ROP optimisé.

Enfin, d'après les résultats obtenus, on peut dire que l'optimisation de la vitesse d'avancement est d'une importance primordiale pour la réalisation d'un forage avec un cout minimal, donc elle devrait être une priorité pour les ingénieurs de projet

# ***Recommendations***

Après avoir effectué cette étude sur l'optimisation de la vitesse d'avancement en utilisant le modèle MSE, je peu dire que les résultats obtenus sont très satisfaisants et on peut donc clôturer avec les recommandations suivantes :

- Comme le montre cette étude, le modèle d'optimisation de la vitesse d'avancement par MSE est très efficace afin de réduire le temps de forage et ainsi le cout global, donc il est recommandé d'effectuer une étude d'optimisation en utilisant Es-ROP avant d'entamer le forage pour pouvoir réaliser une meilleure performance possible
- Vu l'efficacité du modèle il est recommandé d'effectuer les tests qui permettes la détermination de la dureté de la roche (CCS) dans plusieurs puits de la même région ou la même zone pour espéré avoir des résultats les plus précis possible
- Dans le cas de l'algorithme d'exécution du modèle proposé dans cette étude, une meilleure approche du ROP optimum et une corrections des valeurs des CCS peuvent être réalisé en prenant le puits optimisé et le transformer en puits de référence pour essayer d'optimiser un deuxième puits, et ainsi crée une boucle afin de s'approche de la meilleure performance a chaque utilisation du modèle. L'idée peut être développée sous forme d'un programme.
- Dans le but d'avoir de meilleurs résultats possible sur le terrain, il est recommandé de développer le modèle en tenant compte des paramètres hydrauliques
- On peut utiliser ce modèle en temps réel au niveau des chantiers pour identifier et résoudre quelques problèmes de forage, telle que le bourrage de l'outil, stabilisation de parois de puits...etc.

***Références  
bibliographiques***

- [1] Caicedo, H., Calhoun, W., and Ewy, R. (2005). Unique bit performance predictor using specific energy coefficients as a function of confined compressive strength impacts drilling performance. In *18th World Petroleum Congress*. World Petroleum Congress.
- [2] Abdul Rahman, M. Z. A., Ahmad Zaidi, A. M., and Abdul Rahman, I. (2010). Analysis of comparison between unconfined and confined condition of foamed concrete under uni-axial compressive load. *Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 62-72.
- [3] GRONDIN F (2009) «outils de forage» ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement.
- [4] Hudson, J. A., and Harrison, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier.
- [5] Choquin, A. Cours de forage. (1975) Paramètres et contrôle du forage. *Publications de l'institut français du pétrole*.
- [6] Mr. HARCHOUCHE Z, « Forage au diamant et carottage », C.D.A.T.P.G.
- [7] Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., and Young, F. S. (1986). « ROP optimization », Applied drilling engineering.
- [8] « Le forage aujourd'hui. 1<sup>er</sup> et 2<sup>eme</sup> partie » (1970), Publications de l'institut français du pétrole, édition
- [9] Eren, T. (2010). *Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations* (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).
- [10] Barragan, R. V., Santos, O. L. A., and Maidla, E. E. (1997). Optimization of Multiple Bit Runs. In *SPE/IADC drilling conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [11] Akbari, B., Miska, S., Yu, M., & Ozbayoglu, M. (2014, April). Experimental Investigations of the Effect of the Pore Pressure on the MSE and Drilling Strength of a PDC Bit. In *SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting*. Society of Petroleum Engineers.

[12] Kénioua, S « optimisation de la vitesse d'avancement » *mémoire ingénieur 2009, université M'hamed bougera Boumerdes*

[13] Division forage (2017)« Programme de forage OMJ642 » *Sonatrach*

[14] Division forage (2016) « procédure géologique sur le champ de Hassi Messaoued » *Sonatrach,*

# ***Annexe***

## Tableau de calcul<sup>2</sup> de l'énergie spécifique et les CCS

PROFON DEUR	ROP 66 (m/h)	ROP(f/h)	WOB ton	WOB (livre)	RPM [rpm]	T[lbf-ft]	AB	ES	CCS
526	11,2	36,745408	12	26455,44	90	12251	201,0619	56364,6865	20291,2872
527	12,8	41,994752	12	26455,44	95	11511	201,0619	48931,9076	17615,4867
528	11,2	36,745408	13	28660,06	95	11814	201,0619	57382,4096	20657,6675
529	29,6	97,112864	12	26455,44	96	12515	201,0619	23316,5432	8393,95554
530	58,8	192,913392	12	26455,44	96	11833	201,0619	11166,8961	4020,08258
531	62,4	204,724416	11	24250,82	97	11955	201,0619	10735,9262	3864,93345
532	50,9	166,994756	12	26455,44	96	12122	201,0619	13190,9956	4748,75843
533	46,2	151,574808	12	26455,44	101	12133	201,0619	15282,6609	5501,75791
534	42,9	140,748036	10	22046,2	100	11825	201,0619	15854,5492	5707,63772
535	48,2	158,136488	11	24250,82	102	12512	201,0619	15244,9362	5488,17704
536	48	157,48032	12	26455,44	102	13652	201,0619	16702,6762	6012,96342
537	41,9	137,467196	12	26455,44	113	12594	201,0619	19532,581	7031,72917
538	58,3	191,272972	11	24250,82	115	12325	201,0619	14007,7364	5042,78512
539	68,8	225,721792	11	24250,82	111	11591	201,0619	10802,5875	3888,93149
540	29	95,14436	9	19841,58	114	12625	201,0619	28447,4592	10241,0853
541	38,1	125,000004	9	19841,58	114	11845	201,0619	20343,3679	7323,61244
542	18,9	62,007876	9	19841,58	116	11845	201,0619	41625,3735	14985,1344
543	43,8	143,700792	9	19841,58	117	11625	201,0619	17836,5256	6421,14921
544	50,9	166,994756	8	17636,96	120	12305	201,0619	16658,43	5997,03481
545	52,1	170,931764	11	24250,82	118	12114	201,0619	15792,7397	5685,38628
546	69,3	227,362212	9	19841,58	118	11351	201,0619	11138,9352	4010,01667
547	75,3	247,047252	9	19841,58	125	12415	201,0619	11870,8891	4273,52007
548	66,3	217,519692	9	19841,58	125	13251	201,0619	14369,25	5172,92999
549	68,4	224,409456	9	19841,58	122	12652	201,0619	12988,8637	4675,99092
550	58,9	193,241476	12	26455,44	123	11362	201,0619	13684,7416	4926,50698
551	55,4	181,758536	7	15432,34	130	11251	201,0619	15157,4289	5456,67441
552	36	118,11024	12	26455,44	128	11854	201,0619	24206,6981	8714,41133
553	69,7	228,674548	6	13227,72	128	12541	201,0619	13221,2306	4759,643
554	63,7	208,989508	9	19841,58	134	12114	201,0619	14654,9168	5275,77007
555	60,9	199,803156	6	13227,72	134	11842	201,0619	14949,411	5381,78796
556	70,9	232,611556	7	15432,34	126	12025	201,0619	12283,6561	4422,1162
557	54,6	179,133864	8	17636,96	126	12365	201,0619	16386,9864	5899,31511
558	56,2	184,383208	9	19841,58	123	11748	201,0619	14785,5385	5322,79386
559	82,6	270,997384	8	17636,96	123	11547	201,0619	9909,50106	3567,42038
560	70,7	231,955388	8	17636,96	122	12355	201,0619	12265,8104	4415,69174
561	95,5	313,32022	7	15432,34	124	12635	201,0619	9447,83364	3401,22011
562	21,4	70,209976	13	28660,06	125	12625	201,0619	42265,9696	15215,749
563	51	167,32284	8	17636,96	128	11325	201,0619	16323,533	5876,47187
564	41,9	137,467196	9	19841,58	113	12151	201,0619	18817,2468	6774,20884
565	39,3	128,937012	7	15432,34	124	12141	201,0619	21958,3834	7905,01802

Annexe

566	44	144,35696	5	11023,1	118	11254	201,0619	17294,6275	6226,06592
567	44	144,35696	5	11023,1	125	13198	201,0619	21471,9667	7729,908
568	44	144,35696	5	11023,1	120	13251	201,0619	20697,8468	7451,22486
569	44	144,35696	5	11023,1	115	12541	201,0619	18777,7362	6759,98505
570	5,2	17,060368	4	8818,48	120	12841	201,0619	169311,059	60951,9813
571	37,6	123,359584	2	4409,24	119	12659	201,0619	22907,1226	8246,56415
572	42,2	138,451448	6	13227,72	113	13183	201,0619	20229,7715	7282,71773
573	59,1	193,897644	6	13227,72	122	13080	201,0619	15489,0484	5576,05742
574	60,2	197,506568	5	11023,1	116	13314	201,0619	14709,1593	5295,29734
575	55,2	181,102368	7	15432,34	135	12649	201,0619	17747,1771	6388,98375
576	64,1	210,301844	7	15432,34	147	12147	201,0619	15988,7405	5755,94659
577	37,7	123,687668	10	22046,2	148	12138	201,0619	27328,1094	9838,11939
578	27	88,58268	9	19841,58	130	12536	201,0619	34576,0938	12447,3938
579	59,6	195,538064	5	11023,1	110	13136	201,0619	13903,4166	5005,22997
580	61,1	200,459324	6	13227,72	122	12890	201,0619	14767,4907	5316,29666
581	77,1	252,952764	4	8818,48	99	13925	201,0619	10257,3004	3692,62816
582	37,2	122,047248	10	22046,2	145	12218	201,0619	27312,9271	9832,65375
583	62,5	205,0525	4	8818,48	106	13540	201,0619	13161,0424	4737,97526
584	71,9	235,892396	6	13227,72	125	13018	201,0619	12993,4948	4677,65813
585	66,9	219,488196	7	15432,34	142	12311	201,0619	15003,0354	5401,09273
586	62,5	205,0525	7	15432,34	131	12919	201,0619	15544,1157	5595,88166
587	67,3	220,800532	5	11023,1	120	12674	201,0619	12963,3293	4666,79857
588	61	200,13124	7	15432,34	146	12193	201,0619	16746,526	6028,74936
589	13,1	42,979004	6	13227,72	92	6345	201,0619	25519,0965	9186,87473
590	62,1	203,740164	3	6613,86	79	13808	201,0619	10066,6228	3623,98421
591	50,9	166,994756	5	11023,1	122	13133	201,0619	18035,3364	6492,72109
592	36,8	120,734912	7	15432,34	115	13400	201,0619	23996,1872	8638,62738
593	25	82,021	8	17636,96	126	12918	201,0619	37277,3507	13419,8463
594	27,9	91,535436	7	15432,34	107	13485	201,0619	29617,8489	10662,4256
595	52,1	170,931764	6	13227,72	118	13361	201,0619	17351,1843	6246,42635
596	46,3	151,902892	7	15432,34	133	13064	201,0619	21512,7114	7744,57611
597	63,1	207,021004	6	13227,72	138	12843	201,0619	16109,7751	5799,51905
598	102,8	337,270352	4	8818,48	100	14275	201,0619	7975,793	2871,28548
599	68,8	225,721792	3	6613,86	74	14584	201,0619	8993,05945	3237,5014
600	51,7	169,619428	5	11023,1	117	12733	201,0619	16514,5321	5945,23156
601	19,6	64,304464	5	11023,1	83	11932	201,0619	28917,1503	10410,1741
602	43	141,07612	5	11023,1	115	12587	201,0619	19283,425	6942,03299
603	67,4	221,128616	3	6613,86	88	13462	201,0619	10072,7723	3626,19804
604	52,6	172,572184	5	11023,1	100	13063	201,0619	14240,6052	5126,61786
605	43,6	143,044624	6	13227,72	118	12422	201,0619	19269,4093	6936,98735
606	40	131,2336	6	13227,72	126	12140	201,0619	21909,4439	7887,39981
607	64	209,97376	6	13227,72	132	11921	201,0619	14110,1736	5079,66251
608	28,1	92,191604	8	17636,96	123	12237	201,0619	30684,0826	11046,2697
609	24,9	81,692916	8	17636,96	128	12091	201,0619	35591,0339	12812,7722

Annexe

610	27,8	91,207352	7	15432,34	116	12492	201,0619	29851,0315	10746,3713
611	19,2	62,992128	8	17636,96	111	12813	201,0619	42400,2143	15264,0771
612	38,4	125,984256	5	11023,1	94	13705	201,0619	19218,1876	6918,54752
613	53,7	176,181108	2	4409,24	65	14694	201,0619	10181,496	3665,33857
614	79,2	259,842528	2	4409,24	77	14295	201,0619	7960,56347	2865,80285
615	70,3	230,643052	4	8818,48	115	12965	201,0619	12158,5158	4377,06569
616	43,9	144,028876	7	15432,34	135	12297	201,0619	21677,2879	7803,82364
617	42,9	140,748036	7	15432,34	143	12004	201,0619	22932,7839	8255,80221
618	49,2	161,417328	6	13227,72	122	13069	201,0619	18576,9285	6687,69426
619	33,2	108,923888	7	15432,34	118	13435	201,0619	27352,5641	9846,92307
620	48,3	158,464572	6	13227,72	87	13804	201,0619	14268,5619	5136,68228
621	27,8	91,207352	8	17636,96	115	12937	201,0619	30656,8212	11036,4556
622	59,6	195,538064	3	6613,86	89	13693	201,0619	11712,7756	4216,59921
623	38,6	126,640424	5	11023,1	105	12567	201,0619	19581,5611	7049,362
624	15,6	51,181104	5	11023,1	71	5743	201,0619	14985,1276	5394,64594
625	27,8	91,207352	4	8818,48	99	12878	201,0619	26239,8534	9446,34722
626	19,1	62,664044	7	15432,34	70	8961	201,0619	18836,0793	6780,98855
627	18,9	62,007876	5	11023,1	87	12892	201,0619	33952,8034	12223,0092
628	39,2	128,608928	4	8818,48	103	12384	201,0619	18630,8109	6707,09191
629	47,8	156,824152	5	11023,1	109	12175	201,0619	15913,3801	5728,81684
630	17,4	57,086616	9	19841,58	125	12362	201,0619	50826,4298	18297,5147
631	16,7	54,790028	10	22046,2	125	12396	201,0619	53109,0753	19119,2671
632	17,3	56,758532	10	22046,2	129	12243	201,0619	52256,4313	18812,3153
633	18	59,05512	10	22046,2	132	12119	201,0619	50874,635	18314,8686
634	27,8	91,207352	6	13227,72	109	12913	201,0619	28986,2305	10435,043
635	21,6	70,866144	5	11023,1	86	13383	201,0619	30491,2914	10976,8649
636	19,4	63,648296	9	19841,58	125	12011	201,0619	44304,9172	15949,7702
637	17	55,77428	8	17636,96	113	13471	201,0619	51235,3378	18444,7216
638	38,8	127,296592	8	17636,96	126	13634	201,0619	25378,263	9136,17467
639	53,3	174,868772	5	11023,1	103	13502	201,0619	14958,8703	5385,19332
640	49,5	162,40158	6	13227,72	123	12867	201,0619	18328,8379	6598,38163
641	65,5	214,89502	6	13227,72	146	12909	201,0619	16501,9439	5940,6998
642	61,6	202,099744	8	17636,96	165	12621	201,0619	19398,1986	6983,3515
643	26,6	87,270344	10	22046,2	142	13519	201,0619	41333,3837	14880,0181
644	19,6	64,304464	10	22046,2	126	14137	201,0619	52021,6526	18727,7949
645	56,1	184,055124	7	15432,34	153	13143	201,0619	20551,5292	7398,55051
646	67,5	221,4567	5	11023,1	144	13467	201,0619	16465,469	5927,56884
647	72,6	238,188984	6	13227,72	139	13663	201,0619	15008,1876	5402,94753
648	22,6	74,146984	11	24250,82	139	13139	201,0619	46280,5004	16660,9802
649	19,8	64,960632	10	22046,2	135	12288	201,0619	47966,6897	17268,0083
650	32,2	105,643048	9	19841,58	129	13979	201,0619	32088,0773	11551,7078
651	20,5	67,25722	11	24250,82	139	13663	201,0619	53038,5706	19093,8854
652	28	91,86352	10	22046,2	143	13494	201,0619	39475,0582	14211,021
653	22,3	73,162732	11	24250,82	146	13428	201,0619	50338,1481	18121,7333

Annexe

654	70,6	231,627304	3	6613,86	73	14923	201,0619	8846,8401	3184,86244
655	56	183,72704	6	13227,72	134	12032	201,0619	16511,4246	5944,11286
656	70,7	231,955388	6	13227,72	133	12731	201,0619	13745,9376	4948,53754
657	17,7	58,070868	6	13227,72	85	11784	201,0619	32390,4856	11660,5748
658	18,4	60,367456	10	22046,2	114	14551	201,0619	51605,9374	18578,1375
659	19,8	64,960632	8	17636,96	109	13780	201,0619	43419,5047	15631,0217
660	22,4	73,490816	7	15432,34	101	14221	201,0619	36703,6027	13213,297
661	23,5	77,09974	7	15432,34	110	13919	201,0619	37292,6878	13425,3676
662	19,7	64,632548	7	15432,34	100	14245	201,0619	41380,7709	14897,0775
663	25,7	84,317588	6	13227,72	87	14691	201,0619	28473,3242	10250,3967
664	42,5	139,4357	5	11023,1	100	14277	201,0619	19243,4598	6927,64552
665	51,4	168,635176	6	13227,72	112	13820	201,0619	17266,9997	6216,11988
666	18,4	60,367456	9	19841,58	112	13827	201,0619	48174,2297	17342,7227
667	18,4	60,367456	8	17636,96	89	14600	201,0619	40426,3449	14553,4842
668	21,7	71,194228	7	15432,34	108	13953	201,0619	39743,6008	14307,6963
669	40,6	133,202104	4	8818,48	92	14484	201,0619	18791,4894	6764,93618
670	40,2	131,889768	6	13227,72	114	13749	201,0619	22337,11	8041,35958
671	29,4	96,456696	7	15432,34	108	13917	201,0619	29279,1251	10540,485
672	30,7	100,721788	7	15432,34	110	13876	201,0619	28476,5136	10251,5449
673	25,2	82,677168	9	19841,58	120	13522	201,0619	36879,1898	13276,5083
674	19,9	65,288716	9	19841,58	122	13443	201,0619	47174,6253	16982,8651
675	32,5	106,6273	8	17636,96	133	13092	201,0619	30691,1655	11048,8196
676	44,8	146,981632	6	13227,72	126	13007	201,0619	20961,9131	7546,2887
677	61,9	203,083996	6	13227,72	138	12714	201,0619	16256,5295	5852,35063
678	41,7	136,811028	8	17636,96	116	13950	201,0619	22253,9678	8011,42841
679	32,7	107,283468	8	17636,96	115	14064	201,0619	28340,0969	10202,4349
680	31,1	102,034124	4	8818,48	92	14839	201,0619	25118,12	9042,52322
681	27,3	89,566932	6	13227,72	104	14444	201,0619	31496,5023	11338,7408
682	22,1	72,506564	4	8818,48	37	11372	201,0619	10919,1875	3930,90749
683	14,6	47,900264	9	19841,58	107	13872	201,0619	58170,5876	20941,4115
684	20,7	67,913388	6	13227,72	95	14391	201,0619	37791,7487	13605,0295
685	14,3	46,916012	8	17636,96	104	14088	201,0619	58612,892	21100,6411
686	14,1	46,259844	7	15432,34	103	14142	201,0619	59086,6714	21271,2017
687	49,6	162,729664	5	11023,1	109	13919	201,0619	17527,0777	6309,74797
688	68,8	225,721792	4	8818,48	88	14510	201,0619	10645,1249	3832,24497
689	22,3	73,162732	10	22046,2	112	13826	201,0619	39774,4949	14318,8181
690	21,3	69,881892	6	13227,72	91	14549	201,0619	35570,91	12805,5276
691	71,1	233,267724	5	11023,1	94	14462	201,0619	10976,334	3951,48023
692	17	55,77428	6	13227,72	91	14399	201,0619	44092,9687	15873,4687
693	13,3	43,635172	6	13227,72	87	14703	201,0619	55003,3825	19801,2177
694	25,5	83,66142	9	19841,58	109	13941	201,0619	34137,6457	12289,5525
695	24,5	80,38058	5	11023,1	97	14330	201,0619	32462,5014	11686,5005
696	47,9	157,152236	4	8818,48	102	14200	201,0619	17316,1154	6233,80155
697	36,1	118,438324	4	8818,48	100	14254	201,0619	22597,9653	8135,26752

Annexe

698	70,5	231,29922	3	6613,86	89	14574	201,0619	10542,2412	3795,20685
699	62,1	203,740164	5	11023,1	98	14285	201,0619	12931,7083	4655,415
700	66,6	218,503944	4	8818,48	95	14440	201,0619	11809,4203	4251,39129
701	93,4	306,430456	5	11023,1	72	15203	201,0619	6749,21389	2429,717
702	140	459,3176	7	15432,34	97	14358	201,0619	5759,17912	2073,30448
703	32,5	106,6273	7	15432,34	115	13448	201,0619	27257,93	9812,85481
704	50,3	165,026252	5	11023,1	119	13186	201,0619	17874,0206	6434,6474
705	82,3	270,013132	5	11023,1	139	12433	201,0619	12049,4573	4337,80462
706	50,3	165,026252	2	4409,24	88	12517	201,0619	12530,5959	4511,01451
707	52,2	171,259848	4	8818,48	105	13748	201,0619	15840,1234	5702,44443
708	15,3	50,196852	5	11023,1	77	10046	201,0619	28934,2485	10416,3295
709	15,2	49,868768	9	19841,58	118	14019	201,0619	62264,4823	22415,2136
710	15,8	51,837272	8	17636,96	116	14064	201,0619	59067,862	21264,4303
711	15,5	50,85302	8	17636,96	111	14252	201,0619	58386,9942	21019,3179
712	13,8	45,275592	8	17636,96	111	14246	201,0619	65541,2218	23594,8399
713	17,1	56,102364	7	15432,34	118	13989	201,0619	55216,9911	19878,1168
714	22,7	74,475068	8	17636,96	132	13424	201,0619	44676,5492	16083,5577
715	57	187,00788	4	8818,48	128	13471	201,0619	17323,3531	6236,40713
716	29	95,14436	6	13227,72	122	13847	201,0619	33340,4462	12002,5606
717	18,7	61,351708	9	19841,58	132	13506	201,0619	54555,8617	19640,1102
718	21	68,89764	9	19841,58	135	13412	201,0619	49348,4395	17765,4382
719	35,3	115,813652	7	15432,34	151	12685	201,0619	31071,5496	11185,7579
720	37,8	124,015752	7	15432,34	173	11710	201,0619	30689,8506	11048,3462
721	32,8	107,611552	7	15432,34	164	12331	201,0619	35294,7277	12706,102
722	41	134,51444	6	13227,72	160	13664	201,0619	30524,3965	10988,7827
723	39,9	130,905516	7	15432,34	175	12948	201,0619	32515,4888	11705,576
724	41,4	135,826776	7	15432,34	179	12812	201,0619	31718,882	11418,7975
725	34,9	114,501316	7	15432,34	170	12803	201,0619	35699,8206	12851,9354
726	39,3	128,937012	6	13227,72	171	13118	201,0619	32669,5162	11761,0258
727	41,7	136,811028	6	13227,72	175	12778	201,0619	30696,7726	11050,8381
728	18	59,05512	4	8818,48	96	9186	201,0619	28028,5965	10090,2947
729	39,2	128,608928	6	13227,72	159	13645	201,0619	31679,8773	11404,7558
730	37,2	122,047248	6	13227,72	168	13221	201,0619	34171,4689	12301,7288
731	37,6	123,359584	6	13227,72	166	13396	201,0619	33848,2626	12185,3745
732	40,1	131,561684	6	13227,72	173	13045	201,0619	32212,8947	11596,6421
733	43,4	142,388456	6	13227,72	175	12945	201,0619	29881,5871	10757,3714
734	28,8	94,488192	4	8818,48	131	12514	201,0619	32557,9058	11720,8461
735	34,6	113,517064	5	11023,1	157	11641	201,0619	30227,2277	10881,802
736	34,2	112,204728	6	13227,72	170	11743	201,0619	33408,2722	12026,978
737	22,2	72,834648	5	11023,1	103	10934	201,0619	29032,2221	10451,5999
738	60,7	199,146988	8	17636,96	182	11777	201,0619	20258,069	7292,90483
739	41,3	135,498692	7	15432,34	159	12887	201,0619	28416,4355	10229,9168
740	37,8	124,015752	8	17636,96	177	12061	201,0619	32347,4577	11645,0848
741	37,3	122,375332	8	17636,96	183	11760	201,0619	33044,5649	11896,0434

Annexe

742	35,6	116,797904	8	17636,96	171	12196	201,0619	33550,3119	12078,1123
743	33,3	109,251972	7	15432,34	153	13056	201,0619	34341,9643	12363,1071
744	34,5	113,18898	7	15432,34	163	12758	201,0619	34507,5585	12422,721
745	35,8	117,454072	6	13227,72	155	12734	201,0619	31558,4662	11361,0478
746	37,6	123,359584	7	15432,34	160	12867	201,0619	31352,3433	11286,8436
747	37	121,39108	8	17636,96	178	12017	201,0619	33110,2534	11919,6912
748	34,9	114,501316	7	15432,34	159	12602	201,0619	32871,7238	11833,8206
749	40,8	133,858272	5	11023,1	120	14248	201,0619	23991,8977	8637,08318
750	108,2	354,986888	3	6613,86	99	15128	201,0619	7939,41713	2858,19017
751	22	72,17848	5	11023,1	99	9608	201,0619	24751,6747	8910,60289
752	67,5	221,4567	3	6613,86	85	14772	201,0619	10658,4225	3837,03209
753	71,7	235,236228	6	13227,72	104	14095	201,0619	11743,9736	4227,83049
754	60,6	198,818904	6	13227,72	91	14615	201,0619	12601,9239	4536,69262
755	77,4	253,937016	4	8818,48	115	13596	201,0619	11582,7512	4169,79043
756	52,1	170,931764	5	11023,1	113	13852	201,0619	17216,0881	6197,7917
757	17,4	57,086616	8	17636,96	112	13893	201,0619	51168,8931	18420,8015
758	18,5	60,69554	8	17636,96	116	13748	201,0619	49328,15	17758,134
759	14,5	47,57218	7	15432,34	97	14370	201,0619	54987,4012	19795,4644
760	19,6	64,304464	6	13227,72	102	14236	201,0619	42384,0822	15258,2696
761	28,2	92,519688	5	11023,1	114	13800	201,0619	31921,0694	11491,585
762	40,7	133,530188	3	6613,86	88	14652	201,0619	18128,8382	6526,38176
763	51,5	168,96326	1	2204,62	56	15769	201,0619	9805,43649	3529,95714
764	39,2	128,608928	4	8818,48	81	14916	201,0619	17649,3199	6353,75518
765	20,9	68,569556	3	6613,86	73	15184	201,0619	30327,0487	10917,7375
766	19,1	62,664044	2	4409,24	45	11565	201,0619	15585,9162	5610,92984
767	70,6	231,627304	7	15432,34	143	13541	201,0619	15743,4761	5667,6514
768	68,3	224,081372	9	19841,58	164	12757	201,0619	17595,8519	6334,50668
769	28,5	93,50394	10	22046,2	138	13580	201,0619	37670,0357	13561,2129
770	23,4	76,771656	7	15432,34	103	9538	201,0619	24058,1659	8660,93974
771	62,7	205,708668	8	17636,96	154	13312	201,0619	18764,0925	6755,0733
772	59,3	194,553812	9	19841,58	166	14267	201,0619	22911,669	8248,20085
773	45,2	148,293968	10	22046,2	178	14106	201,0619	31840,4843	11462,5744
774	43,9	144,028876	11	24250,82	175	14370	201,0619	32841,5978	11822,9752
775	45,2	148,293968	11	24250,82	172	14660	201,0619	31986,0628	11514,9826
776	50,8	166,666672	10	22046,2	166	14846	201,0619	27820,5017	10015,3806
777	45,9	150,590556	10	22046,2	183	14124	201,0619	32275,2871	11619,1034
778	38,1	125,000004	9	19841,58	152	15544	201,0619	35521,0413	12787,5749
779	43,3	142,060372	9	19841,58	155	15441	201,0619	31671,6429	11401,7915
780	42,1	138,123364	10	22046,2	167	14940	201,0619	33961,3917	12226,101
781	42,8	140,419952	9	19841,58	157	15363	201,0619	32289,2026	11624,1129
782	38,2	125,328088	9	19841,58	160	15216	201,0619	36503,0255	13141,0892
783	37,7	123,687668	9	19841,58	159	15256	201,0619	36851,6603	13266,5977
784	44,2	145,013128	9	19841,58	162	15134	201,0619	31782,8686	11441,8327
785	41,9	137,467196	10	22046,2	161	15191	201,0619	33451,8508	12042,6663

Annexe

786	40,4	132,545936	9	19841,58	163	15092	201,0619	34880,2471	12556,889
787	38,5	126,31234	9	19841,58	157	15337	201,0619	35823,9442	12896,6199
788	40,5	132,87402	9	19841,58	164	15030	201,0619	34863,8146	12550,9733
789	49,3	161,745412	8	17636,96	144	15815	201,0619	26474,1609	9530,69791
790	59,8	196,194232	7	15432,34	128	16328	201,0619	20040,3072	7214,5106
791	82,5	270,6693	6	13227,72	106	16614	201,0619	12259,1152	4413,28149
792	21,3	69,881892	7	15432,34	98	10143	201,0619	26733,6122	9624,10038
793	35,5	116,46982	9	19841,58	160	13704	201,0619	35379,209	12736,5152
794	17	55,77428	5	11023,1	79	10069	201,0619	26782,4618	9641,68626
795	39,3	128,937012	8	17636,96	178	13354	201,0619	34636,6716	12469,2018
796	35,7	117,125988	7	15432,34	153	14387	201,0619	35296,7677	12706,8364
797	40,1	131,561684	7	15432,34	145	14681	201,0619	30399,975	10943,991
798	39,5	129,59318	7	15432,34	160	14136	201,0619	32784,1137	11802,2809
799	39,4	129,265096	8	17636,96	166	14187	201,0619	34230,4689	12322,9688
800	24,8	81,364832	5	11023,1	107	13456	201,0619	33217,0856	11958,1508
801	43,2	141,732288	8	17636,96	168	14615	201,0619	32553,0934	11719,1136
802	39,8	130,577432	8	17636,96	168	14595	201,0619	35278,2946	12700,1861
803	41,4	135,826776	8	17636,96	163	14778	201,0619	33322,9718	11996,2699
804	43,8	143,700792	8	17636,96	167	14625	201,0619	31939,5422	11498,2352
805	43,4	142,388456	8	17636,96	172	14415	201,0619	32720,1498	11779,2539
806	42,9	140,748036	8	17636,96	172	14365	201,0619	32985,9728	11874,9502
807	37,8	124,015752	8	17636,96	166	14645	201,0619	36824,553	13256,8391
808	38,2	125,328088	8	17636,96	172	14371	201,0619	37049,0953	13337,6743
809	35,7	117,125988	7	15432,34	159	14869	201,0619	37904,1749	13645,503
810	41,5	136,15486	8	17636,96	166	14591	201,0619	33425,8394	12033,3022
811	40,9	134,186356	8	17636,96	178	14012	201,0619	34920,8798	12571,5167
812	40,7	133,530188	8	17636,96	170	14375	201,0619	34384,9001	12378,564
813	42,1	138,123364	8	17636,96	172	14302	201,0619	33464,0955	12047,0744
814	43	141,07612	8	17636,96	171	14297	201,0619	32564,1752	11723,1031
815	43,3	142,060372	7	15432,34	167	14481	201,0619	31979,1419	11512,4911
816	39,2	128,608928	7	15432,34	159	14773	201,0619	34304,3043	12349,5496
817	39,9	130,905516	7	15432,34	166	14521	201,0619	34585,389	12450,74
818	42,7	140,091868	7	15432,34	171	14291	201,0619	32767,657	11796,3565
819	40,7	133,530188	7	15432,34	157	14862	201,0619	32824,2851	11816,7426
820	37,8	124,015752	7	15432,34	155	14953	201,0619	35100,6371	12636,2293
821	41,8	137,139112	7	15432,34	172	14316	201,0619	33725,5801	12141,2088
822	41,8	137,139112	7	15432,34	168	14545	201,0619	33468,7814	12048,7613
823	10	32,8084	6	13227,72	101	11890	201,0619	68661,8679	24718,2724
824	7,9	25,918636	8	17636,96	151	14430	201,0619	157635,484	56748,7744
825	34	111,54856	7	15432,34	139	14852	201,0619	34759,7724	12513,5181
826	35,7	117,125988	7	15432,34	143	14714	201,0619	33742,9956	12147,4784
827	39,2	128,608928	8	17636,96	155	14061	201,0619	31846,0668	11464,5841
828	41,1	134,842524	8	17636,96	158	14984	201,0619	32990,9912	11876,7568
829	42,2	138,451448	8	17636,96	172	14286	201,0619	33347,7541	12005,1915

Annexe

830	42,9	140,748036	8	17636,96	172	14274	201,0619	32777,5676	11799,9243
831	39	127,95276	8	17636,96	164	14867	201,0619	35798,4421	12887,4391
832	41,3	135,498692	9	19841,58	172	14698	201,0619	35063,6168	12622,9021
833	40,3	132,217852	9	19841,58	176	14438	201,0619	36115,948	13001,7413
834	36,6	120,078744	8	17636,96	163	14509	201,0619	36997,3804	13319,0569
835	32,1	105,314964	8	17636,96	150	14549	201,0619	38922,0146	14011,9252
836	32,9	107,939636	7	15432,34	142	14837	201,0619	36655,9879	13196,1557
837	33,5	109,90814	7	15432,34	147	14645	201,0619	36784,521	13242,4276
838	35,9	117,782156	7	15432,34	147	14867	201,0619	34849,7644	12545,9152
839	40	131,2336	8	17636,96	164	14962	201,0619	35128,1604	12646,1377
840	42,3	138,779532	8	17636,96	170	14831	201,0619	34134,4211	12288,3916
841	44,2	145,013128	8	17636,96	177	14392	201,0619	33008,3544	11883,0076
842	43,2	141,732288	8	17636,96	173	14626	201,0619	33544,4872	12076,0154
843	41,7	136,811028	8	17636,96	168	14898	201,0619	34372,1746	12373,9829
844	40,3	132,217852	8	17636,96	164	15097	201,0619	35181,1248	12665,2049
845	32,1	105,314964	9	19841,58	148	14915	201,0619	39379,093	14176,4735
846	30,6	100,393704	7	15432,34	139	14787	201,0619	38444,7847	13840,1225
847	43,2	141,732288	8	17636,96	168	14550	201,0619	32408,7041	11667,1335
848	44,2	145,013128	8	17636,96	171	14383	201,0619	31872,5117	11474,1042
849	44,6	146,325464	8	17636,96	168	14511	201,0619	31310,2299	11271,6828
850	45,5	149,27822	8	17636,96	172	14307	201,0619	30980,8331	11153,0999
851	24,3	79,724412	5	11023,1	103	11443	201,0619	27760,3829	9993,73786
852	37,3	122,375332	7	15432,34	155	13952	201,0619	33194,0902	11949,8725
853	38,3	125,656172	7	15432,34	151	14237	201,0619	32138,9099	11570,0076
854	41,1	134,842524	8	17636,96	165	13865	201,0619	31882,6625	11477,7585
855	38,1	125,000004	8	17636,96	162	13689	201,0619	33335,1294	12000,6466
856	41,8	137,139112	8	17636,96	174	13269	201,0619	31638,2899	11389,7844
857	40,1	131,561684	8	17636,96	168	13740	201,0619	32968,9224	11868,8121
858	36	118,11024	8	17636,96	161	13773	201,0619	35271,9436	12697,8997
859	34,9	114,501316	8	17636,96	152	14444	201,0619	36021,3995	12967,7038
860	38,5	126,31234	8	17636,96	162	13991	201,0619	33715,5691	12137,6049
861	31,5	103,34646	8	17636,96	142	14737	201,0619	38035,1985	13692,6715
862	27,4	89,895016	8	17636,96	137	14315	201,0619	40972,0992	14749,9557
863	38,3	125,656172	8	17636,96	152	13647	201,0619	31024,7097	11168,8955
864	33,8	110,892392	8	17636,96	154	13527	201,0619	35292,4939	12705,2978
865	23,5	77,09974	5	11023,1	104	15367	201,0619	38901,2111	14004,436
866	32,5	106,6273	6	13227,72	134	14345	201,0619	33850,3324	12186,1197
867	34,2	112,204728	7	15432,34	140	14099	201,0619	33044,2759	11895,9393
868	35,4	116,141736	7	15432,34	145	13917	201,0619	32638,406	11749,8262
869	36,9	121,062996	7	15432,34	151	13685	201,0619	32065,075	11543,427
870	33,8	110,892392	7	15432,34	153	13589	201,0619	35213,2373	12676,7654
871	26,2	85,958008	7	15432,34	135	14301	201,0619	42168,3067	15180,5904
872	17,4	57,086616	6	13227,72	102	15467	201,0619	51856,643	18668,3915
873	21,8	71,522312	5	11023,1	111	15163	201,0619	44155,7476	15896,0691

Annexe

874	15,4	50,524936	7	15432,34	105	15368	201,0619	59929,2122	21574,5164
875	11,5	37,72966	9	19841,58	104	15136	201,0619	78287,1474	28183,3731
876	12,3	40,354332	10	22046,2	112	14272	201,0619	74342,1013	26763,1565
877	12,8	41,994752	9	19841,58	90	11538	201,0619	46439,0153	16718,0455
878	14	45,93176	11	24250,82	132	12542	201,0619	67668,0317	24360,4914
879	15,8	51,837272	12	26455,44	138	12304	201,0619	61516,8786	22146,0763
880	15,2	49,868768	11	24250,82	135	12419	201,0619	63125,3021	22725,1088
881	17,2	56,430448	12	26455,44	143	12118	201,0619	57680,1569	20764,8565
882	15,4	50,524936	12	26455,44	138	12296	201,0619	63070,3528	22705,327
883	15,2	49,868768	11	24250,82	137	12327	201,0619	63585,0513	22890,6185
884	16	52,49344	12	26455,44	145	12057	201,0619	62545,7689	22516,4768
885	14,7	48,228348	11	24250,82	134	12465	201,0619	65025,2629	23409,0947
886	14,6	47,900264	11	24250,82	133	12473	201,0619	65023,7626	23408,5545
887	14,6	47,900264	12	26455,44	137	12339	201,0619	66268,4636	23856,6469
888	10,6	34,776904	9	19841,58	109	13377	201,0619	78672,0612	28321,942
889	11,7	38,385828	9	19841,58	108	13429	201,0619	70905,9177	25526,1304
890	11,4	37,401576	9	19841,58	110	13387	201,0619	73883,527	26598,0697
891	11,4	37,401576	9	19841,58	109	13444	201,0619	73524,0653	26468,6635
892	13,9	45,603676	11	24250,82	123	12944	201,0619	65547,2926	23597,0254
893	15,9	52,165356	12	26455,44	139	12333	201,0619	61717,6453	22218,3523
894	14,9	48,884516	12	26455,44	137	12443	201,0619	65483,0636	23573,9029
895	16,5	54,13386	11	24250,82	133	12574	201,0619	58015,1012	20885,4364
896	15,5	50,85302	11	24250,82	133	12595	201,0619	61853,1578	22267,1368
897	18,3	60,039372	5	11023,1	85	8538	201,0619	22707,5283	8174,71017
898	53,3	174,868772	5	11023,1	162	14910	201,0619	25940,6195	9338,62303
899	53,8	176,509192	6	13227,72	164	15211	201,0619	26551,7298	9558,62273
900	50,6	166,010504	6	13227,72	165	15132	201,0619	28251,2943	10170,4659
901	47,4	155,511816	8	17636,96	180	14525	201,0619	31594,6692	11374,0809
902	44,2	145,013128	6	13227,72	168	14916	201,0619	32450,1589	11682,0572
903	46,9	153,871396	5	11023,1	152	15662	201,0619	29049,2177	10457,7184
904	31,4	103,018376	4	8818,48	115	14819	201,0619	31045,3912	11176,3408
905	34,8	114,173232	6	13227,72	140	14104	201,0619	32476,3953	11691,5023
906	45,8	150,262472	1	2204,62	20	14200	201,0619	3552,96787	1279,06843
907	49,1	161,089244	8	17636,96	169	14955	201,0619	29490,4514	10616,5625
908	45,5	149,27822	7	15432,34	162	15453	201,0619	31504,4458	11341,6005
909	51,6	169,291344	8	17636,96	177	14893	201,0619	29268,8295	10536,7786
910	51,2	167,979008	8	17636,96	174	14994	201,0619	29194,4113	10509,9881
911	52,7	172,900268	7	15432,34	178	14815	201,0619	28659,7077	10317,4948
912	58,2	190,944888	7	15432,34	179	14736	201,0619	25965,1846	9347,46644
913	54,9	180,118116	7	15432,34	173	15038	201,0619	27144,9868	9772,19524
914	54,9	180,118116	7	15432,34	172	15119	201,0619	27133,4793	9768,05256
915	59,7	195,866148	6	13227,72	166	15329	201,0619	24412,6876	8788,56754
916	57,4	188,320216	6	13227,72	167	15299	201,0619	25490,9487	9176,74152
917	58,5	191,92914	6	13227,72	170	15178	201,0619	25260,1687	9093,66072

Annexe

918	34,1	111,876644	3	6613,86	86	11639	201,0619	16799,9115	6047,96814
919	77,6	254,593184	5	11023,1	135	14031	201,0619	13997,8406	5039,22263
920	97,3	319,225732	5	11023,1	137	15332	201,0619	12385,9465	4458,94074
921	74,9	245,734916	6	13227,72	171	14999	201,0619	19625,9608	7065,34589
922	61,1	200,459324	5	11023,1	150	15946	201,0619	22416,1667	8069,82001
923	65,1	213,582684	6	13227,72	173	15087	201,0619	22967,2965	8268,22674
924	67,3	220,800532	6	13227,72	174	15024	201,0619	22253,6699	8011,32115
925	63,6	208,661424	5	11023,1	166	15348	201,0619	22937,0795	8257,34863
926	61,8	202,755912	6	13227,72	168	15294	201,0619	23814,386	8573,17897
927	64,3	210,958012	5	11023,1	153	14918	201,0619	20331,0503	7319,17812
928	64,8	212,598432	5	11023,1	150	14481	201,0619	19202,271	6912,81757
929	63,1	207,021004	4	8818,48	139	13602	201,0619	17159,1499	6177,29397
930	60,9	199,803156	5	11023,1	151	14447	201,0619	20516,1322	7385,80759
931	70,1	229,986884	5	11023,1	149	14479	201,0619	17634,1771	6348,30375
932	67,1	220,144364	5	11023,1	136	15071	201,0619	17503,1806	6301,14502
933	58,9	193,241476	3	6613,86	85	11252	201,0619	9308,22561	3350,96122
934	82	269,02888	6	13227,72	149	14413	201,0619	15025,4886	5409,17588
935	79,1	259,514444	6	13227,72	148	14483	201,0619	15544,6796	5596,08466
936	77,5	254,2651	6	13227,72	151	14333	201,0619	16017,5419	5766,31509
937	72,7	238,517068	6	13227,72	165	13789	201,0619	17942,1194	6459,16298
938	75,1	246,391084	6	13227,72	153	14258	201,0619	16658,073	5996,90628
939	76,6	251,312344	5	11023,1	146	14525	201,0619	15868,6261	5712,70539
940	81,4	267,060376	6	13227,72	144	14618	201,0619	14837,2045	5341,39361
941	72,4	237,532816	6	13227,72	172	14066	201,0619	19153,6191	6895,30288
942	56,2	184,383208	6	13227,72	155	14960	201,0619	23633,806	8508,17015
943	60,6	198,818904	6	13227,72	150	15193	201,0619	21546,9742	7756,91071
944	57,3	187,992132	5	11023,1	147	15301	201,0619	22477,0433	8091,7356
945	65,5	214,89502	6	13227,72	166	14568	201,0619	21155,1192	7615,84293
946	58,5	191,92914	6	13227,72	161	14729	201,0619	23220,4986	8359,37949
947	65,6	215,223104	5	11023,1	151	15098	201,0619	19906,1078	7166,19881
948	66	216,53544	5	11023,1	159	14855	201,0619	20496,7548	7378,83174
949	63,2	207,349088	5	11023,1	155	14943	201,0619	20988,644	7555,91184
950	57,7	189,304468	6	13227,72	168	14457	201,0619	24109,8442	8679,5439
951	62,7	205,708668	6	13227,72	164	14607	201,0619	21889,7413	7880,30685
952	69,1	226,706044	5	11023,1	166	14534	201,0619	19998,7781	7199,56012
953	66,2	217,191608	5	11023,1	175	14162	201,0619	21439,4037	7718,18532
954	59,6	195,538064	5	11023,1	162	14742	201,0619	22943,5294	8259,6706
955	20,4	66,929136	2	4409,24	105	13387	201,0619	39380,4223	14176,952
956	54,4	178,477696	4	8818,48	165	14420	201,0619	25026,9618	9009,70624
957	55,5	182,08662	4	8818,48	158	15218	201,0619	24790,5852	8924,61068
958	43,2	141,732288	5	11023,1	154	15413	201,0619	31439,6857	11318,2868
959	13,7	44,947508	4	8818,48	138	13933	201,0619	80211,5213	28876,1477
960	12,6	41,338584	5	11023,1	92	11878	201,0619	49594,8999	17854,164
961	83,5	273,95014	3	6613,86	103	13797	201,0619	9754,35421	3511,56752

Annexe

962	82,3	270,013132	4	8818,48	119	13386	201,0619	11099,7571	3995,91257
963	13,7	44,947508	8	17636,96	107	9552	201,0619	42701,845	15372,6642
964	62,2	204,068248	3	6613,86	107	12966	201,0619	12773,6586	4598,51711
965	26,9	88,254596	8	17636,96	121	14218	201,0619	36619,2322	13182,9236
966	15,7	51,509188	12	26455,44	143	13231	201,0619	68969,0826	24828,8698
967	15,6	51,181104	12	26455,44	149	12603	201,0619	68890,9135	24800,7288
968	17,7	58,070868	11	24250,82	147	12750	201,0619	60605,9798	21818,1527
969	53	173,88452	6	13227,72	141	13978	201,0619	21307,2481	7670,60932
970	51,6	169,291344	5	11023,1	137	14036	201,0619	21341,6198	7682,98313
971	50,6	166,010504	6	13227,72	140	13964	201,0619	22134,8282	7968,53814
972	21	68,89764	11	24250,82	136	13545	201,0619	50227,1848	18081,7865
973	19,2	62,992128	11	24250,82	147	13294	201,0619	58259,6517	20973,4746
974	20,1	65,944884	6	13227,72	83	8626	201,0619	20412,1879	7348,38766
975	62,1	203,740164	4	8818,48	126	14076	201,0619	16357,6268	5888,74567
976	55	180,4462	6	13227,72	123	14582	201,0619	18693,3324	6729,59965
977	26,4	86,614176	7	15432,34	111	14221	201,0619	34231,0432	12323,1755
978	17,2	56,430448	6	13227,72	96	8089	201,0619	25854,7406	9307,70662
979	29,9	98,097116	7	15432,34	132	13231	201,0619	33441,7806	12039,041
980	38,7	126,968508	5	11023,1	131	14171	201,0619	27455,2236	9883,88048
981	31,9	104,658796	5	11023,1	105	14341	201,0619	27018,1908	9726,54867
982	30,1	98,753284	8	17636,96	139	13749	201,0619	36355,0401	13087,8145
983	21,3	69,881892	6	13227,72	104	9140	201,0619	25557,3246	9200,63684
984	41,8	137,139112	7	15432,34	141	14114	201,0619	27271,7505	9817,83018
985	58,9	193,241476	4	8818,48	110	14683	201,0619	15707,3393	5654,64214
986	33,4	109,580056	9	19841,58	120	14211	201,0619	29263,2473	10534,769
987	15,2	49,868768	11	24250,82	131	12988	201,0619	64059,6444	23061,472
988	35,7	117,125988	4	8818,48	82	11871	201,0619	15618,8935	5622,80165
989	70	229,6588	3	6613,86	87	14497	201,0619	10324,7912	3716,92483
990	79,7	261,482948	4	8818,48	91	14513	201,0619	9509,20189	3423,31268
991	68,8	225,721792	4	8818,48	101	14350	201,0619	12077,0529	4347,73906
992	41,7	136,811028	7	15432,34	129	13516	201,0619	23960,2502	8625,69009
993	15,9	52,165356	9	19841,58	109	14336	201,0619	56236,2303	20245,0429
994	23,8	78,083992	7	15432,34	122	13992	201,0619	41046,0718	14776,5859
995	49,6	162,729664	6	13227,72	122	13959	201,0619	19678,089	7084,11205
996	36,6	120,078744	8	17636,96	150	13539	201,0619	31782,8699	11441,8332
997	38,2	125,328088	6	13227,72	106	13823	201,0619	21975,7133	7911,25678
998	19,5	63,97638	10	22046,2	124	13689	201,0619	49832,3665	17939,6519
999	11,7	38,385828	12	26455,44	118	13176	201,0619	76037,5237	27373,5085
1000	18,8	61,679792	9	19841,58	136	12853	201,0619	53209,3352	19155,3607
1001	31,8	104,330712	7	15432,34	163	13015	201,0619	38183,3995	13746,0238
1002	26,7	87,598428	8	17636,96	151	13526	201,0619	43782,6573	15761,7566
1003	23,3	76,443572	9	19841,58	139	13825	201,0619	47209,4406	16995,3986
1004	28,2	92,519688	8	17636,96	138	13027	201,0619	36501,8921	13140,6812
1005	39,7	130,249348	6	13227,72	124	13046	201,0619	23341,5891	8402,97208

Annexe

1006	43,8	143,700792	9	19841,58	171	12384	201,0619	27715,8432	9977,70354
1007	32,9	107,939636	8	17636,96	150	12175	201,0619	31795,1015	11446,2366
1008	31,9	104,658796	6	13227,72	173	12362	201,0619	38360,6258	13809,8253
1009	17,7	58,070868	6	13227,72	174	12396	201,0619	69672,9005	25082,2442
1010	38,2	125,328088	8	17636,96	166	12243	201,0619	30477,5746	10971,9268
1011	24,9	81,692916	8	17636,96	168	12119	201,0619	46793,7304	16845,743
1012	18,8	61,679792	4	8818,48	153	12913	201,0619	60072,263	21626,0147
1013	20,8	68,241472	6	13227,72	150	13383	201,0619	55194,4526	19870,003
1014	17,5	57,4147	4	8818,48	139	12011	201,0619	54538,2726	19633,7781
1015	20,9	68,569556	9	19841,58	151	13471	201,0619	55692,5092	20049,3033
1016	15	49,2126	6	13227,72	149	13634	201,0619	77425,415	27873,1494
1017	41,8	137,139112	8	17636,96	136	13502	201,0619	25180,962	9065,14631
1018	34,4	112,860896	7	15432,34	85	12867	201,0619	18237,5069	6565,50248
1019	33,4	109,580056	5	11023,1	149	12909	201,0619	32949,7163	11861,8979
1020	27,4	89,895016	4	8818,48	148	12621	201,0619	38984,3108	14034,3519
1021	32,8	107,611552	10	22046,2	151	13519	201,0619	35659,9867	12837,5952
1022	24	78,74016	6	13227,72	165	14137	201,0619	55582,7933	20009,8056
1023	30,5	100,06562	5	11023,1	153	13143	201,0619	37714,9843	13577,3944
1024	24,9	81,692916	6	13227,72	146	13467	201,0619	45170,3471	16261,325
1025	52,1	170,931764	6	13227,72	144	13663	201,0619	21636,6214	7789,18369
1026	62,5	205,0525	9	19841,58	172	13139	201,0619	20752,809	7471,01125
1027	61,4	201,443576	5	11023,1	155	12288	201,0619	17773,8808	6398,59709
1028	43,4	142,388456	4	8818,48	150	13979	201,0619	27641,6107	9950,97986
1029	49,8	163,385832	4	8818,48	147	13663	201,0619	23081,0822	8309,18961
1030	42,5	139,4357	3	6613,86	166	13494	201,0619	30139,0934	10850,0736
1031	37,4	122,703416	5	11023,1	161	13428	201,0619	33073,6534	11906,5152
1032	35,4	116,141736	4	8818,48	151	14923	201,0619	36404,0278	13105,45
1033	55,5	182,08662	5	11023,1	159	12032	201,0619	19744,4757	7108,01126
1034	90,5	296,91602	7	15432,34	155	12731	201,0619	12531,6958	4511,4105
1035	74,7	245,078748	7	15432,34	168	11784	201,0619	15215,067	5477,42411
1036	82,1	269,356964	5	11023,1	164	14551	201,0619	16657,94	5996,85841
1037	40,1	131,561684	5	11023,1	166	13780	201,0619	32639,1693	11750,1009
1038	58,1	190,616804	2	4409,24	175	14221	201,0619	24489,3462	8816,16462
1039	37,5	123,0315	4	8818,48	162	13919	201,0619	34390,783	12380,6819
1040	49,7	163,057748	5	11023,1	105	14245	201,0619	17245,4398	6208,35834
1041	38,9	127,624676	9	19841,58	165	14691	201,0619	35693,091	12849,5127
1042	36,5	119,75066	8	17636,96	158	14277	201,0619	35389,551	12740,2383
1043	35,5	116,46982	8	17636,96	154	13820	201,0619	34332,6639	12359,759
1044	52,1	170,931764	8	17636,96	138	13827	201,0619	21007,8976	7562,84313
1045	29,2	95,800528	7	15432,34	92	14600	201,0619	26352,4298	9486,87474
1046	48,6	159,448824	8	17636,96	103	13953	201,0619	16979,0788	6112,46835
1047	22,4	73,490816	4	8818,48	119	14484	201,0619	43996,3532	15838,6871
1048	20,1	65,944884	6	13227,72	107	13749	201,0619	41873,3561	15074,4082
1049	26,7	87,598428	9	19841,58	107	13917	201,0619	31956,3682	11504,2926

Annexe

1050	15	49,2126	9	19841,58	121	13876	201,0619	64036,009	23052,9633
1051	39	127,95276	7	15432,34	143	13522	201,0619	28397,7437	10223,1877
1052	13,7	44,947508	7	15432,34	149	13443	201,0619	83590,4994	30092,5798
1053	10,4	34,120736	7	15432,34	147	13092	201,0619	105779,447	38080,601
1054	84,3	276,574812	6	13227,72	141	13007	201,0619	12492,7447	4497,38808
1055	73,2	240,157488	7	15432,34	137	12714	201,0619	13668,8915	4920,80094
1056	84,7	277,887148	7	15432,34	140	13950	201,0619	13247,6372	4769,1494
1057	97,4	319,553816	7	15432,34	136	14064	201,0619	11293,9647	4065,82728
1058	86,9	285,104996	6	13227,72	147	14839	201,0619	14404,1088	5185,47917
1059	54,5	178,80578	6	13227,72	83	14444	201,0619	12630,8656	4547,11162
1060	122,5	401,9029	4	8818,48	126	11372	201,0619	6725,25792	2421,09285
1061	105	344,4882	6	13227,72	123	13872	201,0619	9347,98996	3365,27639
1062	122,5	401,9029	6	13227,72	111	14391	201,0619	7514,37679	2705,17565
1063	77,6	254,593184	6	13227,72	96	14088	201,0619	10021,1022	3607,5968
1064	27,1	88,910764	6	13227,72	132	14142	201,0619	39412,781	14188,6012
1065	44,5	145,99738	6	13227,72	131	13919	201,0619	23471,1522	8449,61481
1066	82,1	269,356964	4	8818,48	105	14510	201,0619	10643,9511	3831,82238
1067	126,8	416,010512	5	11023,1	139	13826	201,0619	8712,23789	3136,40564
1068	47,5	155,8399	6	13227,72	104	14549	201,0619	18261,4963	6574,13865
1069	56,1	184,055124	5	11023,1	141	14462	201,0619	20817,3734	7494,25441
1070	41,4	135,826776	8	17636,96	110	14399	201,0619	21941,2057	7898,83404
1071	45,6	149,606304	7	15432,34	120	14703	201,0619	22178,0848	7984,11052
1072	53	173,88452	8	17636,96	131	13941	201,0619	19770,4526	7117,36295
1073	92,4	303,149616	8	17636,96	82	14330	201,0619	7351,85783	2646,66882
1074	122,7	402,559068	8	17636,96	87	14200	201,0619	5838,92732	2102,01384
1075	100,2	328,740168	7	15432,34	91	14254	201,0619	7471,21455	2689,63724
1076	69,5	228,01838	7	15432,34	101	14574	201,0619	12174,6933	4382,88959
1077	35,5	116,46982	6	13227,72	129	14285	201,0619	29716,6744	10698,0028
1078	75,3	247,047252	7	15432,34	109	14440	201,0619	12016,4916	4325,93697
1079	51,1	167,650924	8	17636,96	122	15203	201,0619	20820,8212	7495,49562
1080	69,1	226,706044	7	15432,34	122	14358	201,0619	14556,8619	5240,47029
1081	57,5	188,6483	5	11023,1	150	13448	201,0619	20093,8766	7233,79556
1082	12,6	41,338584	3	6613,86	106	13186	201,0619	63397,167	22822,9801
1083	55,7	182,742788	5	11023,1	124	12433	201,0619	15865,0652	5711,42347
1084	72,5	237,8609	3	6613,86	118	12517	201,0619	11669,8753	4201,15512
1085	31,5	103,34646	6	13227,72	136	13748	201,0619	33970,8041	12229,4895
1086	58,9	193,241476	6	13227,72	163	10046	201,0619	15946,1932	5740,62955
1087	41,8	137,139112	4	8818,48	151	14019	201,0619	28971,55	10429,758
1088	37	121,39108	5	11023,1	139	14064	201,0619	30234,7382	10884,5057
1089	54,2	177,821528	8	17636,96	138	14252	201,0619	20815,4458	7493,56048
1090	45,4	148,950136	8	17636,96	171	14246	201,0619	30737,6329	11065,5478
1091	65,5	214,89502	7	15432,34	150	13989	201,0619	18375,9789	6615,35239
1092	87,2	286,089248	6	13227,72	173	13424	201,0619	15278,5356	5500,27281
1093	24,5	80,38058	5	11023,1	174	13471	201,0619	54703,4269	19693,2337

Annexe

---

1094	55	180,4462	3	6613,86	166	13847	201,0619	23905,3534	8605,92722
1095	34,7	113,845148	1	2204,62	168	13506	201,0619	37361,9975	13450,3191
1096	32,9	107,939636	4	8818,48	153	13412	201,0619	35671,3423	12841,6832
1097	53,1	174,212604	3	6613,86	150	12685	201,0619	20501,2652	7380,45546
1098	49,5	162,40158	2	4409,24	139	11710	201,0619	18804,8259	6769,73732
1099	31,5	103,34646	7	15432,34	151	12331	201,0619	33841,2875	12182,8635
1100	49	160,76116	9	19841,58	149	13664	201,0619	23832,3104	8579,63174