

UNIVERSITE DE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des hydrocarbures des énergies renouvelables des sciences de la terre
et de l'univers

Département de forage et mécanique des chantiers pétroliers



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme en

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : sciences et technologies

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Forage

Présenté par :

SOBHI Brahim

CHELLAL Brahim

GHOUL Hichem

Thème:

Optimisation des paramètres mécaniques de forage (WOB
et RPM) application au champs de Hassi Messaoud dans
la phase 16'' et 6''

Soutenu le : 24/06/2018

Devant le Jury :

M. Abbas Hadj Abbas

Président

UKM Ouargla

M. ABIDI SAAD Elfakeur

Encadreur

UKM Ouargla

M. Moulay Khalil Ibrahim

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire : 2017/2018



Remerciement

*Nous tenons à remercier en premier lieu Allah
le tout puissant qui a fait que ce travail soit terminé ;*

*En achevant ce modeste travail, nous remercions
vivement notre promoteur chargé du suivi notre travail :*

Mr, ABIDI SAAD ELFAKEUR

Pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité.

*Nous adressons notre gratitude à Dr . ZIANI MOHAMED « Ingénieur dans le
centre de recherche de l'énergie renouvelable de GHARDAIA » pour toute
l'attention et l'aide qu'il nous a accordés, aussi bien les discussions que nous avons
eu, ses paroles, ses conseils et ses critiques à guider nos réflexions.*

*Nous voudrions présenter nos sincères reconnaissances à tous les enseignants de la
faculté des hydrocarbures, qui ont assuré notre formation durant tout le cycle
d'étude.*

*Enfin, on ne pouvait pas mentionner tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'élaboration de ce travail, que tous ceux qui nous ont aidé d'un
simple encouragement trouvent ici l'expression de nos
reconnaisances les plus sincère.*

SOBHI , CHELLAL , GHOUL .



Résumé :

Nous présentons dans notre travail une approche d'optimisation des paramètres mécaniques de forage, principalement le poids appliqué sur l'outil et la vitesse de rotation afin de minimiser le prix de mètres foré. L'optimisation est faite par la construction des modèles mathématiques en se basant sur l'équation d'Eckel, et la théorie de l'énergie spécifique proposé par Teal, alors que l'usure de l'outil de forage est optimisée sur la base de l'équation de Hareland et Rampersad.

Une application du modèle a été réalisée sur deux puits situés dans le champ de Hassi Massouad.

Les résultats obtenus montrent des possibilités de gain, qui sont non négligeables, de l'ordre de 26-38 % sur le prix total de forage.

Mots clés : Forage, paramètres mécaniques, optimisation, vitesse d'avancement, poids sur l'outil, vitesse de rotation, model adaptatif.

Abstract:

We present in our work an approach of optimization of the mechanical parameters of drilling, mainly the weight applied on the bit and the speed of rotation in order to minimize the coast of drilled meter . Optimization is done by constructing mathematical models based on Eckel's equation, and Teal's specific energy theory, while drill tool wear is optimized on the basis of the Harland equation.

An application of the model was carried out on two wells located in the field of Hassi Messouad.

The results obtained show a potential gain, which is significant, of around 26-38% on the total price of drilling.

Keywords: Drilling, mechanical parameters, optimization, speed of rotation, weight on bit, adaptive model.

ملخص:

نقدم في عملنا تقاربا أمثليا لمعلمات الحفر الميكانيكية، أساسا الوزن المطبق على أداة الحفر و سرعة دورانها من أجل تخفيض تكلفة حفر المتر الواحد. اعتمدنا في هذه الدراسة على معادلات رياضية لكل من إيكل ، ونظرية الطاقة المحددة التي اقترحها تيل، وتم استعمال نموذج هارلند من اجل توقع التآكل. تم إجراء تطبيق النموذج على بئرين يقعان في حاسي مسعود، تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من إمكانية ربح حوالي 26-38% من التكلفة الإجمالية.

الكلمات الدلالية : الحفر, المعلمات الميكانيكية, التحسين, سرعة الدوران, الثقل عل رأس الحفر, رأس الحفرة,

Sommaire

REMERCIEMENT.....	I
DEDICACE.....	II
RESUME.....	III
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEUX.....	VI
NOMENCLATURES	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3

CHAPITRES I : Généralité sur les outils de forage

I.1. Introduction	7
I.2. Les différents types des outils	7
I.2.1. Les outils à molettes (roller bits)	7
I.2.1.1. Géométrie des cônes	8
I.2.1.2. Les roulements	9
I.2.1.3 . Système de lubrification	10
I.2.1.4. L'hydraulique à l'outil	10
I.2.1.5. Les éléments de coupe	11
I.2.1.6. Mode de destruction de la roche	12
I.2.1.7. Classification IADC des outils à molettes	13
I.2.2. Les outils diamantés	14
I.2.2.1. Le diamant	14
I.2.2.2. Types d'outils diamantés	14
I.2.2.2.1. Mode de destruction de la roche.....	14
I.2.2.2.2. Les outils a diamant naturel	15
I.2.2.2.3. Les outils au diamant synthétique	15
I.2.2.2.3.1. Diamant synthétique basse température (PDC)	16
I.2.2.2.3.2. Diamant synthétique haute température (TSD)	20
I.2.2.2.3.3. Outil hybride	20
I.2.2.3. Classification IADC des outils diamants	21
I.2.3. L'usure des outils	21

I.3. Conclusion	26
-----------------------	----

CHAPITRE II : Interaction outil-roche

II.1. Introduction	27
II.2. Caractéristique des roches en tant que matériaux à détruire	27
II.2.1. Dureté	27
II.2.2. Fragilité et plasticité	31
II.2.3. Abrasivité	32
II.3. Attaque de la roche par l'outil	33
II.3.1. Pénétration et écrasement	33
II.3.2. Coupe	33
II.3.3. Percussion	34
II.3.4. Abrasion	34
II.3.5. Erosion	35
II.4. Attaque de l'outil par la roche	35
II.4.1. Réactions de la roche sur l'outil	35
II.4.2. Usures des parties actives de l'outil	35
II.5. Conclusion.....	36

CHAPITRES III Les paramètres de forage

III.1. Introduction.....	37
III.2. Les différents paramètres de forages.....	37
III.2.1. Les paramètres mécaniques.....	37
III.2.1.1. Type de l'outil.....	37
III.2.1.2. Poids sur l'outil.....	37
III.2.1.3. Vitesse de rotation	39
III.2.1.3. Torque	39
III.2.2. Paramètres hydrauliques.....	40
III.2.2.1. Débit et pression d'injection.....	40
III.2.2.2. Vitesse minimale aux duses.....	40
III.2.2.3. La nature de fluide de forage.....	40
III.2.2.4. Les caractéristiques de la boue	41
III.2.2.4.1. Densité.....	41
III.2.2.4.2. Viscosité.....	41

III.2.2.4.3. Pourcentage des solides dans la boue.....	41
III.3. Les paramètres affectant sur la vitesse d'avancement.....	42
III.3.1. L'effet des paramètres controlables	42
III.3.1.1. L'effet de Type de l'outil sur la ROP	42
III.3.1.2. L'effet de WOB sur la ROP	43
III.3.1.3. L'effet de RPM sur la ROP.....	44
III.3.1.4. L'effet du nettoyage du front de taille sur la ROP.....	45
III.3.2. L'effet des paramètres non controlables	47
III.3.2.1. L'effet des caractéristiques de formation sur la ROP.....	47
III.3.2.2. L'effet du nature de fluide de forage sur la ROP.....	48
III.3.2.3. L'effet des caractéristiques de la boue sur la ROP	48
III.3.2.3.1. Densité	48
III.3.2. 3.2. Filtration	49
III.3.2.3.3. Viscosité.....	49
III.3.2. 3.4. Teneur en solide	50
III.3.2.4.L'usure de l'outil.....	50
III.4. Conclusion.....	51

CHAPITRE IV : L'optimisation des paramètres mécaniques de forage

IV.1. Introduction	52
IV.2. Définition de l'optimisation.....	52
IV.3. Les objectifs de l'optimisation.....	52
IV.4. Généralités sur l'Algorithme d'Optimisation (Gradient Réduit)	52
IV.4.1. Définition de base	53
IV.4.2. Problème de programmation non linéaire	54
IV.5. L'optimisation des paramètres mécaniques d'un outil PDC.....	55
IV.5.1. L'optimisation par l'utilisation du modèle d'Eckel.....	55
IV.5.1.1. Présentation de modèle	55
IV.5.1.2. Calcule des Coefficients C_f , k , a	56
IV.5.1.2.1. Calcule par la méthode Moider carré linéaire	56
IV.5.1.2.2. Calcule par la méthode de Moider carré non linéaire	57
IV.5.1.3. Détermination des paramètres mécanique (WOB et RPM) optimaux.....	58
IV.5.2. L'optimisation par l'utilisation du modèle de l'énergie spécifique	58
IV.5.2.1. Définition de l'Energie Spécifique (Es).....	59

IV.5.2.2. Principe de la théorie de l'énergie spécifique.....	59
IV.5.2.3. Concept de l'énergie spécifique minimal	59
IV.5.2.4. Calcule de CCS	59
IV.5.2.5. Détermination de l'UCS	59
IV.5.2.5.1. Détermination de l'UCS à l'aide des tests aux laboratoire	60
IV..5.2.5.2. Détermination de l'UCS à l'aide des logs.....	60
IV.5.2.6. Le modèle d'usure d'un outil PDC	61
IV.5.2.7.Méthode d'optimisation.....	61
IV.5.2.7.1. Le modèle d'optimisation.....	61
IV.5.2.7.2. Calcule des coefficients de formation (Cf, k, a).....	63
IV.5.2.7.3.Calcule des coefficients d'abrasivité et d'usure (A_{abr} , W_c).....	63
IV.5.2.7.4. Calcule de coefficient de glissement μ	64
IV.5.2.7.5.L'optimisation des paramètres mécaniques (WOB, RPM).....	64
IV.5.3. Les outils informatiques utilisées pour l'optimisation	64
IV.5.3.1. PDC drilling parameters optimizer	64
IV.5.3.1.1. L'organigramme de Logiciel	65
IV.5.3.1.2. Les données d'entrées et les sorties du logiciel	65
IV.5.3.2. L'outil solver	66
IV.6. Conclusion	67

CHAPITRE V: Application des modèles d'optimisation au champs de hassi

Messaoud

V.1. Situation géographique	68
V.2. Situation géologique	69
V.3. Caractéristiques du réservoir	70
V.4. Intérêt pétrolier.....	70
V.5. Lithologie du champ de Hassi Messaoud	70
V.6. Présentation des données des puits	77
V.6.1. Présentation des données de Puits A	77
V. 6.2. Présentation des données de Puits (B)	78
V.7. Application et interprétation des résultats	78
V.7.1. Aplication sur le puits A	79
V. 7.1.1 Présentation et interprétation de résultats des résultats obtenus par le modèle d'Eckel (puits A)	79

V. 7.2. Application sur le puits B	86
V.7.2.1. Présentation et interprétation des résultats obtenus par le modèle de l'Energie spécifique (puits B)	86
Conclusion générale.....	92
Recommandations	93
Références bibliographiques	94
ANNEXE.....	VII

Liste des figures

CHAPITRE I

Fig.I.1 : Outil à molette bicône	7
Fig.I.2 : Outil à molettes tricônes.....	7
Fig.I.3 : Nomenclature des tricônes.....	8
Fig.I.4 . Arrangement pour formation tendre	9
Fig.I.5 : Arrangement pour formation dure.....	9
Fig.I.6 : Outil conventionnel.....	10
Fig.I.7 : Outil à Duse	11
Fig.I.8 : Duses interchangeables	11
Fig.I.9 : Les dents pour terrain tendre	11
Fig.I.10 : Les dents pour terrain dure	12
Fig.I.11 : Outil renforcé sur le talon	12
Fig.I.12 : Outil à picots.....	12
Fig.I.13 : Mécanisme de destruction de la roche par les outils diamantés.....	15
Fig.I.14 : Outil à diamant naturel.....	15
Fig.I.15 : Un outil PDC	16
Fig.I.16 : Terminologie d'un outil PDC (corps en acier).....	18
Fig.I.17 : Terminologie d'un outil PDC (corps en matrice)	19
Fig.I.18 : Outil TSD	20
Fig.I.19 : Outils hybrides	20
Fig.I.20 :Codification de l'usure de l'outil	22

CHAPITRE II

Fig.II.1 : Résistance à la pénétration.....	29
Fig.II.2 :Détermination de l'UCS	30
Fig.II.2 : Mécanisme de la destruction de la roche fragile.....	32
Fig.II.3 : Empreinte laissée par un outil PDC.....	34
Fig.II.4 : Percusion.....	34
Fig.II.5 : Arrachage.....	34

CHAPITRE III

Fig. III. 1 : Poids sur l'outil.....	38
Fig. III. 2 : Capteur de fréquence RPM.....	39

Fig. III. 3 : Capteur de fréquence torque.....	40
Fig. III.4 : La variation de la vitesse d'avancement en fonction du WOB.....	43
Fig. III.5 : La variation de ROP en fonction de RPM.....	44
Fig. III. 6 : Effet du nettoyage du front de taille sur ROP.....	46
Fig. III. 7: Effet de la densité de la boue sur ROP.....	48
Fig. III. 8: Effet de la viscosité sur le ROP.....	49
Fig. III. 9: Effet de Teneur en solide sur le ROP.....	50

CHAPITRE IV

Fig. IV.1: Bloc schéma	53
Fig. IV.2. L'organigramme de Logiciel.....	65

CHAPITRE V

Fig. V. 1 : Carte géographique de l'Algérie	68
Fig. V. 2 : Situation géologique du champ Hassi Messaoud.....	69
Fig. V. 3 : Comparaison (WOB et RPM) réel et (WOB et RPM) optimal (linéaire).....	82
Fig. V. 4 : Comparaison (WOB et RPM) réel et (WOB et RPM) optimal (non linéaire)	83
Fig. V. 5 : Comparaison ROP réel et ROP optimal (linéaire).....	84
Fig. V. 6 : Comparaison entre le temps de forage réel et le temps optimal linéaire).....	84
Fig. V. 7 : Comparaison ROP réel et ROP optimal (non linéaire).....	85
Fig. V. 8 : Comparaison temps de forage réel et le temps optimal (non linéaire).....	85
Fig. V.9 : Les paramètres réels et les paramètres optimaux définis par le modèle d'ES.....	89
Fig. V. 10 : La comparaison entre le temps de forage réels et le temps optimal défini le modèle d'ES.....	90

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

Tableau. I. 1 : Evaluation d'usure des outils	22
Tableau. I. 2 : Types d'usure d'outil	23
Tableau. I. 3 : Localisation d'usure de l'outil	24
Tableau. I. 4 : Code des raisons de remonté de l'outil	25

CHAPITRE III

Tableau III.1: Résumé des variables de forage	43
------------------------------------------------------------	----

CHAPITRE IV

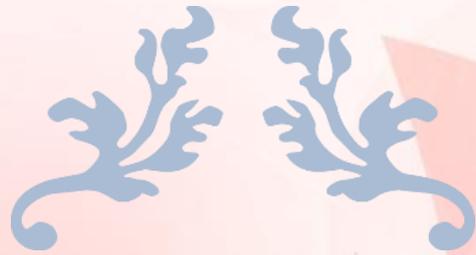
Tableau IV.1: Les coefficients de la corrélation pour les formations perméables et imperméable	60
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

CHAPITRE V

Tableau. V. 1 : La stratigraphie de champ de Hassi Messaoud	76
Tableau. V. 2 : Les données de l'outil utilisé 16''	77
Tableau. V. 3 : Présentation de l'usure des cutters outil 16''	77
Tableau. V. 4 : Les données des outils 6'' utilisées	78
Tableau. V. 5 : présentation de l'usure des dents et des raisons de la remontée.....	78
Tableau. V. 6 : Les résultats obtenus par le MMC linéaire (puit A)	80
Tableau. V. 7 : Les résultats obtenus par le MMC non linéaire (puit A)	81
Tableau. V. 8 : Résumé des résultats obtenus par MMC linéaire et non linéaire puits(A) ..	86
Tableau. V. 9 : Les paramètres réels et les paramètres optimaux défini par ES (puits B) ...	88
Tableau. V. 10 : L'usure et le temps de forage optimal (Puits B).....	89
Tableau. V. 11 : Résumé de résultats obtenu par le modèle d'ES (Puits B)	89
Tableau. V. 12 : L'usure réel et celle résultante de l'application des paramètres optimisé	92

Nomenclatures

ROP :	La vitesse d'avancement de l'outil de forage mesuré [m/hr].
D_b :	Le diamètre de l'outil [in].
WOB :	Le poids sur l'outil mesuré [tonne].
RPM:	La vitesse de rotation mesurée [tr/min].
C_f, k, a :	Les coefficients dépendant de la formation.
z :	La somme des erreurs quadratiques.
ROP_{opt} :	La vitesse d'avancement de l'outil de forage optimale [m/hr].
WOB_{opt} :	Le poids sur l'outil optimal [tonne].
RPM_{opt} :	La vitesse de rotation optimale [tr/min].
W_{ci} :	Coefficient d'usure dans le mètre i.
A_{abri} :	Le coefficient d'abrasivité de la roche dans le mètre i.
CS_i :	La résistance de la roche à la compression dans le mètre i [psi].
ES :	L'énergie spécifique [Psi].
ESmin :	L'énergie spécifique minimum [Psi].
EFFm:	L'efficacité mécanique maximum.
TQ :	Le torque de l'outil [lbs.ft].
W_f :	La fonction d'usure de cutter.
μ :	Le coefficient de glissement.
x_j :	La fonction du paramètre de forage j.
a_j :	Coefficient de la fonction x_j .
A_b :	Section du trou [in ²].
Tf :	Temps de forage [h].
CCS :	Résistance à la compression confinée [Psi].
USC :	Résistance à la compression non confinée [Psi].
$Y_{Observed}$:	La sortie réel.
$Y_{calculated}$:	La sortie donné par le modèle.
\bar{Y} :	La moyenne mathématique de sortie réel.
P_m :	Prix de mètre foré [KDA/m].
P_o :	Prix de l'outil de forage [KDA].
P_h :	Prix de location de l'appareil [KDA/hr].
T_m :	Le temps de manœuvre [hr].
M :	L'intervalle foré [m].



INTRODUCTION GENERALE





ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE





CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES OUTILS DE FORAGE



I.1. Introduction :

L'outil de forage est la pièce la moins volumineuse mais la plus importante pour réaliser un puits de forage. C'est le premier élément à s'attaquer aux terrains.

On peut distinguer deux types principaux d'outils de forage, les outils à molette et monobloc, dans chaque type on trouve une grande variété d'outil selon la conception de l'outil, son profil, et la nature des dents et leurs formes.

I.2. Les différents types des outils :

I.2.1. Les outils à molettes (roller bits) :

Les outils à molettes ont été introduits dans le forage rotary par H.R. HUGUE en 1909 : ils en constituent aujourd'hui l'outil de base [10].

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

- Les bicônes (2 cônes) (Fig. I.1),
- Les tricônes (3 cônes) (fig. I. 2),

Le tricône est le plus utilisé. Le bicône utilisé auparavant pour la déviation est aujourd'hui peu utilisé [10].



Fig.I.1 : Outil à molette bicônes [1]



Fig.I.2 : Outil à molettes tricône [6]

➤ Outil tricône :

Les outils tricônes sont constitués de trois cônes tournant de façon indépendante et montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil. Plusieurs types de roulements sont utilisés (rouleau avec ou sans étanchéité, palier de friction, système de lubrification, etc.). Ces outils travaillent principalement en compression.

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

- Des dents usinées dans le cône,

- Des picots de carbure de tungstène emmanchés en force dans des perçages à la surface du cône [4].

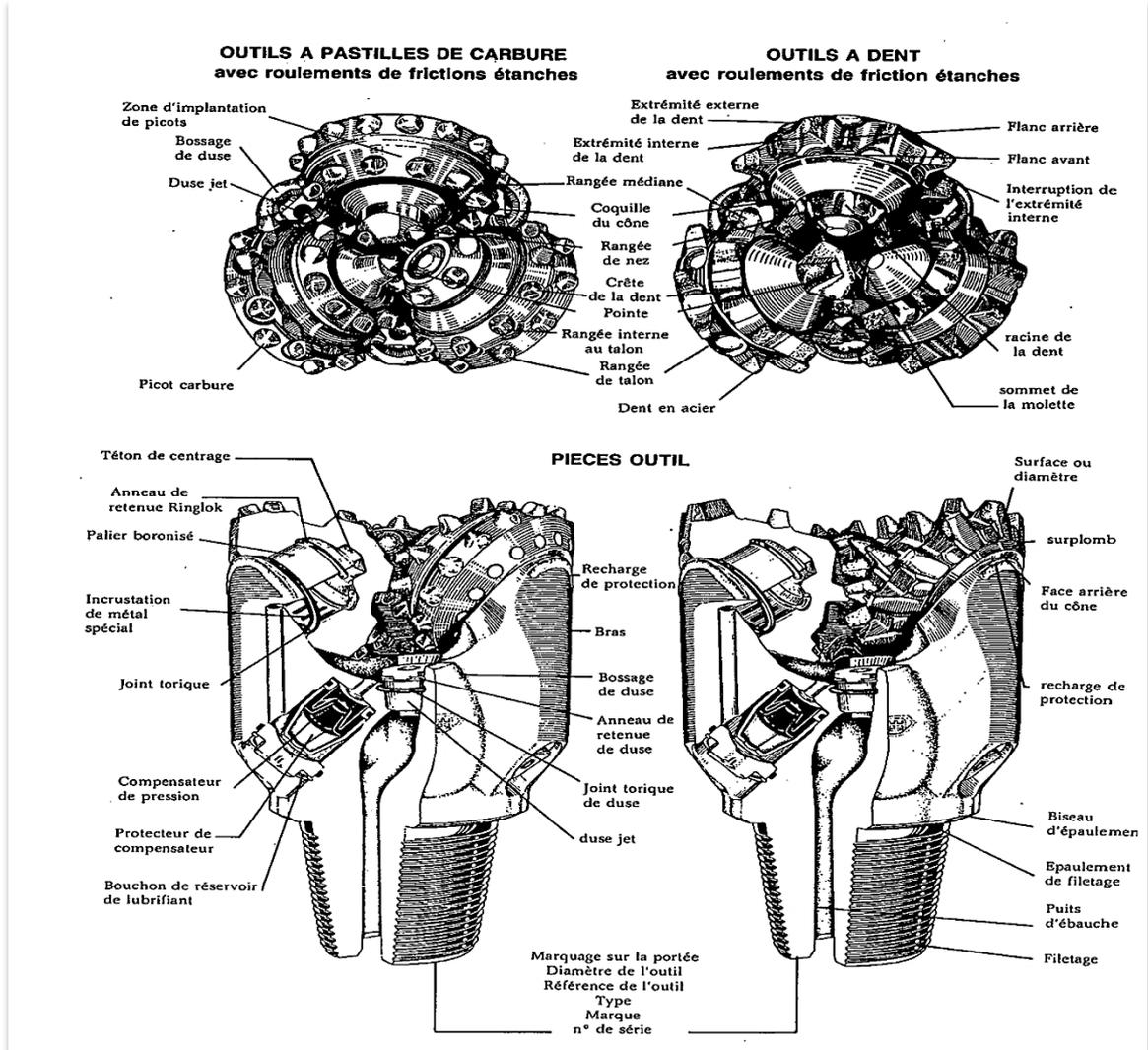


Fig. I.3 : Nomenclature des tricônes [18]

I.2.1.1. Géométrie des cônes :

Pour comprendre comment la géométrie des molettes peut affecter la façon dont les dents coupent la roche, considérons le cône pour formations tendres schématisé sur la figure ci-dessous. Il a deux angles coniques de base, et aucun d'entre eux n'a son sommet au centre de l'outil. Comme les cônes sont obligés de tourner autour de l'axe de l'outil, ils glissent en même temps qu'ils tournent et ont une action de gouge et de cisaillement efficace pour le forage des formations tendres. L'augmentation de cet effet pour améliorer la vitesse d'avancement dans les formations tendres s'obtient en décalant les axes des cônes par rapport à l'axe de rotation de l'outil [18].

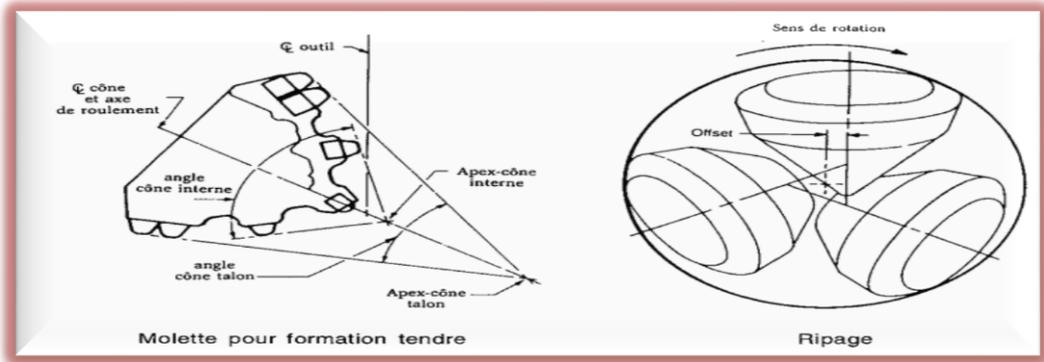


Fig.I.4 : Arrangement pour formation tendre [18].

Les cônes des outils pour formation dures ont un mouvement plus proche du roulement vrai, et présentent peut d'offset, de ce fait, ils brisent la roche surtout par écrasement.

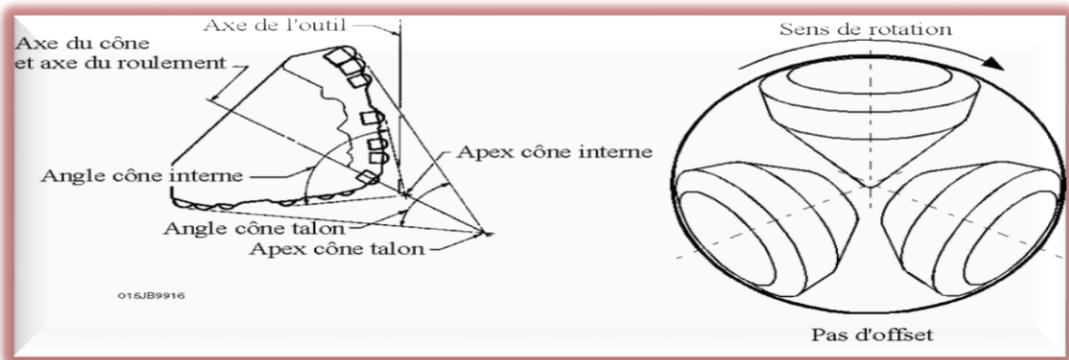


Fig.I.5 : Arrangement pour formation dure.

I.2.1.2. Les roulements :

Les roulements supportent la majeure partie du poids exercé sur l'outil. On distingue deux types :

I.2.1.2.1. Roulements à billes ou rouleaux (étanches et non étanches) :

Dans ces outils, le poids est appliqué uniquement sur les deux génératrices opposées du rouleau, ce qui entraîne sa déformation si une forte charge lui est appliquée ; par conséquent, ce type de roulements ne supporte pas un poids important. Par contre, il résiste mieux à la température et supporte une grande vitesse de rotation [1].

I.2.1.2.2. Palier de friction :

Le palier de friction développé pour faire coïncider sa durée de vie avec celle des éléments de coupe au carbure ne contient aucun élément mobile, mais uniquement un palier mâle ajusté sur l'alésage interne du cône. Les zones de contact entre l'arbre du palier

et l'alésage du cône sont carburées, revêtues de métaux spéciaux et reçoivent un traitement spécial augmentant la résistance à l'usure et protégeant du grippage [18].

I.2.1.3. Système de lubrification :

I.2.1.3.1. Roulements non étanches :

Ces roulements ne sont pas étanches et sont graissés directement par la boue de forage. Ce sont en général les outils destinés au début du forage [1].

I.2.1.3.2. Roulements étanches :

Les roulements étanches sont graissés grâce à une réserve de graisse située dans le dos du bras et actionnée par la pression hydrostatique dans l'annulaire. Le roulement est isolé de la boue par un joint d'étanchéité [1].

I.2.1.4. L'hydraulique à l'outil :

On distingue deux types d'outils :

- Outil conventionnel.
- Outil à Duse.

I.2.1.4.1. Outil conventionnel :

La circulation par le centre utilise le trou central afin d'obtenir un nettoyage optimal des dents. Pour les outils forant à l'air, un passage a été usiné afin d'avoir un flux d'air refroidissant directement les roulements. Pour les forages à la boue, ce passage aura été bouché afin d'éviter l'endommagement des roulements par des éléments solides.

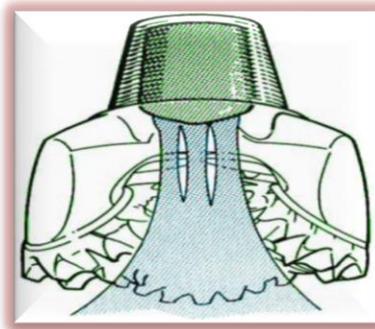


Fig.I.6 : Outil conventionnel [10]

I.2.1.4.2. Outil à Duse :

L'outil à duses comporte des duses interchangeables situées sur ses côtés, entre les molettes. Le jet de boue est dirigé sur le front de taille et crée une turbulence qui refoule instantanément les déblais, pour laisser un fond propre devant l'outil.

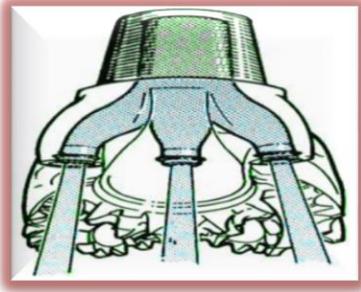


Fig.I.7 : Outil à Duse [10]



Fig.I.8 : Dusses interchangeables [1]

I.2.1.5. Les éléments de coupe :

I.2.1.5.1. Les outils pour terrain tendre :

Les outils pour terrains tendres ne nécessitent pas un poids important. Leurs dents sont hautes et espacées pour bien pénétrer dans la roche et arracher de grands fragments. La grande hauteur des dents implique une molette mince, ce qui entraîne la réduction des chemins de roulements et, par conséquent, la taille des billes et des galets.

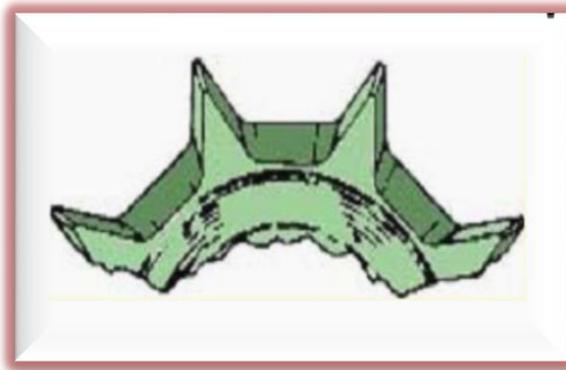


Fig.I.9 : Les dents pour terrain tendre [1].

I.2.1.5.2. Les outils pour terrain dur :

Dans ces terrains, la grande résistance à la compression de la roche provoque la rupture des dents. Pour éviter cela, on utilise des outils munis d'un grand nombre de dents solides, petites et rapprochées, avec un faible décalage entre les axes des molettes et celui de l'outil

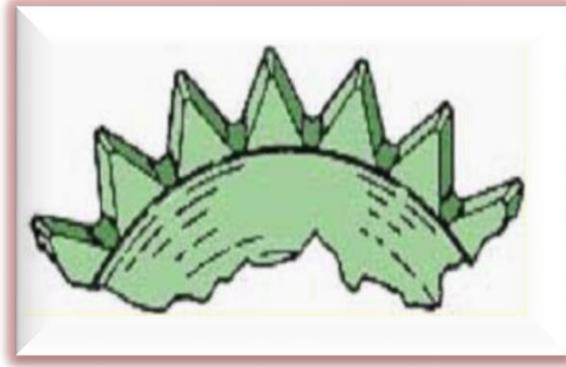


Fig.I.10 : Les dents pour terrain dure [1].

I.2.1.5.3. Les outils pour les terrains abrasifs :

Dans les formations abrasives, ces outils sont renforcés sur le talon des molettes par des pastilles en carbure de tungstène plates pour conserver le diamètre de l'outil. Dans certains outils, les dents sont remplacées par des pastilles en carbure de tungstène, qui percutent, écrasent et fracturent la roche sans que la pénétration soit importante. Ces outils ont des molettes épaisses, donc ils supportent des poids importants et leurs chemins de roulements sont grands [1].



Fig.I.11 : Outil renforcé sur le talon [10].



Fig.I.12 : Outil à picots [6].

I.2.1.6. Mode de destruction de la roche :

Les outils à molettes travaillent par :

- Compression produisant la pénétration des dents ou des picots 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.
- Arrachage du copeau de terrain par ripage de la molette sur elle-même

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 [21]

I.2.1.7. Classification IADC des outils à molettes :

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

I.2.1.7.1. Le premier caractère :

- **Un chiffre de 1 à 3** : tricône à denture fraisée (terrains tendres).
- **Un chiffre de 4 à 8** : tricône à pastilles (terrains durs).

- 1 : Terrains très tendres
- 2 : Terrains moyens tendres
- 3 : Terrains tendres
- 4 : Terrains très légèrement durs
- 5 : Terrains légèrement durs
- 6 : Terrains moyens durs
- 7 : Terrains durs
- 8 : Terrains très durs

I.2.1.7.2. Le second caractère :

Un chiffre de 1 à 4 qui désigne la dureté de chaque groupe de formations. C'est une sous – classification de la dureté des formations dans chacune des 8 classes déterminées par le 1er chiffre.

I.2.1.7.3. Le troisième caractère :

Un chiffre de 1 à 9 qui désigne les caractéristiques du tricône.

I.2.1.7.4. Le quatrième caractère :

Une lettre de l'alphabet qui définit des caractéristiques additionnelles des outils tricônes.

I.2.2. Les outils diamantés :

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

I.2.2.1. Le diamant :

Le diamant (carbone cristallisé) est le matériau le plus dur que l'on connaisse parmi les minéraux. Sa résistance à l'écrasement est de l'ordre de 80.000 bar (carbure de tungstène : 50.000 bar ; acier C. 45 : 15.000 bar) [4].

C'est la substance la plus résistante à l'usure (10 fois plus que le carbure de tungstène). Il a le plus faible coefficient de friction (le diamant est plus glissant que le téflon). C'est le meilleur conducteur de chaleur.

Le diamant se mesure en "poids" dont l'unité est le CARAT (1 carat = 0,2 gramme). Pour les outils de forage, la taille des pierres se mesure en nombre de pierres par carat et varie généralement entre 2 et 15 pierres au carat [4].

I.2.2.2. Types d'outils diamantés :

Les outils diamantés sont de trois types :

- À diamants naturels.
- À taillants PDC (Polly cristallin diamond compact : diamant polycristallin).
- à taillants TSD (thermally stable diamant: diamant thermostable).

I.2.2.2.1. Mode de travail :

Ces trois types sont spécifiques par la nature des éléments de coupe qui détruisent la roche de manière mécaniquement différente :

Le diamant naturel abrase la roche et travaille comme une macro meule, les diamants polycristallins cisailent la roche en découpant des copeaux comme un outil de tournage des métaux. La forme de tous ces outils de forage est monobloc ce qui leur confère une certaine solidité [18].

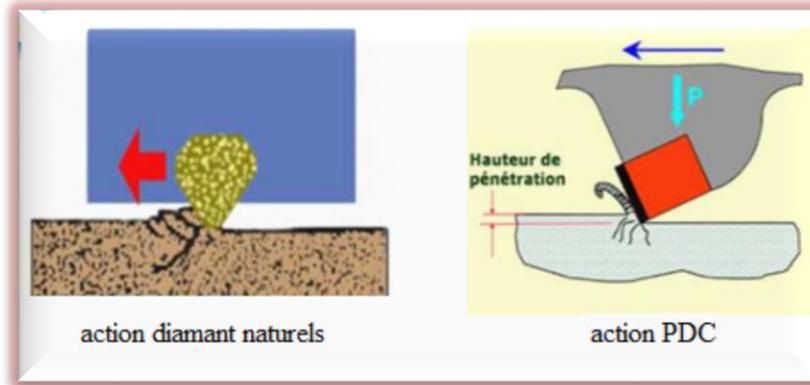


Fig.I.13 : Mécanisme de destruction de la roche par les outils diamantés [21].

I.2.2.2.2. Les outils à diamants naturels :

Un outil diamant est défini par le nombre de carats, le nombre de pierres au carat qui définit la taille des pierres (grosses pierres : 1 à 4 au carat et petites pierres : plus de 6 au carat), la disposition et l'exposition des pierres. Les outils pour terrains tendres ont de grosses pierres et une exposition plus grande (jusqu'à 45% de la taille de la pierre), tandis que ceux pour terrains durs ont de petites pierres et une très faible exposition.

Les pierres sont incrustées sur une matrice en carbure de tungstène et un corps en acier. Des événements et des canaux d'irrigation, appelés lignes d'eau, sont prévus pour permettre la circulation de la boue [1].

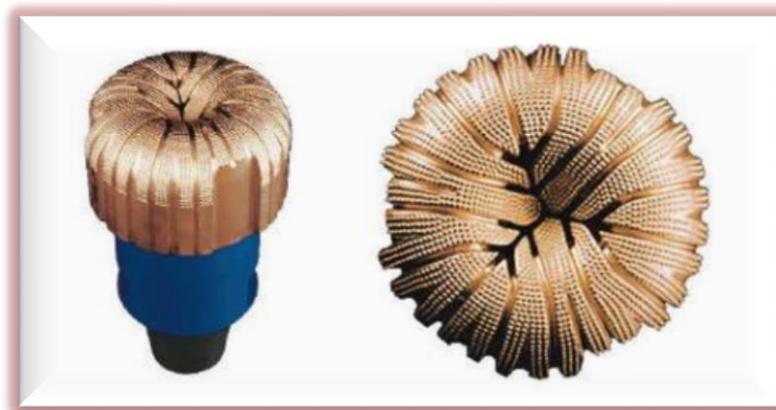


Fig.I.14 : Outil à diamant naturel [21]

I.2.2.2.3. Les outils au diamant synthétique :

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

I.2.2.3.1. Diamant synthétique basse température (PDC) :

Le PDC (Diamant Compact Polycristallin) se présente en général sous la forme d'une fine lamelle de diamant synthétique (épaisseur : 0,5 mm) avec des impuretés de cobalt, placée sur un substrat de carbure de tungstène.

La capacité de coupe de cet outil reste la même durant toute sa durée de vie. En effet, le support en carbure de tungstène s'use plus rapidement que la partie diamantée polycristalline, ce qui provoque son auto-affûtage d'une façon constante et progressive jusqu'à la base du corps de l'outil.

Ayant une stabilité thermique faible (environ 700°C), ces outils sont utilisés dans les formations très tendres, tendres, et moyennement dures non abrasives. [1]



Fig.I.15 : Un outil PDC [16]

A- Profil des outils PDC :

Une grande variété de profils d'outils existe. Ces profils peuvent être regroupés en trois principaux groupes :

- Profil à simple cône (single cône) : plat, hémisphérique et forme à étage.
- Profil à cône peu profond (shallow cône) : plat, à flanc court, à flanc moyen et à flanc long.
- Profil à double cône (double cône) : flanc court à médium et flanc long.

Pour chacun de ces groupes, les variations de profil permettent d'associer le volume du taillant en rapport avec la dureté de la formation et la conception hydraulique pour l'évacuation des déblais [16].

- La stabilité de l'outil.
- Cône.
- Le nombre des taillants.
- La durabilité de l'outil.

- La vitesse d'avancement.
- Le nettoyage et le refroidissement de l'outil.

Le profil de l'outil consiste en :

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

B- Corps des outils PDC

Il existe 2 types de corps d'outil :

➤ **Corps en acier :**

Le corps est en acier monobloc obtenu par usinage. Ces outils ont des taillants PDC sertis directement dans le corps sans brasage. Le diamètre est protégé par des barres en carbure de tungstène sur toute la hauteur de la jupe extérieure. Pour réduire le phénomène d'érosion du corps, la surface d'attaque de l'outil est protégée par une métallisation dure [1].

➤ **Corps en carbure de tungstène :**

Le corps, en deux parties soudées, a une âme en acier et une matrice en carbure de tungstène. Ces outils ont des taillants cylindriques brasés directement dans un évidage dans le corps, qui en plus, les protège contre les chocs. Ainsi, ils peuvent travailler avec des torques très important.

La durée de vie du corps est supérieure à celle du taillant, du fait de sa très haute résistance à l'abrasion (carbure de tungstène). Dans ce type d'outils, on ne peut pas utiliser toute la surface du taillant. Une fois utilisé, cet outil ne peut plus être réparé [1].

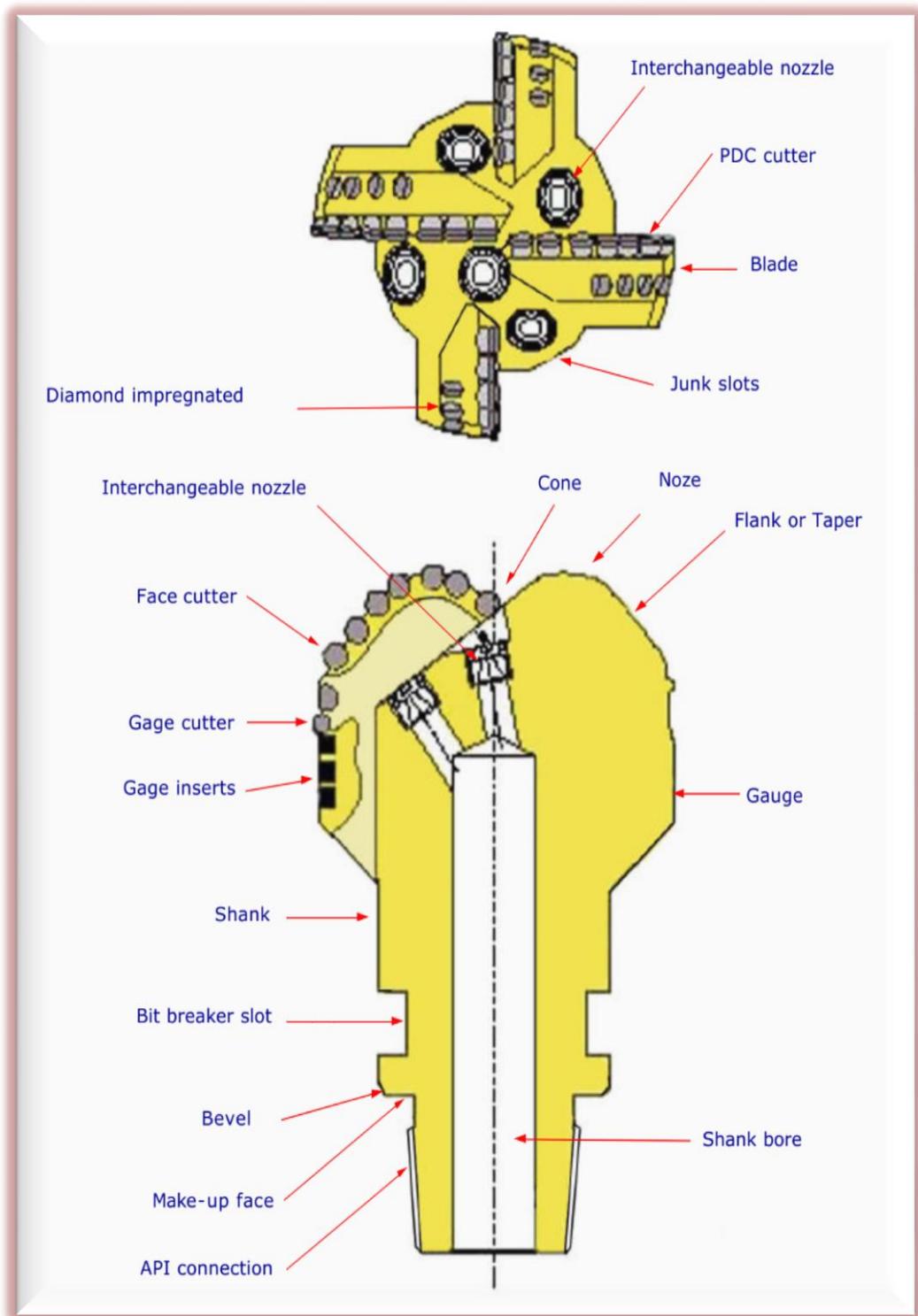


Fig.I.16 : Terminologie d'un outil PDC (corps en acier). [10]

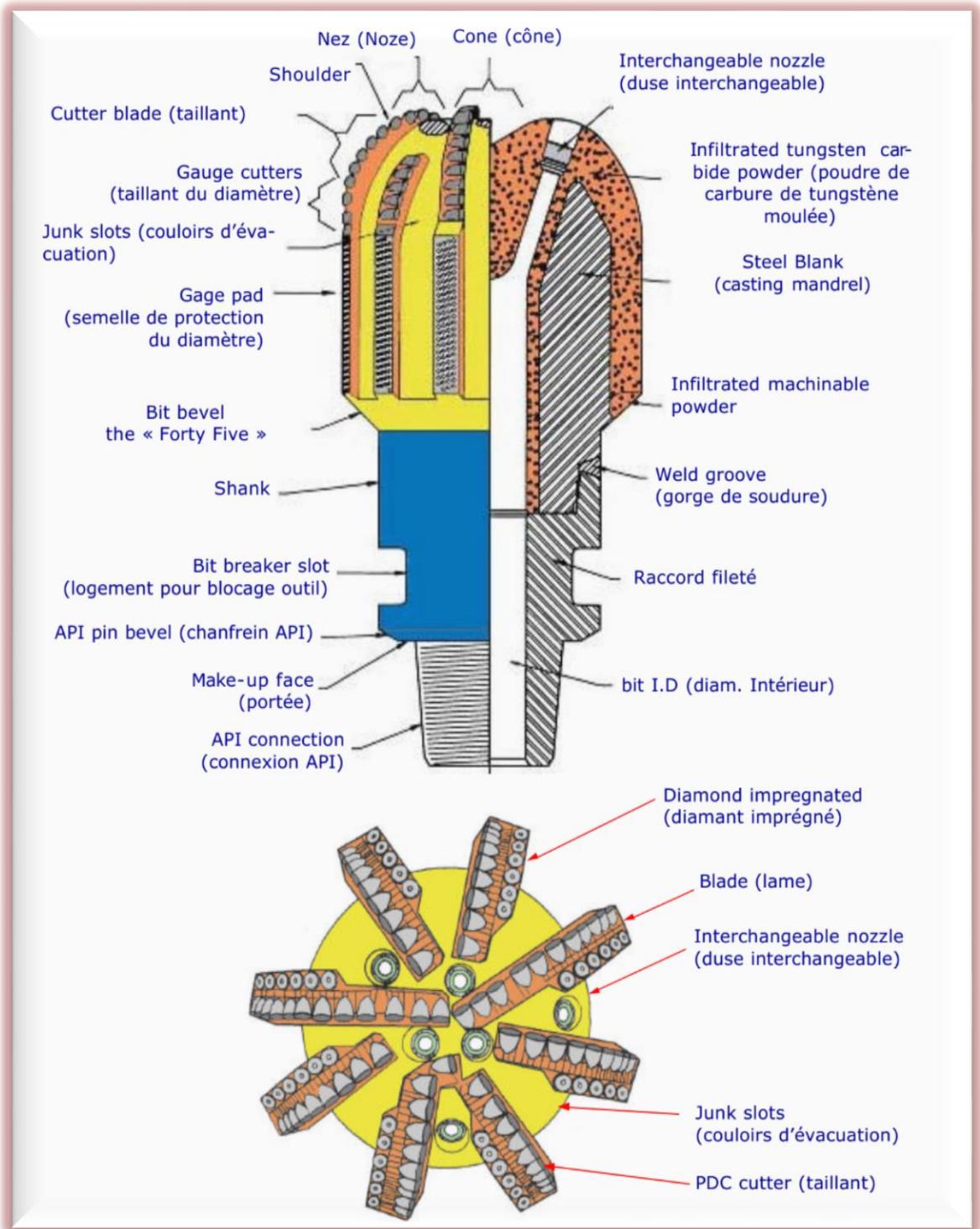


Fig.I.17 : Terminologie d'un outil PDC (corps en matrice) [10]

I.2.2.2.3.2. Diamant synthétique haute température (TSD):

Le TSD (Thermally Stable Diamond) se compose de diamant synthétique sans cobalt et sans le substrat de carbure de tungstène.

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

Ayant une bonne stabilité thermique (environ 1200°C), ces outils sont utilisés dans des formations moyennement dures à dures à abrasivité faible [1]



Fig. I.18: Outil TSD [21]

I.2.2.2.4. Outils hybrides :

Les taillants PDC de ces outils sont protégés à l'arrière par du TSD et/ou du diamant naturel, afin de ralentir et contrôler leur usure et permettre une dispersion plus rapide de la chaleur à l'arrière du taillant, empêchant ainsi d'atteindre des températures critiques dans la structure polycristalline [10].

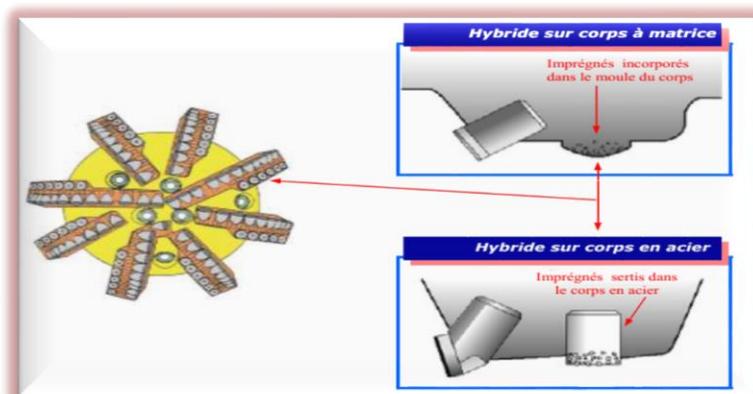


Fig.I.19 : Outils hybrides [10]

I.2.2.3. Classification IADC des outils diamants :

Un système de codification à quatre caractères permet de classer tous les outils diamants [15].

➤ 1er caractère :

Type de diamants et de matrice :

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

M : outil PDC à matrice en carbure de tungstène

S : outil PDC à matrice en acier

L : outil TSD à matrice en carbure de tungstène

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

➤ 2ème caractère :

Profil d'outils : les profils d'outils sont codifiés à l'aide de neuf chiffres de **1** à **9** qui représentent les formes usuelles des outils diamants.

➤ 3ème caractère :

Caractéristiques hydrauliques :

R : pour sortie radiale du fluide

X : pour sortie avec gorge centrale

O : pour les autres types de sortie du fluide.

➤ 4ème caractère :

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

I.2.3. L'usure des outils :

La détermination de l'usure des outils est une opération difficile, elle peut varier d'une personne à l'autre. Cependant, une détermination précise et objective est très importante car elle servira à [15] :

- 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.

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).

8 colonnes d'information sont utilisées pour rapporter l'usure de l'outil.

Tableau.I.1 : Evaluation d'usure des outils

Structure de coupe				B/S	G	Remarques	
Rangées Intérieures	Rangées Extérieures	Caractéristique de l'usure	localisation	Roulements /étanchéités	Calibrage en 1/16in	Autres Caractéristiques	Raison de la remontée
1	2	3	4	5	6	7	8

➤ **La première colonne (rangées intérieures) :**

Indique par un chiffre de 0 à 8 l'usure des éléments de coupe des rangées intérieures (soit les 2/3 intérieures 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.

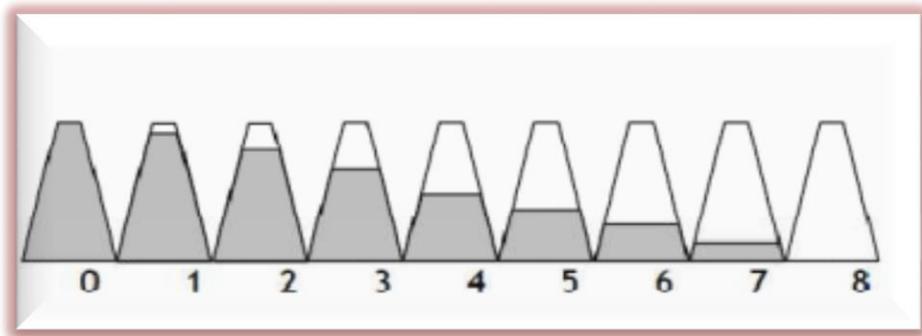


Fig. I. 20 : Codification de l'usure de l'outil

Pour les outils à picots, la perte, la rupture et l'usure des picots sont prises en compte. 0 indique qu'il n'y a pas de perte des éléments de coupe et 8 indique une perte totale. 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.

➤ **La deuxième colonne (rangées extérieures) :**

Indique, également par un chiffre de 0 à 8, l'usure des éléments de coupe de rangées extérieures (soit les 1/3 extérieures des éléments de coupe).

➤ **La troisième colonne (caractéristique de l'usure) :**

Utilise un code à 2 lettres pour indiquer la caractéristique principale de l'usure des Structures de coupe (voir le tableau ci-dessous)

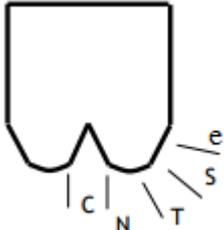
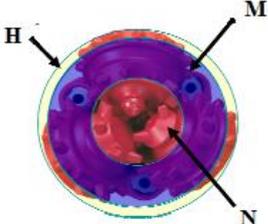
Tableau. I.2 : Types d'usure d'outil

Code	Explication
BT	Rupture de dents/élément de coupe
BU	Outil bloqué (bourrage)
CC*	cône fissuré
CD*	cône bloqué
CI	Interférence entre cônes
CR	Outil torée
CT	Dents/éléments des coupes écaillées
ER	Erosion
FC	Dents aplaties
HC	Echauffement
JD	Endommagement par de la ferraille
LC*	Perte de cône
LN	Perte de Duse
LT	Perte de dents/éléments de coupe
OC	Usure excentrique
PB	Outil pincé
PN	Duse bouchée
RG	Usure périphérique
RO	Joint d'étanchéité endommagé
SD	Endommagement du bras
SS	Usure avec auto - affûtage
TR	Usure entre les dents
WO	Outil sifflé
WT	Dents usées (SS/FC)
NO	Sans usure

➤ **La quatrième colonne :**

Utilise une lettre ou un chiffre pour indiquer l'emplacement de l'usure reportée dans la 3e colonne :

Tableau. I.3 : Localisation d'usure de l'outil

Outils à élément de coupe fixes	Outils tricônes
<p>C : cône N : face T : flanc S : épaulement G : diamètre A : tout la surface/ rangée M : rangée intermédiaire</p> 	<p>N : rangée de nez M : rangée intermédiaire H : rangée arrières A : toutes les rangées</p> 

➤ **La cinquième colonne :**

Utilise une lettre ou un chiffre (suivant le type de roulement) pour indiquer l'état roulements. Pour les roulements non étanches, une échelle de 0 à 8 permet de reporter le pourcentage de durée de vie utilisé : 0 indique que le % de durée de vie utilisé est 0 (roulements neufs), 8 indique que le % de durée de vie utilisé est 100 (cône bloqué ou perdu). Cette estimation est difficile car subjective.

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

E : indique que l'étanchéité est en état.

F : indique que l'étanchéité est hors d'état.

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

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

➤ **La sixième colonne :**

Indique la perte de diamètre en 1/16 de pouce

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

Si l'outil a perdu en diamètre, la valeur est indiquée en 1/16 de pouce et elle est mesurée comme suite :

Pour les outils tricônes la règle de la 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 extérieures des cônes 1 et 2. Pour les autres types d'outils, il suffit de mesurer la distance entre l'outil et le calibre.

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

➤ **La septième colonne (autres caractéristiques) :**

Est utilisée pour reporter toutes usures supplémentaires, en complément de celle Reportée dans la colonne n°3. Cette colonne ne se limite pas uniquement aux structures de coupe. Elle utilise les mêmes codes du la colonne n°3.

➤ **La huitième colonne (raison de la remontée) :**

Indique la cause de la remontée de l'outil. Le tableau suivant donne les différents codes possibles.

Tableau. I.4: Code des raisons de remonté de l'outil

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

I.3. Conclusion :

Voyant la variété des outils de forage on constate la difficulté de choisir l'outil le plus adapté au tronçon a foré, en tenant compte de l'hétérogénéité de ces formations. Afin d'améliorer le choix et les performances de ces outils, il est nécessaire de faire des études approfondies sur les facteurs qui l'affectant, telle que la réaction avec la roche et les paramètres de forage, pour cela nous avons présentés les différentes interactions outil roche dans le chapitre suivant.



CHAPITRE II

INTERACTION OUTIL-ROCHE



II.1. Introduction :

Dans le forage, la roche constitue le matériau à détruire, d'où la nécessité de connaître ses propriétés et savoir comment la détruire et comment elle attaque l'outil, afin d'améliorer le rendement du forage.

II.2. Caractéristique des roches en tant que matériaux à détruire :

II.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.

➤ Dureté 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 [8].

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

La dureté d'une roche suivant 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.

➤ 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 pyramidale.

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 (figures II.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 [8].

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.

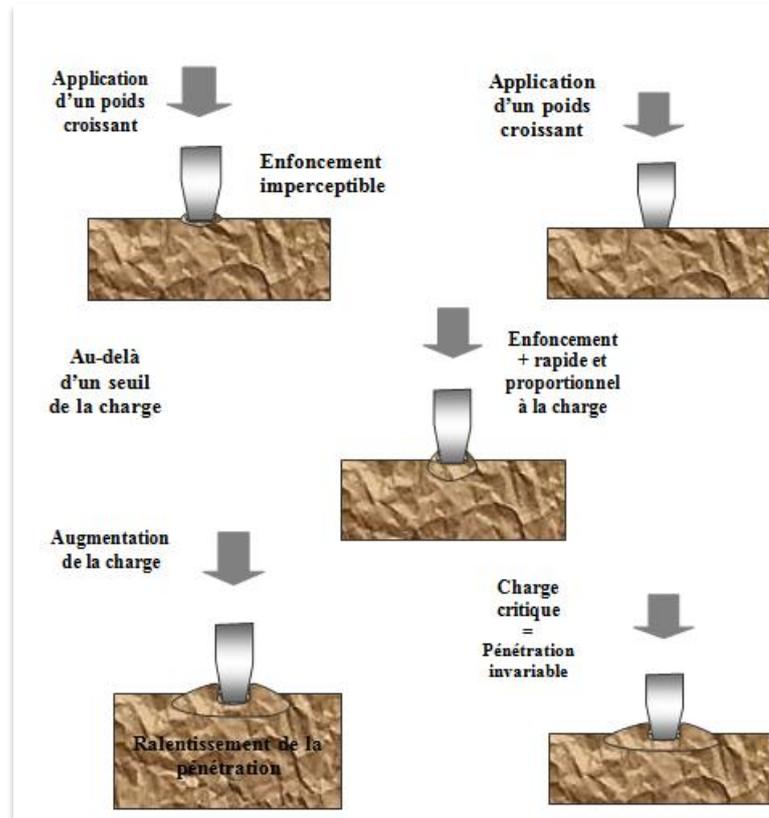


Fig.II.1 : Résistance à la pénétration [8].

➤ **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, telle 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 poinçon, 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.

➤ **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 diverses roches par résistances à l'écrasement croissantes, on obtient une bonne corrélation avec le classement obtenu dans des essais de résistance à la pénétration statique d'un poinçon. Les roches les plus résistances critiques à l'écrasement sont également, en général, celles qui présentent les plus grandes résistances critiques à la pénétration.

Cependant il n'est pas possible de relier d'une façon formelle ces deux caractéristiques. La raison 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-axiale, alors que l'essai d'écrasement d'éprouvettes cylindriques ne fait intervenir que les contraintes uni-axiales. Du fait des différences qui existent entre les paramètres élastiques des différentes roches, il ne peut y avoir de relations formelles entre ces deux régimes de compression.

➤ **Résistance à la compression non confinée (UCS) :**

C'est la résistance de la roche à un effort de compression uni axial, qui reste libre d'effort dans le plan perpendiculaire, l'UCS peut être déterminé au niveau de laboratoire à partir d'un essai de compression simple [21].

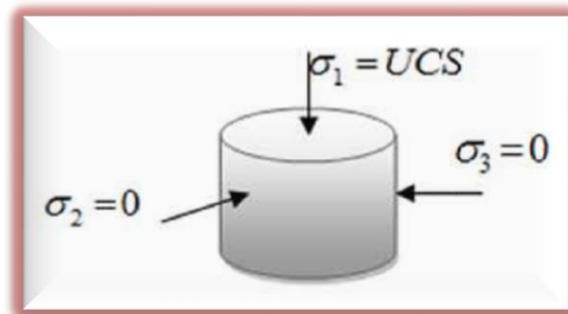


Fig. II. 2: Détermination de l'UCS [21].

Résistance à la compression confinée (CCS)

Ce type d'approche est basé sur le principe 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 [21].

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

II.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 des pénétrations 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 [9].

➤ 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

➤ 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, des nombreuses fissuration latérales ont pu se produire et en général le volume de roche détruite est beaucoup plus important que celui de la partie du poinçon qui s'est enfoncé dans la roche.

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

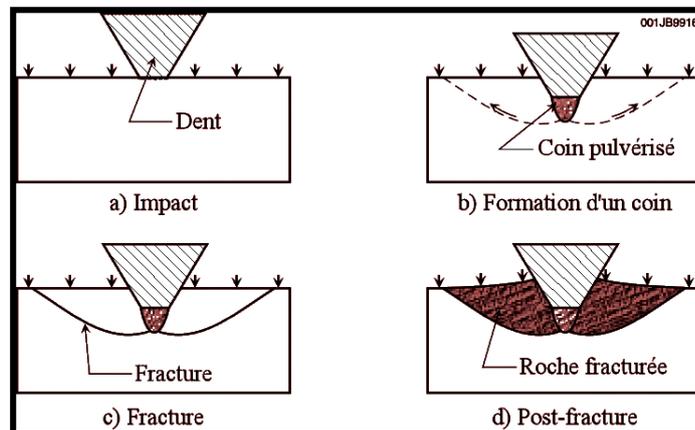


Fig. II. 3 : Mécanisme de la destruction de la roche fragile [8].

II.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.

La fragilité et l'abrasivité constituent les propriétés essentielles qui caractérisent les roches en tant que matériaux à détruire par les outils. De nombreuses autres caractéristiques interviennent en pratique, telles que la porosité, la perméabilité, la structure et l'orientation des différents plis constituant les formations, les contraintes 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.

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

II.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.

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 [21].

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

II.3.2. Coupe :

Le balayage du fond du trou est obtenu par le mouvement de rotation de l'outil autour de l'axe de forage. Si l'outil est monobloc, tous les points de l'outil décrivent dans ce mouvement des cercles concentriques (fig.II.3) ; 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.



Fig. II. 4 : Empreinte laissée par un PDC travaillant correctement [17]

II.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.



Fig. II. 5 : Percussion [21]



Fig. II. 6 : Arrachage [21]

II.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.

II.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.

II.4. Attaque de l'outil par la roche :

II.4.1. Réactions de la roche sur l'outil :

A un instant donné l'outil est en équilibre sous l'action des forces extérieures constituées par la charge et le couple moteur et sous l'action du système de 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 des caractéristiques mécaniques des différentes parties de l'outil.

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

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

II.4.2. Usures des parties actives de l'outil :

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

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

II. 5. Conclusion :

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

Le choix des paramètres de forage précis, entraîne une augmentation de rendement du forage, pour cela dans le chapitre suivant On fait appelle les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage.



CHAPITRE III

LES PARAMETRES DE FORAGE



III.1.Introduction :

Le choix des paramètres de forage non judicieux, ou plus simplement non précis, entraîne une augmentation du coût de forage, qui en absolue, représente un prix important. C'est donc dans le but de réduire les dépenses correspondantes par un choix optimal des paramètres, On appelle les paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage.

Ils peuvent être classés en deux catégories :

✓ **Les paramètres mécaniques :**

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

✓ **Les paramètres hydrauliques :**

- Le débit,
- La pression,
- La nature du fluide de forage et ses caractéristiques (densité, viscosité et filtrat).

III.2.Les différents paramètres de forage :

III.2.1. Les paramètres mécaniques :

Les terrains traversés présentent une grande variété de dureté. Les avancements peuvent varier de 80 mètres/heure à quelques dizaines de centimètres par heure. Il est évident que pour forer des roches de différentes duretés on utilise des outils et des paramètres bien spécifiques selon la nature géologique [11].

III.2.1.1. Type de l'outil :

Le choix de l'outil est un facteur essentiel pour l'avancement du forage. Il est donc important d'étudier avec intérêt la coupe lithologique pour adapter le meilleur outil.

A cet outil, il est également important de lui appliquer les paramètres de forage adéquats pour avoir une meilleure vitesse d'avancement. On parle de rentabilité de l'outil. On dit qu'un outil est rentable lorsque le prix de revient du mètre foré est minimal [12].

III.2.1.2.Poids sur l'outil ou WOB (Weight On Bit) :

Le Poids sur l'outil représente un effort longitudinal de compression suivant l'axe de révolution du trépan cet effort permet aux taillants de s'incruster dans la roche et il est souvent utilisé de façon à tirer profit du poids des masses tiges. La valeur du poids dépend de la dimension et du type de trépan, de sa vitesse de rotation et du type de formation à forer.

Une partie de ce poids provient de l'hydraulique créée par l'injection du fluide qui transite par les trains de tiges [2].

L'expérience dans les forages pétroliers a montré que les poids appliqués sont :

- Terrains tendres : 0.5 à 1.5 tonnes par pouce de diamètre
- Terrains durs : 1 à 2.25 tonnes par pouce de diamètre

Le poids sur l'outil(WOB) c'est un paramètre calculer selon un principe physique, prend en considération le poids de la garniture libre (WOH_L) et le poids de la garniture durant le forage(WOH_F).

$$WOB = WOH_L - WOH_F \dots\dots\dots (III.1)$$

La charge de tous la garniture est supportée par le corps du cône qui s'applique contre la formation et il en résulte une diminution de la vie de l'outil. Cette charge est d'autant plus importante dans les terrains de plus en plus durs le range maximale et minimale du poids sur l'outil (WOB) est limité par le constructeur [23].

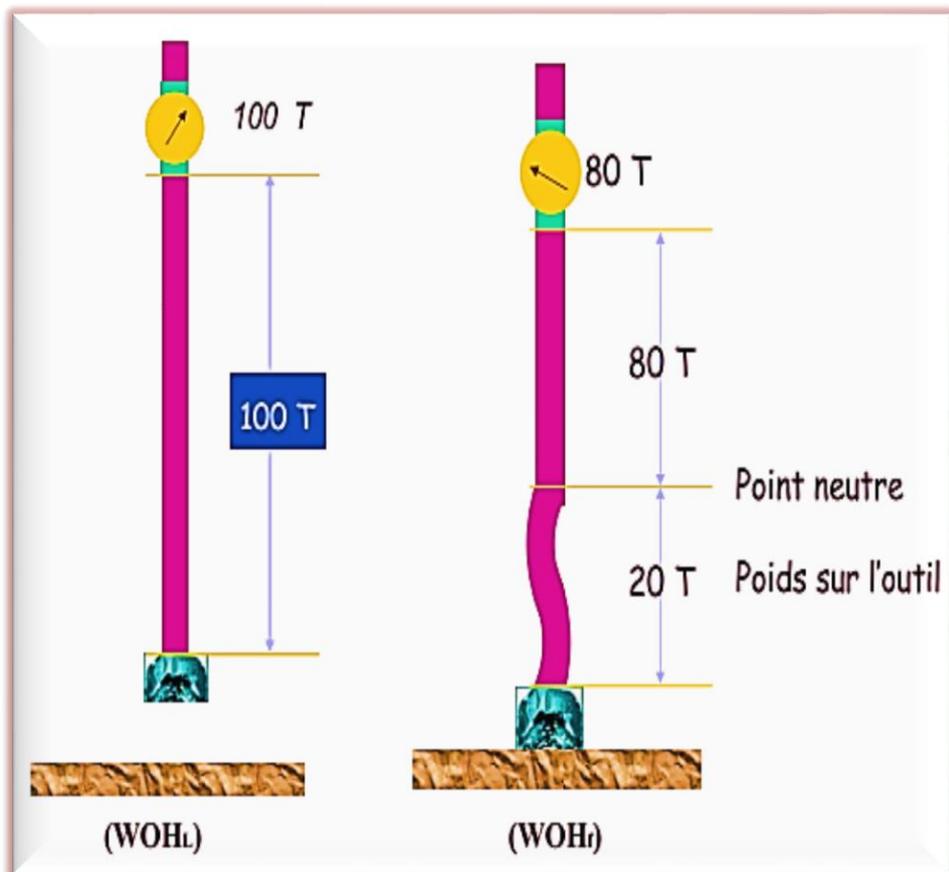


Fig. II .1 : Poids sur l'outil [19]

III.2.1.3. Vitesse de rotation ou RPM (révolution per minute) :

C'est la vitesse de rotation de l'outil autour de son axe de révolution, cette vitesse est appliquée à la garniture en surface et son choix dépend de celui du WOB.

A cause de la grande élasticité du système, la vitesse de rotation de l'outil au fond du puits peut être différente de la vitesse en surface [22].

La vitesse de rotation croît en fonction de la dureté de la formation et le paramètre torque. Et peut être limitée également par Les vibration qui affectent la garniture de forage (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures). Elle peut varier entre 50 et 1000 tr/min [19,2].

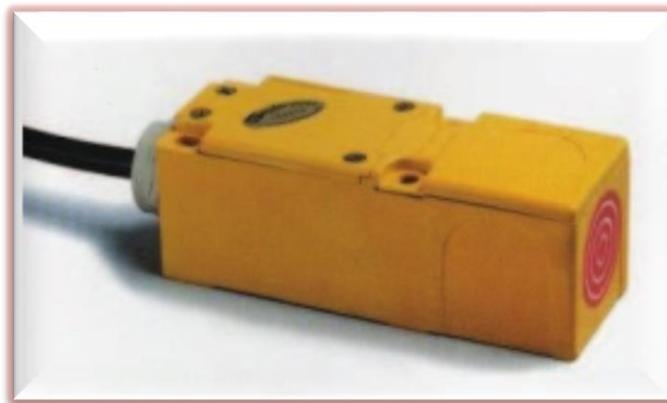


Fig. III .2 : Capteur de fréquence RPM [19]

III.2.1.4. Torque :

C'est un paramètre physique correspond au couple de rotation effectif transmis par la garniture à l'outil suivant son axe de révolution. Compte tenu des frottements du train de tiges contre la paroi du puits, ce couple est nettement inférieur à celui mesuré en surface [22].

La prise de mesure du couple se fait en général par un système hydraulique dont la pression varie en fonction de la tension de la chaîne d'entraînement de la table. Si la table ou la tête est alimentée par un moteur électrique, un capteur à effet Hall enregistre directement les variations de consommation de courant par le moteur. [12]

Le torque indique :

- L'état de l'outil et surtout de ses roulements
- Les changements de lithologie
- Molette coincée
- Éboulement sur l'outil.

- Transmission du couple lors d'un back-off
- Tentative de décroincement

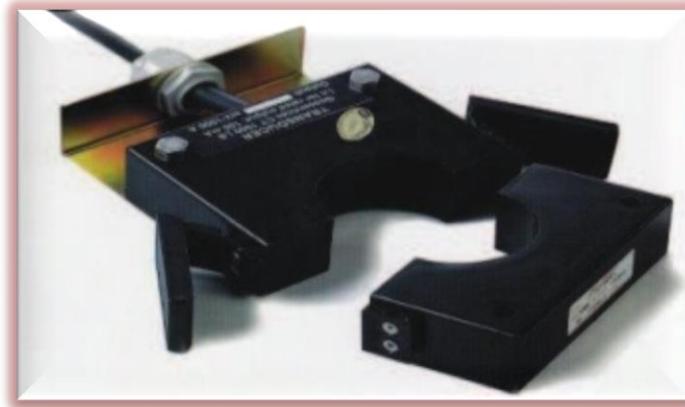


Fig. III .3 : Capteur de fréquence torque [19].

III.2.2. Les Paramètres hydrauliques :

Les paramètres hydrauliques sont tous les facteurs liés au fluide de forage tel que : le débit, la pression, type du fluide de forage et les caractéristiques du fluide forage (densité, viscosité...) qui jouent les rôles de lubrification, refroidissement et le nettoyage du fond par conséquent ils affectent sur la vitesse d'avancement et la durée de vie de l'outil [12].

III.2.2.1. Débit et pression d'injection :

Ces deux paramètres doivent permettre d'une part d'assurer un écoulement suffisant sur l'outil pour refroidir les éléments de coupe pendant le processus de fragmentation de la roche et d'autre part un régime de circulation de la boue permettant un nettoyage efficace du puits afin d'éviter que les débris s'accumulent par gravité sur la partie basse du trou notamment dans le cas de forage dévié [22]

III.2.2.2. Vitesse minimale aux duses :

Le jet de boue a pour effet de nettoyer le fond du puits et induire une turbulence suffisante pour laver la denture de l'outil.

- Avant les duses, la pression est élevée et la vitesse est faible.
- Après les duses, la pression est faible et la vitesse est élevée.

III.2.2.3. La nature de fluide de forage :

Le type de boue est choisi en fonction des performances recherchées et désigne les propriétés physico-chimiques du fluide de forage. Trois types de boues sont souvent employés : la boue à base d'eau (Water Based Mud, WBM), la boue à base d'huile (Oil Based

Mud, OBM) et la boue synthétique (Synthetic Based Mud, SBM). Une boue synthétique est constituée d'un mélange d'eau et d'additifs chimiques [2, 22].

La boue joue le rôle d'un lubrifiant, son choix influe directement sur le coefficient de frottement garniture-paroi du puits. La force de poussée d'Archimède que subit la garniture est directement proportionnelle à sa densité. De plus, du point de vue chimique, la boue de forage représente aussi un environnement agressif dans lequel la garniture se trouve durant l'opération de forage. En effet, les boues de forage, associées à la présence d'hydroxyde de soufre H₂S, tendent à réduire la résistance à la fatigue des trains de tiges par oxydation.

III.2.2.4. Les caractéristiques de la boue

III.2.2.4.1. Densité :

La densité est l'une des facteurs de boue agissant sur le transport des déblais puisqu'elle représente la capacité de soulever les déblais du fond vers la surface qu'on peut le modifier selon les circonstances sans pour autant dépassé certaine limite afin d'assurer un bon nettoyage du fond [7]

III.2.2.4.2. Viscosité :

La viscosité de la boue est la résistance à son écoulement, elle est affectée principalement par concentration en solide, la taille et la forme des particules solides et le rapport huile eau (O/W) [20].

Elle peut être mesuré à l'un des outils disponibles pour contrôlée la rhéologie de la boue ; ils sont de deux types :

- Viscosimètre Marsh
- Rhéomètre Fann 35

III.2.2.4.3. Pourcentage de solides dans la boue :

En terminologie boue de forage, on désigne par sable les particules qui ne passent pas au tamis de 200mesh, c'est-à-dire les particules dont la section est supérieure à 0.074mm (74 μ).

La présence de sable dans une boue a un effet abrasif sur tout le matériel au contact de la boue (circuit de surface, garniture de forage ; les pompes ...etc.).

De plus, une concentration élevée en sable augment la densité de la boue et peut amener une sédimentation dans le puits pendant les arrêts de circulation et diminue la vitesse d'avancement et la vie de l'outil, il est recommandé de maintenir la teneur en sable à moins 1 %. Ceci est passible en fait des traitements mécaniques corrects de la boue pour évacuer les solides [20].

III.3. Les paramètres affectant sur la vitesse d'avancement :

Afin de comprendre le processus de forage nous devrions étudier toutes les variables qui peuvent affecter l'interaction entre la roche et l'outil de forage, ces variables sont généralement classifiées dans deux groupes principaux qui sont les variables contrôlables et les variables non contrôlables ou les variables environnementales, le tableau suivant donne un sommaire de ces variables.

Tableau III.1: Résumé des variables de forage

Variables Contrôlables	Variables Environnementales
WOB	Propriétés de formation
Vitesse de rotation	La profondeur
Type d'outil	Densité de la boue
Débit de circulation	Type de boue
Hydraulique de l'outil	Les autres propriétés de boue
Les duses de l'outil	La pression de puits

Les variables contrôlables sont les paramètres qui peuvent être changés à partir de l'appareil de forage telle que le poids sur l'outil (WOB), la vitesse de rotation (RPM), le débit de circulation de la boue de forage et ainsi de suite ; les variables environnementales sont liées au type de formation et ces propriétés, elles ne peuvent pas être changées ainsi parce qu'elles sont liées à l'objectif du forage. Le choix de certains facteurs comme la densité de boue et d'autres propriétés dépendent principalement des conditions géologiques des formations forées, c'est pourquoi qu'ils sont classifiés comme des variables environnementales même s'ils sont changeables [21].

III.3.1. L'effet des paramètres contrôlables :

III.3.1.1. L'effet de Type de l'outil :

L'outil sélectionné a un grand effet sur la vitesse de pénétration. Concernant les outils à molette la vitesse d'avancement initial est souvent haute dans certaines formations quand on utilise des outils avec longue dents et un grand offset. Alors que, ces outils sont pratiques que dans les formations tendres à cause de l'usure rapide des dents alors la vitesse d'avancement décline rapidement dans les formations dures.

Les outils à élément fixe sont désignés pour obtenir une vitesse d'avancement donné. Les outils à diamant et PDC sont désignés pour une pénétration donnée par tour par la sélection des dimensions et de nombre de diamants et des pièces PDC. La largeur et le nombre des taillants peut être utilisé pour compter le nombre effectif des lames. [15]

III.3.1.2. L'effet de WOB sur la ROP :

La fig. III.4 montre, pour un débit (Q) et de RPM donnée, la variation de la vitesse d'avancement en fonction du poids appliqué sur l'outil et de la dureté de la formation [8].

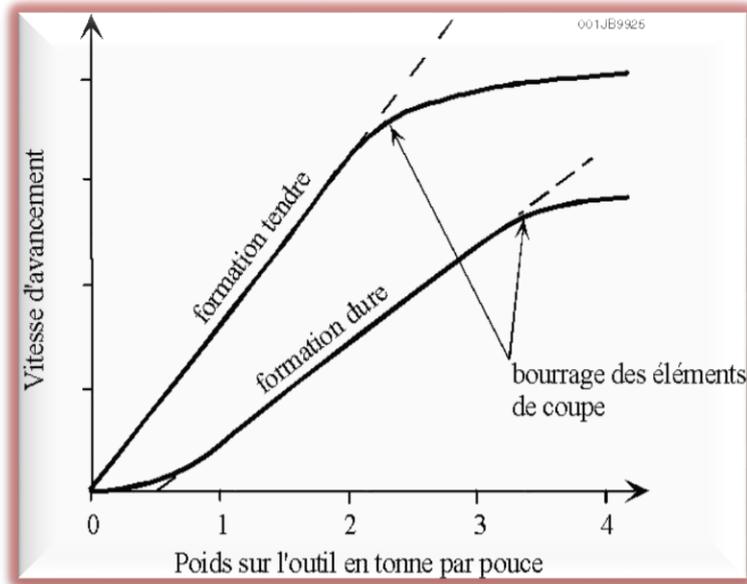


Fig. III.4 : La variation de la vitesse d'avancement en fonction du poids [9]

On constate sur la figure que :

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

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

- Le débit n'est suffisant pour évacuer tous les déblais du front de taille, les déblais non éliminés sont rebrodés diminuant l'efficacité des éléments de coupe. Si la quantité de déblais produite est supérieure à la quantité évacuée, il se produit un bourrage de l'outil.
- Les éléments de coupe pénètrent complètement dans la formation (roche plus lit de déblais) : 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 appliquée 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 que l'on applique sur l'outil est fonction de la garniture de forage utilisée et du profil du puits (dans les puits faiblement déviés, WOB obtenu en mettant les masses-tiges en compression, dans les puits horizontaux, WOB obtenu en mettant).

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 servent à maintenir le diamètre) ; ceci fait grosso modo 12 tonnes sur un outil 6" comportant 9 lames et 25 PDC actifs de 13 mm.

III.3.1.3. L'effet de RPM sur la ROP :

La figure III .5 montre, pour un débit et un WOB donnés, la variation de la ROP en fonction de RPM

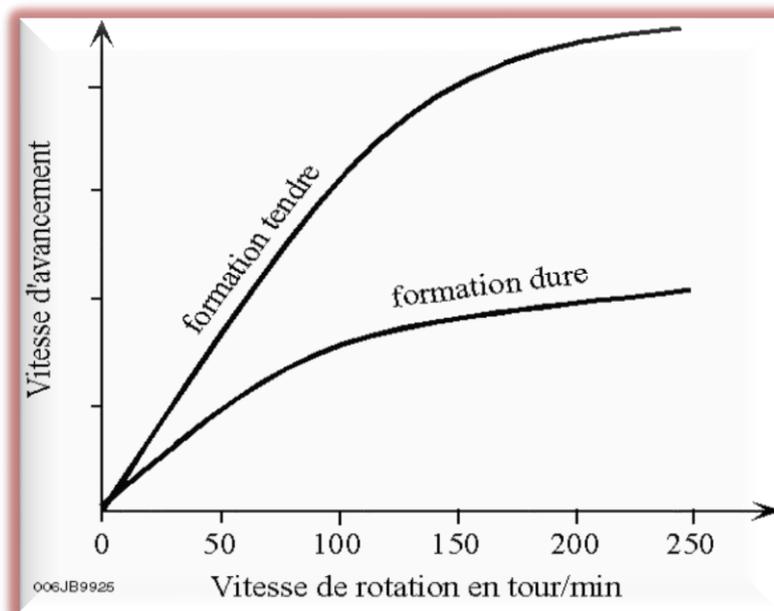


Fig. III .5 : la variation de la ROP en fonction de RPM [9]

On constate sur cette figure que :

- Dans une certaine gamme de RPM, l'augmentation de le ROP est proportionnelle à l'augmentation de le RPM. A partir d'une certaine valeur de le RPM, l'augmentation de le ROP diminue fortement devient quasiment nulle. La raison de cette faible augmentation de le ROP lorsque la RPM devient relativement importante 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 de le RPM produit une diminution de couple à l'outil) et pour évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille. [12]
- 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 de le RPM à beaucoup plus d'effet sur les formations tendre que les formations dures (pente de variation de le 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) [12].

Pour les outils à diamant naturel, le poids est un paramètre important. Par contre 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.

III.3.1.4.L'effet du nettoyage du front de taille sur la 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 (l'évacuation des déblais se sont pas évacuer rapidement de front de taille, 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 [11].

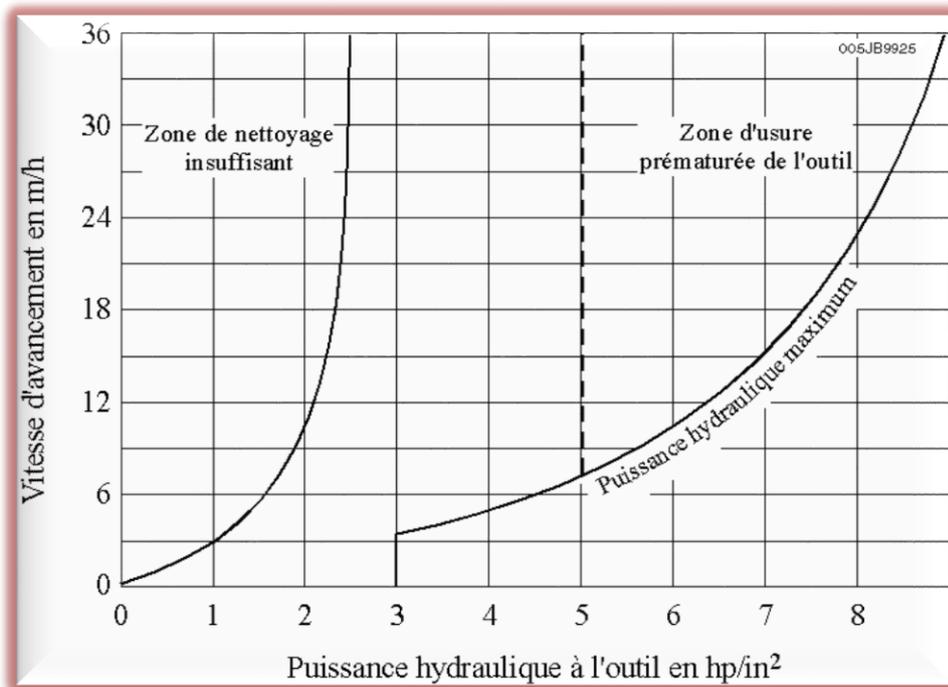


Fig. III.6 : L'effet du nettoyage du front de taille sur le ROP [9].

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

➤ **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 [11].

➤ **L'outil à duses (jet bit) :**

Les événements de l'outil conventionnel ont été remplacés sur la cote 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 conventionnel). L'utilisation des 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^e 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 de le 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.

L'effet des paramètres non contrôlables

III.3.2. L'effet des paramètres non contrôlables :

III.3.2.1. L'effet des caractéristiques de la formation sur la ROP :

La composition minérale de la roche a un effet sur la vitesse d'avancement. Les roches contenant des minéraux durs, abrasives peut causer une usure rapide des dents de l'outil. Les roches contenant des argiles collantes peuvent causer le bourrage de l'outil ce qui affecte son avancement.

- **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 plastiques : 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.

III.3.2.2. L'effet du nature de fluide de forage sur la ROP :

A 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 négative sur les performances des outils à molettes à cause de son action lubrifiante qui retard 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 [12].

III.3.2.3. L'effet des caractéristiques de la boue sur la ROP :**III.3.2.3. 1. Densité :**

La figure 5-4 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 [8].

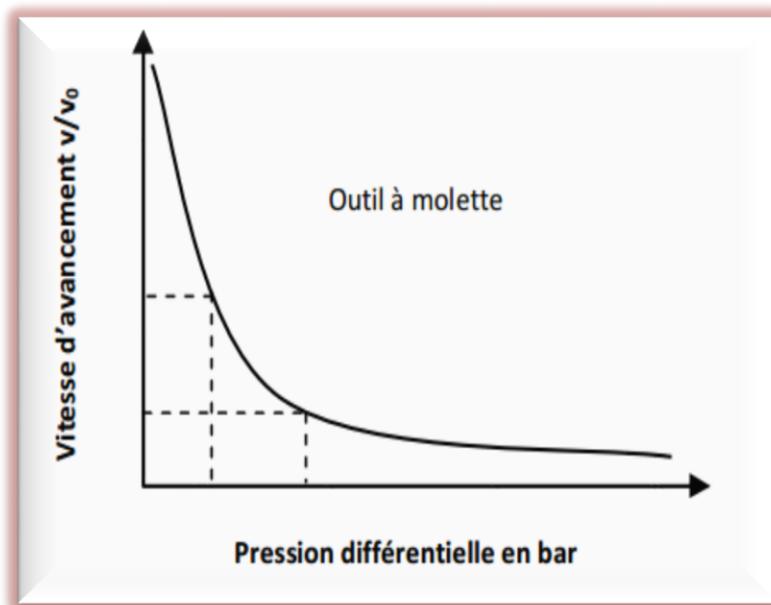


Fig. III .7 : L'effet de la densité de la boue sur la ROP

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 meilleures ROPs sont obtenues en forant avec une boue de densité la plus faible possible.

III.3.2.3.2. 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 [8].

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 de la ROP. Au-delà de cette valeur, la 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.

III.3.2.3.3. Viscosité :

- La figure **III.8** montre l'effet de la viscosité sur la ROP

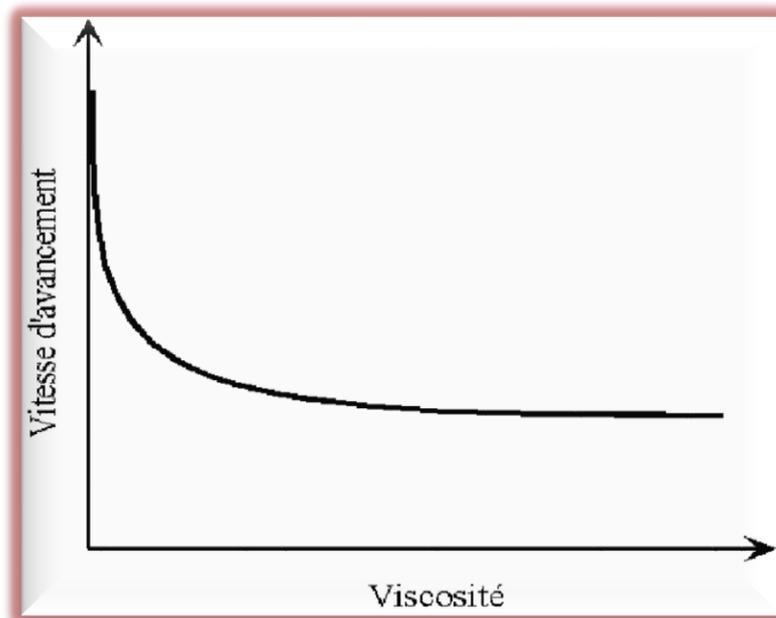


Fig.III.8 : L'effet de la viscosité sur la ROP [9]

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 [12].

III.3.2.3.4. 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.

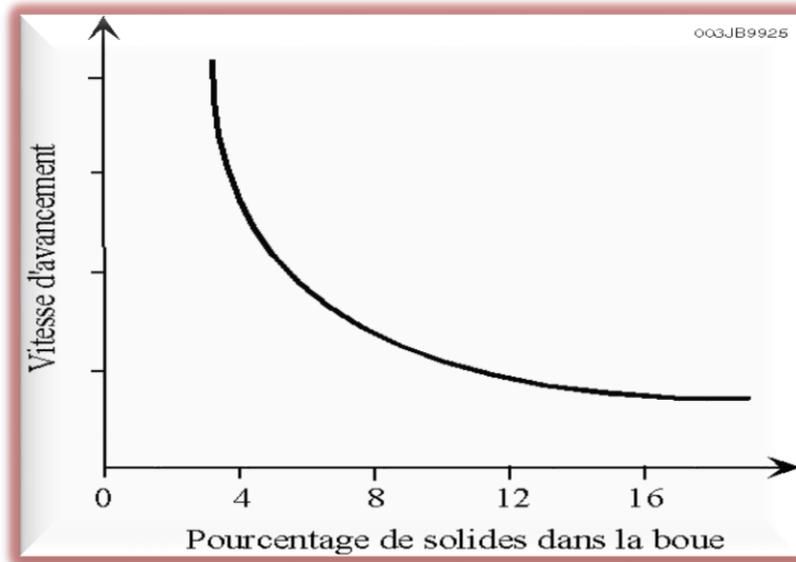


Fig. III. 9 : L’effet de Teneur en solide sur la ROP [9]

III.3.2.4. L’usure de l’outil :

Les outils ont tendance à forer lentement avec l’avancement du forage à cause de l’usure des dents. La longueur des dents d’un outil de forage diminue continuellement par abrasion. Plusieurs auteurs ont publié des modèles mathématiques pour calculer l’effet de l’usure des outils sur la vitesse d’avancement pour les outils à molette. Galle et Woods ont publié en 1963 le modèle suivant [14] :

$$R = \left(\frac{1}{0.928125 * h^2 + 6h + 1} \right)^p \dots \dots \dots (III. 2)$$

Dont h est la fraction de la hauteur des dents usées, et a7 est un exposant.

Dans un travail plus récent Bourgoyne et Young ont suggéré une expression similaire mais plus simple [3]:

$$R = e^{-a_7 h} \dots \dots \dots (III. 3)$$

Bourgoyne et Young ont suggéré que l’exposant a7 est déterminé sur la base des observations faites sur le déclin de la vitesse de pénétration avec l’usure des dents dans les descentes précédentes de l’outil dans des conditions similaires.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a vu les différents paramètres de forage et comment affectant la vitesse d'avancement. Afin d'assurer le bon déroulement d'une opération de forage, il faut optimiser tous les autres paramètres avant d'arriver à l'optimisation des paramètres mécaniques de forage, pour avoir une bonne optimisation on doit utiliser des modèles mathématiques tel que le modèle d'Eckel et le modèle de l'Energie spécifique qui fera l'objet de chapitre suivant.



CHAPITRE IV

L'OPTIMISATION DES PARAMETRES MECANIQUES DE FORAGE



IV.1. Introduction :

L'optimisation du temps de réalisation d'un puits pétrolier peut être effectuée par l'ajustement d'un ou plusieurs paramètres, Ceci peut être réalisé essentiellement par :

- La minimisation du prix de mètre foré.
- La minimisation des problèmes de forage.

La minimisation du coût de forage se fait par l'application d'une combinaison de paramètres optimaux de forage, autrement dit il faut minimiser au maximum les problèmes de forage générés par le choix des paramètres inadéquats.

Dans cet esprit des études d'optimisation des paramètres de forage ont été mis en place pour maîtriser mieux les coûts de forage.

Le but de cette étude est d'optimiser ROP par un traitement des données d'un puits d'une bonne performance appelé puits de référence.

Cette étude concerne seulement le choix des paramètres mécaniques (WOB, RPM) et on considère que tous les autres paramètres sont optimaux.

IV.2. Définition de l'optimisation :

D'une manière générale, l'optimisation de la vitesse d'avancement est définie par la bonne sélection des paramètres mécaniques et hydrauliques de forage en fonction des conditions géologiques afin d'obtenir un meilleur ROP.

IV.3. Les objectifs de l'optimisation :

Parmi les plusieurs objectifs de l'optimisation de ROP on peut citer :

- L'amélioration continue des techniques de forage.
- Réduction des coûts d'un mètre foré.
- Minimiser le temps de l'opération de forage.
- La réduction d'endommagement des équipements de fond.
- La précision des surveillances sur les paramètres durant le forage.
- Une meilleure utilisation des équipements.

IV.4. Généralités sur l'Algorithme d'Optimisation (Gradient Réduit)

La théorie d'optimisation est un cadre mathématique permettant d'interpréter et de résoudre dans les mêmes termes un grand nombre de problèmes de commande optimale, d'identification, d'analyse numérique, de statistique, de mécanique et d'économie.

L'optimisation est présente partout où il y a nécessité d'améliorer (rationnaliser) la conception d'un système ou le déroulement d'un processus qu'il soit industriel ou autre.

Optimiser c'est trouver les valeurs extrêmes d'une fonction (d'un modèle) permettant par exemple de minimiser les coûts ou de maximiser les bénéfices.

IV.4.1. Définition de base

N'importe quel procédé industriel ou autre, peut être représenté sous forme de bloc schéma (figure IV.2) où l'on retrouve :

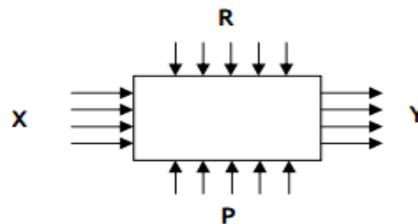


Fig. IV. 1 : Bloc schéma.

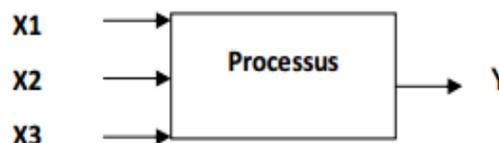
X : les variables des commandes : Ce sont des variables ayant une influence directe sur le processus à optimiser et sur lesquelles on peut exercer une décision.

R : les perturbations aléatoires : sont des variables dont le changement est fonction du temps sont invisibles (ex : température, pression).

P : les paramètres : sont les caractéristiques constantes du processus.

Y : les variables d'états : sont des variables mesurables (ou calculables) mais non commandables, Elles sont le résultat d'un choix des variables des commandes, aucune action ne peut changer leur valeur.

Le schéma précédant est une représentation complète du processus, mais on peut le présenter par un schéma plus simple incluant uniquement les variables des commandes et les variables de sortie objet de la modélisation



L'objet de toute modélisation est de définir la relation

$$Y = f(x1, X2, X3).$$

❖ **Modèle d'optimisation**

Dans le cas général, un modèle d'optimisation se compose des deux parties :

- ✓ **Fonctionnelle** : Egalement appelée fonction objectif ou fonction de but, c'est la représentation mathématique du critère d'optimisation, il s'exprime comme suit :
- ✓ **Système des contraintes** : les variables des commandes et les variables de sortie sont souvent soumises à des limitations d'ordre technologique définissant le domaine des solutions admissibles :

$$\mathbf{x}^-_1 \leq \mathbf{X}_1 \leq \mathbf{x}^+_1, \dots \dots \dots (1)$$

$$\mathbf{x}^-_2 \leq \mathbf{X}_2 \leq \mathbf{x}^+_2 \dots \dots \dots (2)$$

On subdivise le problème d'optimisation en deux catégories :

- Problème de programmation linéaire (PPL) :

On dit qu'un problème est un PPL si le fonctionnel (*) et toutes les contraintes (1), (2) sont linéaires.

- Problème de programmation non linéaire (PNL) :

On dit qu'un problème est PNL si le fonctionnel (*) ou l'une des contraintes (1) ou (2) sont non linéaires.

IV.4.2. Problème de programmation non linéaire (PNL)❖ **Algorithme de gradient réduit (méthode de Jacobi) :**

On distingue :

- L'algorithme du gradient réduit
- L'algorithme du gradient réduit généralisé (G.R.G)

Le premier est utilisé dans le cas où les contraintes sont sous forme d'égalité.

Le deuxième (G.R.G) (gradient réduit généralisé) traite les problèmes non linéaires avec tous les type de contraintes (égalité on inégalité).

L'équation de l'énergie spécifique dans notre étude représente des problèmes d'optimisation complexe contiennent des contraintes linéaire et non linéaire et afin de résoudre ce problème on a utilisé un outil d'optimisation sur l'Excel qui nommée par **(le solver)**.

IV.5. L'optimisation des paramètres mécaniques d'un outil PDC :

Le type de l'outil ayant été défini, il faudra lui appliquer un poids et une rotation tel que le prix de mètre foré en résultant soit minimal. On imagine facilement qu'on augmentant le WOB et le RPM de l'outil, on augmente sa vitesse d'avancement, mais que l'on diminue son temps de forage car sa vitesse d'usure augmente. On conçoit qu'il soit alors possible de définir d'un couple poids-rotation permettant d'obtenir un prix de mètre foré minimal

L'équation du prix de mètre s'écrit [17] :

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

Après l'analyse nous constatons que tous les éléments de cette formule sont fixes à l'exception du temps de forage (T_f) qui est déterminant, nous allons donc rechercher une image mathématique de métrage M et de temps de forage T_f , que peut réaliser un outil sous un couple poids rotation et dans un milieu (terrain, boue, etc.) donné.

Pour minimiser le temps de forage nous passons obligatoirement par l'augmentation (le plus haut possible) de la vitesse d'avancement (ROP) qui est fonction de WOB et RPM et l'état de la formation.

Principe de travail :

L'optimisation du poids sur l'outil et la vitesse de rotation est certainement celle qui a été le plus étudié. L'optimisation est divisée en deux parties :

- ✓ Traitement des données des puits voisins pour déterminer les coefficients de formation.
- ✓ Optimisation du poids sur l'outil et la vitesse de rotation selon la méthode proposée soit par Eckel ou par la minimisation de l'énergie spécifique.

IV.5.1. L'optimisation par l'utilisation du modèle d'Eckel :**IV.5.1.1. Présentation de modèle :**

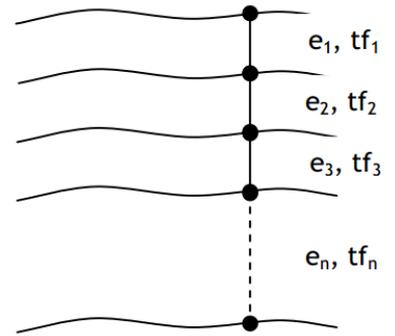
Pour déterminer les paramètres optimaux on utilise le modèle d'Eckel présente par l'équation suivante [15] :

$$ROP = C_f \cdot WOB^k \cdot RPM^a \dots \dots \dots (IV.1)$$

Il est indispensable de discrétiser la phase en petite intervalle d'épaisseur (e) pour le but de diminué l'hétérogénéité de la formation.

$$Tf = \sum_{i=1}^n tf = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{ROP_i} \dots \dots \dots (IV.2)$$

Tel $ROP_i = C_{fi} \cdot WOB_i^{ki} \cdot RPM_i^{ai}$



IV.5.1.2. Calcul des coefficients C_f, k, a :

Le puits de référence est considéré à la même lithologie que le puits à foré, et les coefficients de formation peut être déterminé de fait de l'enregistrement instantané des paramètres.

La vitesse d'avancement de la couche (i) est [17]:

$$ROP_i = C_{fi} \cdot WOB_i^{ki} \cdot RPM_i^{ai} \dots \dots \dots (IV.3)$$

ROP, WOB, RPM, sont connus à partir de l'enregistrement de puits de référence, et Afin définir les coefficients Cf, k, a dans chaque mètres forés on utilise la méthode des moindres carrées

IV.5.1.2.1. Calcule par la méthode de Moindre carré linéaire :

Dans le but de calculer des coefficients C_f, k, a on procède comme suit :

D'après l'équation (IV.1) [15] :

$$\ln(ROP) = \ln(C_f) + k * \ln(WOB) + a * \ln(RPM) \dots \dots \dots (IV.4)$$

La minimisation de la vitesse d'avancement se fait par la minimisation de la fonction $\ln(ROP)$.

L'erreur commise au point i s'écrit :

$$e_i = \ln(ROP_i) - [\ln(C_f) + k * \ln(WOB_i) + a * \ln(RPM_i)] \dots \dots \dots (IV.5)$$

La somme des erreurs quadratiques commises dans l'intervalle [j-n, j] peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Z_j = \sum_{i=j-n}^j e_i^2 \dots \dots \dots (IV.6)$$

Dont j représente le point dans lequel on optimise les paramètres.

Une condition nécessaire et indispensable pour que z soit minimale dans l'espace de ces coefficient est que :

$$\frac{\partial Z_j}{\partial \ln(Cf)} = \sum_{i=j-n}^j \ln(ROP_i) - [\ln(Cf) + k * \ln(WOB_i) + a * \ln(RPM_i)] = 0$$

$$\frac{\partial Z_j}{\partial k} = \sum_{i=j-n}^j \ln(ROP_i) * \ln(WOB_i) - [\ln(Cf) * \ln(WOB_i) + k * \ln(WOB_i)^2 + a * \ln(RPM_i) * \ln(WOB_i)] = 0$$

$$\frac{\partial Z_j}{\partial a} = \sum_{i=j-n}^j \ln(ROP_i) * \ln(RPM_i) - [\ln(Cf) * \ln(RPM_i) + k * \ln(RPM_i) * \ln(WOB_i) + a * \ln(RPM_i)^2] = 0$$

Alors on a 3 équations et 3 inconnues, on résout ce système pour calculer les coefficients Cf, k, a.

IV.5.1.2.2. Calcule par la méthode de moindre carrée non linéaire :

La méthode de moindre carré non linéaire consiste à lisser les n points des essais avec la fonction non linéaire :

$$Y = f(x, Cf, k, a)$$

On peut poser :

$$Cf = Cf^* + \varepsilon_1$$

$$k = k^* + \varepsilon_2$$

$$a = a^* + \varepsilon_3$$

Ou : Cf^* , k^* , a^* : sont connus (des valeurs initiaux minimales).

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: sont des inconnues de faibles valeurs.

On initialise le processus itératif avec les valeurs minimales

$$Y = f(x, Cf^* + \varepsilon_1, k^* + \varepsilon_2, a^* + \varepsilon_3)$$

Elle consiste à une approximation de la solution par un développement en série de Taylor limite , Il en résulte en système linéaire suivant :

$$Y = f(x, Cf^*, k^*, a^*) + \varepsilon_1 \frac{\partial f(x, Cf^*, k^*, a^*)}{\partial Cf} + \varepsilon_2 \frac{\partial f(x, Cf^*, k^*, a^*)}{\partial k} + \varepsilon_3 \frac{\partial f(x, Cf^*, k^*, a^*)}{\partial a}$$

C'est un système linéaire à trois inconnues $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

Une fois ces inconnues déterminées nous avons une nouvelle estimation des Cf, k, a correctes

On peut alors répéter le processus en affectant des nouvelles valeurs de Cf^*, k^*, a^* à Cf, k, a . Ce procédé assure la convergence vers les valeurs de Cf, k, a correctes.

➤ **Coefficient de corrélation multiple :**

Coefficient de corrélation multiple R est le seul juge de qualité de modèle c'est-à-dire ce que le modèle reflète d'une manière convenable le processus.

R est plus proche de l'unité donc le modèle est adapté à la formation, l'équation qui définit R est égale à [17] :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Observed} - Y_{calculated})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{Observed} - \bar{Y})^2}} \dots \dots \dots (IV. 7)$$

IV.5.1.3. Détermination des paramètres mécanique (WOB et RPM) optimaux :

Et de-là on définit les paramètres optimaux qui nous permettent d'avoir la vitesse d'avancement optimale au point j [15]:

$$ROP_{opti j} = C_{fj} \cdot WOB_{opti j}^{k_j} \cdot RPM_{opti j}^{a_j} \dots \dots \dots (IV. 8)$$

Dont:

$$WOB_{opti j} = \min_{j-n+1 \leq i \leq j} (WOB(i)) \text{ si } k_j < 0$$

$$WOB_{opti j} = \max_{j-n+1 \leq i \leq j} (WOB(i)) \text{ si } k_j \geq 0$$

$$RPM_{opti j} = \min_{j-n+1 \leq i \leq j} (RPM(i)) \text{ si } a_j < 0$$

$$RPM_{opti j} = \max_{j-n+1 \leq i \leq j} (RPM(i)) \text{ si } a_j \geq 0$$

$(i, n) \in \mathbb{N}$, et $j \in \mathbb{N} - [0, n - 1]$, et $(i, j, n) \leq N$

Dont N est le nombre des points sur lesquels on fait l'optimisation

IV.5.2. L'optimisation par l'utilisation du modèle de l'énergie spécifique :

L'optimisation par la méthode d'Eckel est une méthode très simple, elle nous permet de déterminer le couple WOB et RPM optimaux, mais le problème de cette méthode, c'est qu'elle prend seulement la modélisation de la ROP en fonction de poids sur l'outil et la vitesse de rotation et ne prend pas en considération l'usure des cutters et le founder point (le point au la ROP ne répande plus linéairement avec l'augmentation de WOB), pour résoudre ce problème plusieurs auteurs ont combiné le modèle de L'énergie spécifique avec d'autres modèles de ROP et ont développé des méthodologies pour estimer l'usure de l'outil pendant le forage.

IV.5.2.1. Définition de l’Energie Spécifique (Es) :

L’énergie spécifique est le travail effectué pour arracher un volume unitaire de la roche. Ce modèle de « Energie Mécanique Spécifique » a été utilisé effectivement dans les laboratoires pour évaluer l’efficacité d’un outil de forage. Il est évident que pour creuser un volume donné il faut une certaine quantité d’énergie minimum sera exigé, sa quantité dépendra de type d’outil utilisé et la nature de la roche [24].

IV.5.2.2. Principe de la théorie de l’énergie spécifique :

La théorie de l’énergie spécifique (Es) fournit des moyens pour prévoir ou d’analyser les performances de l’outil de forage. L’Es est basée sur des principes fondamentaux liés à la quantité d’énergie exigée pour enlever un volume unitaire de roche et l’efficacité de l’outil pour détruire la roche [27].

Le paramètre de l’Es est une mesure utile pour présager la puissance requise (le torque de l’outil et le RPM) pour un type particulier d’outil afin de forer à un ROP donné dans un type de roche donné. L’équation (IV.8) montre la relation de l’énergie spécifique de Teale dérivée pour le forage rotary dans les conditions atmosphériques :

$$ES = \left(\frac{WOB}{A_b}\right) + \left(\frac{120\pi}{A_b}\right)\left(\frac{RPM.TQ}{ROP}\right) \dots \dots \dots (IV.9)$$

IV.5.2.3. Concept de l’énergie spécifique minimum :

Teale [7] a également présenté le concept de l’énergie spécifique minimum et l’efficacité mécanique maximum. L’énergie spécifique minimum est atteinte quand l’énergie spécifique s’approche où être presque égale à l’effort de compression de la roche étant forée (CS). L’efficacité mécanique (EFF_M) pour n’importe quel type d’outil est alors calculée comme suit :

$$EFF_m = \frac{CS}{ES} \dots \dots \dots (IV.10)$$

Et l’efficacité maximum atteinte quand $\frac{CS}{ES}$ tend vers 1

IV.5.2.4. Calcule de CCS :

La méthode de calcul de la CCS est basée sur l’UCS, la formule la plus utilisée dans le forage pétrolier est la corrélation de Rampersad, elle s’exprime comme suite [26] :

$$UCS = CCS * (1 + as * Pe^{bs}) \dots \dots \dots (IV.11)$$

CCS : la résistance à la compression confinée. (Psi)

UCS : la résistance à la compression non confinée. (Psi)

as, bs : coefficient de formation.

Tableau IV.1: Les coefficients de la corrélation pour les formations perméables et Imperméable.

Formation	Perméable	Imperméable
Pe	Ph-Pp	Ph
As	0.0133	0.00432
Bs	0.577	0.782

IV.5.2.5. Détermination de l'UCS :

L'UCS peut être déterminé à partir du critère de rupture de Mohr Coulomb [27], ce critère en terme maximaux s'écrit :

$$Sv' = UCS + Sh' * \tan \alpha \dots \dots (IV.12)$$

Sv' : la charge effective verticale.

Sh' : la charge effective horizontale.

α : l'angle de rupture.

La charge effective est définie comme la différence entre la charge totale et la pression de pore : $Sv' = Sv - \dots \dots \dots (IV.13)$

Sv : la charge totale.

pp : la pression de pore.

IV.5.2.5.1. Détermination de l'UCS par Les tests de laboratoire :

Les tests de laboratoire sur des échantillons de roche est la méthode la plus précise pour calculer la résistance à la compression de la roche, ces tests sont fait sur un échantillon cylindrique de roche dans une cellule triaxiale [15].

La cellule triaxiale peut contrôler la charge de confinement, la charge verticale, et la pression de pore. Tout d'abord on applique une charge de confinement isotopique sur l'échantillon, et puis on augmente la charge verticale jusqu'à que la roche atteint la charge de rupture. Durant l'essai, on mesure les déformations respectivement axiales et circonférentielles pour quantifier les propriétés élastiques.

IV.5.2.5.2. Détermination de l'UCS à l'aide des logs :

L'utilisation du log sonique pour la détermination des propriétés élastiques des roches est souvent utilisée. Il existe plusieurs corrélations entre la résistance à la compression d'une roche et le temps de retour de l'onde sonore [15].

IV.5.2.6. Le modèle d’usure d’un outil PDC :

Les auteurs « Hareland Et Rampersad » ont mis au point une corrélation empirique pour estimer l’usure de cutter d’un outil PDC, ils ont exprimé l’usure comme un modèle mathématique en fonction de la vitesse d’avancement (ROP), et poids sur l’outil (WOB), coefficients d’abrasivités (Wc, A_{abr}) et la résistance à la compression de la formation (CS) [17].

$$W_f = 1 - \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \dots \dots \dots (IV.14)$$

IV.5.2.7. Méthode d’optimisation :

La méthode d’optimisation est basée sur la construction d’un modèle d’optimisation qui nous donne le choix optimal des paramètres mécanique conduisant à un minimum d’énergie spécifique ES appliqué afin d’améliorer La ROP et augmenter la durée de vie de l’outil la plus possible.

IV.5.2.7.1. Le modèle d’optimisation :

La fonction objective :

Il est indispensable de discrétiser la phase en petite intervalle d’épaisseur (e) pour le but de diminué l’hétérogénéité de la formation.

L’énergie spécifique pour une seul couche est donné par l’équation suivante [17]:

$$ES_i = \left(\frac{WOB_i}{A_b}\right) + \left(\frac{120\pi_i}{A_b}\right) \left(\frac{RPM_i \cdot TQ_i}{ROP_i}\right) \dots \dots \dots (IV.15)$$

D’après le concept de l’énregie spécifique minimal on a ES=ES_{min}= CS

donc :

$$\Rightarrow ES_i = \left(\frac{WOB_i}{A_b}\right) + \left(\frac{120\pi}{A_b}\right) \left(\frac{RPM_i \cdot TQ_i}{ROP_i}\right) = CS_i$$

$$WOB_i + 120\pi \left(\frac{RPM_i \cdot TQ_i}{ROP_i}\right) - A_b \cdot CS_i = 0$$

On remplace ROP par la formule proposé par Eckel : $ROP = C_f \cdot WOB^k \cdot RPM^a$

$$\Rightarrow WOB_i + 120\pi \left(\frac{RPM_i \cdot TQ_i}{C_{fi} \cdot WOB_i^{ki} \cdot RPM_i^{ai}}\right) - A_b \cdot CS_i = 0$$

$$\Rightarrow C_{fi} \cdot WOB_i + 120\pi \left(\frac{RPM_i^{1-a} \cdot TQ_i}{WOB_i^{ki}}\right) - A_b \cdot C_{fi} \cdot CS_i = 0 \dots \dots \dots (IV.16)$$

Calcul de torque TQ :

Le coefficient de frottement μ a été introduit pour exprimer le Torque (T) tant qu'une fonction de poids sur l'outil (WOB), comme suite [7] :

$$\mu_i = 36 \cdot \frac{TQ_i}{WOB_i \cdot D_b}$$

$$\Rightarrow TQ_i = \mu_i \frac{WOB_i \cdot D_b}{36} \dots \dots \dots (IV.17)$$

On inject l'équation(IV. 17) dans l'équation (IV. 16), la formule sera comme suit :

$$C_{fi} \cdot WOB_i + 120\pi \left(\frac{RPM_i^{1-ai} \cdot WOB_i \cdot D_b}{36 \cdot WOB_i^{ki}} \right) - A_b \cdot CS_i \cdot C_{fi} = 0$$

$$\Rightarrow C_{fi} \cdot WOB_i + 3.33\pi \cdot \mu_i \cdot D_b \cdot RPM_i^{1-ai} \cdot WOB_i^{1-Ki} - A_b \cdot CS_i \cdot C_{fi} = 0$$

La dernière équation est valable seulement pour une seul couche et pour construire le modèle gobal, il faut faire la somme des équation de tout les couches.

Calcul de coefficient de glissement (μ) :

A partir du puits de référence, on prend l'enregistrement des paramètres mètre par mètre mais cette fois ci, on a besoin des valeurs du torque aussi pour calculer l'énergie spécifique ES, et après, on va exprimer μ sous une équation très simple.

La formule de ES est :

$$ES = \left(\frac{WOB}{A_b} \right) + \left(\frac{120\pi}{A_b} \right) \left(\frac{RPM \cdot TQ}{ROP} \right)$$

On garde le ROP sans remplacement mais on va remplacer le torque par sa formule, donc l'équation :

$$\Rightarrow ES = \left(\frac{WOB}{A_b} \right) + \left(\frac{120\pi}{A_b} \right) \left(\frac{RPM \cdot \mu \cdot WOB \cdot D}{36 \cdot ROP} \right)$$

$$\Rightarrow A_b \cdot ROP \cdot ES = ROP \cdot WOB + 3.33\pi \cdot D \cdot RPM \cdot WOB \cdot \mu$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{(A_b \cdot ES - WOB) \cdot ROP}{3.33\pi \cdot D \cdot RPM \cdot WOB}$$

Et les valeurs du coefficient de glissement pour chaque couche sont :

$$\mu_i = \frac{(A_{bi} \cdot ES_i - WOB_i) \cdot ROP_i}{3.33\pi \cdot D \cdot RPM_i \cdot WOB_i} \dots \dots \dots (IV.18)$$

Les contraintes :

Les contraintes sont subdivisées en deux parties [17] :

- Contraintes linéaires sur la capacité des éléments de coupes, on prend les limitations données par les constructeurs des outils sur le poids et la rotation Maximum qu'il faut appliquer sur l'outil.

$$\begin{aligned} W_{iMin} \leq W_i \leq W_{iMax} \quad i = 1:n \\ N_{iMin} \leq N_i \leq N_{iMax} \quad i = 1:n \end{aligned} \quad (IV.19)$$

- Contrainte non linéaire sur l'usure des cutters, la valeur de ce dernier est positif et il ne faut pas dépasser 1.

$$\begin{aligned} \text{C'est-à-dire : } 0 \leq W_f \leq 1 \quad \Rightarrow \quad 0 \leq 1 - \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \leq 1 \\ \Rightarrow 0 \leq \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \leq 1 \\ \Rightarrow \left[\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \right]^2 \leq 1 \dots \dots \dots (IV.20) \end{aligned}$$

Donc le modèle d'optimisation devra comme suit :

Le foctionnel :

$$\sum_{i=1}^n \left[C_{fi} \cdot WOB_i + 3.33\pi \cdot D_b \cdot \mu_i \cdot RPM_i^{1-ai} \cdot WOB_i^{1-Ki} - A_b \cdot C_{fi} \cdot CS_i \right]^2 \Rightarrow \min \dots \dots \dots (IV.21)$$

Les contraintes :

$$\begin{aligned} W_{iMin} \leq W_i \leq W_{iMax} \quad i = 1:n \\ N_{iMin} \leq N_i \leq N_{iMax} \quad i = 1:n \\ \left[\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \right]^2 \leq 1 \quad i = 1:n \end{aligned}$$

Le modèle obtenu est un problème de programmation non linéaire PNL (modèle de progression non linéaire) avec des contraintes linéaires et des contraintes non linéaires. Par la résolution de ce modèle, on peut défini les couples poids-rotation optimaux de chaque couche.

IV.5.2.7.2. Calcule des coefficients de formation (Cf, k, a) :

Nous suivons la même technique (MMC linéaire) utilisée par Eckel pour l'identification des coefficient de formation (Cf, k, a).

IV.5.2.7.3. Calcule des coefficients d'abrasivité et d'usure (Aabr, Wc) :

Il faut calculer le coefficient d'abrasivité et d'usure pour introduire ces dernier dans la contrainte non linéaire qui définit la limitation d'usure des cutters.

D'après l'équation (IV.14) :

$$\begin{aligned} W_f = 1 - \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i = 8 \cdot (1 - W_f) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 8. (1 - W_f) - \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i = 0$$

Le coefficient d'abrasivité et d'usure a une valeur positive, donc il rentre comme contrainte pour identifier A_{abr} et W_c , cette contrainte nous oblige à passer d'identification simple par la méthode de moindre carrée vers la résolution d'un problème de programmation non linéaire (PNL), problème d'optimisation.

On considère que l'usure de l'outil faite d'une manière régulière le long de puits, le modèle pour identifier A_{abr} et W_c sera comme suit :

Le fonctionnel :

$$[8. (1 - W_f) - \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i]^2 \Rightarrow \min \dots \dots \dots (IV.22)$$

Les contraintes:

$$W_{ci} \geq 0 \quad i = 1:n$$

$$A_{abri} \geq 0 \quad i = 1:n$$

IV.5.2.7.5. L'optimisation des paramètres mécaniques (WOB, RPM) :

En appliquant les résultats obtenus dans le puits de référence (les facteurs de formation, C_f , A_{abr} , k , μ et a) pour le puits à forer, il nous reste à résoudre le modèle d'optimisation (IV.21) pour déterminer le couple WOB-RPM conduisant à un prix du mètre foré le plus bas possible [17].

IV.5.3. Les outils informatiques utilisées pour l'optimisation :

VI.5.3.1. Drilling parameters optimizer:

C'est très difficile de résoudre un problème d'optimisation avec un nombre des paramètres à optimiser très grand. Le problème d'optimisation de l'équation de Eckel dans cette étude contient un ensemble des problèmes complexes et des fonctionnels non linéaires et linéaires. Pour cela, on a commencé par créer un ensemble des programmes en MATLAB, reliés entre eux par tous les problèmes d'optimisation posés dans cette étude ; et par la suite, on améliore la méthode de téléchargement des données nécessaires pour procéder à la résolution et la méthode d'affichage des résultats pour faciliter l'exploitation et l'introduction des interfaces dans les programmes pour faciliter la manipulation et sa compréhension par tout un chacun.

Enfin, on a réussi à construire un logiciel complet d'optimisations outil PDC de nommé :Drilling Parameters Optimizer.

Pour plus des détails sur le Logiciel, voir l'annexe A

.

IV.5.3.1.1. L'organigramme de Logiciel :

Avant tout, on va montrer l'organigramme de logiciel afin de présenter les démarches des opérations à partir du téléchargement des données jusqu'à l'affichage des résultats.

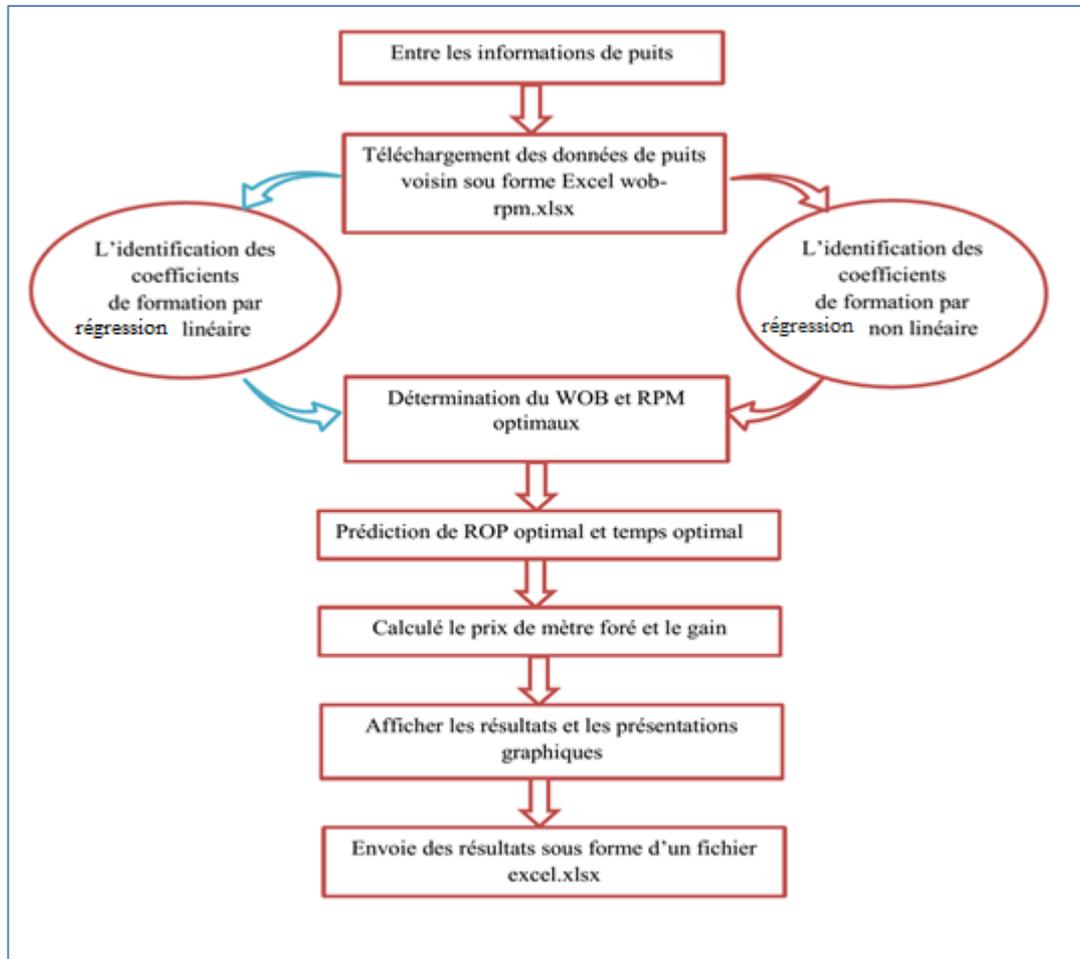


Fig. IV. 2 : L'organigramme de Logiciel

IV.5.3.1.2. Les données d'entrées et les sorties du logiciel :

Toutes les informations de puits de référence ont été prises à partir de rapport de fin de puits (End of Well Report) faite par la société de forage.

❖ Les données d'entrée:

- Les informations générales du puits à forer (le nom de puits, le champ, ...).
- Le diamètre de l'outil.
- Le temps de forage et le ROP dans le puits de référence.
- La profondeur finale de puits de référence.
- Les paramètres de forage mètre/mètre appliqués dans le puits de références.

- Le prix par heure de location de l'appareil de forage.
- I : L'intervalle de discrétisation.

NOTATION :

Il faut tout d'abord choisir la méthode de résolution (linéaire ou non linéaire).

❖ Les sorties du programme :**1. Identification:**

- **Cf. k, a** : les coefficients de formation de chaque intervalle discrétisé.

2. Optimisation:

- **WOB opt** : Le poids sur l'outil optimal pour chaque intervalle discrétisé.
- **RPM opt** : La rotation optimale pour chaque intervalle discrétisé.

3. La simulation:

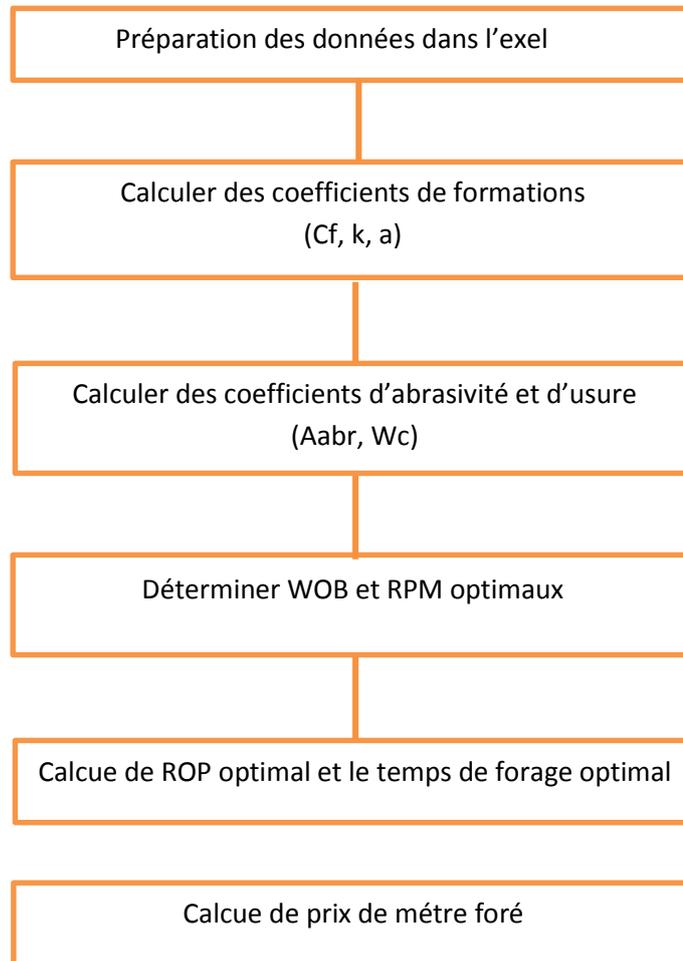
- **ROP opt** : La vitesse d'avancement conduite par le couple WOB-RPM optimal.
- **Tf opt** : le temps de forage conduit par le couple WOB-RPM optimal.

4. Les courbes :

- Une courbe présente une comparaison graphique entre les paramètres réels (WOB, RPM, ROP) appliqués sur l'outil dans le puits de référence et les paramètres optimaux (WOB, RPM, ROP) définis par le Logiciel selon la méthode de résolution choisi.
- Une courbe présente une comparaison graphique entre le temps de forage réel dans le puits de référence et le temps de forage optimal si on appliquera les paramètres Optimaux.

IV.5.3.2. L'outil solver :

Est un outil d'optimisation et d'allocation de ressources. Il peut vous aider à déterminer comment utiliser au mieux des ressources limitées pour maximiser les objectifs souhaités (telle la réalisation de bénéfices) et minimiser une perte donnée (tel un coût de production). En résumé, il permet de trouver le minimum, le maximum ou la valeur au plus près d'une donnée tout en respectant les contraintes qu'on lui soumet. Vous utiliserez alors le solveur lorsque vous recherchez la valeur optimale d'une cellule donnée par ajustement des valeurs de plusieurs autres cellules, ou lorsque voulez fixer des limites pour une ou plusieurs des valeurs intervenant dans le calcul (les étapes de calcul à l'aide de solver présentées dans l'annexe B)

IV.5.3.2.1. L'organigramme de L'Energie spécifique :**IV.6. Conclusion :**

Sur la base des modèles mathématiques développés par Eckel, R.Teal, Hareland et Rampersad, et avec l'utilisation de la méthode de régression multiple et GRG on a pu construire des modèles d'optimisation des paramètre mécaniques (WOB et RPM). Ainsi que on a utilisé le Matlab et l'Exel pour la résolution de ces problèmes d'optimisation.

Dans le chapitre suivant on va appliquer ces modèles sur différents puits situent au champs de Hassi Messaoud afin de vérifie leurs efficacités.



CHAPITRE V

APPLICATION DES MODELES D'OPTIMISATION AU CHAMPS DE HASSI MESSAOUD



V.1. Situation géographique:

Le champ de Hassi Messaoud est considéré comme l'un des plus grands gisements dans le monde. Il se situe à environ 850 km au Sud-Sud-Est d'Alger, à 280 km au Sud-Est du gisement de gaz-condensat de Hassi R'Mel et à 350 km à l'Ouest de la frontière tunisienne. Il a pour coordonnées Lambert :

$$X = [790.000 - 840.000] \text{ Est}$$

$$Y = [110.000 - 150.000] \text{ Nord}$$

Il est encadré par les latitudes 31°.30' et 32°.00' et les longitudes 5°.40' et 6°.20'.

Le champ de Hassi- Messaoud est subdivisé en deux secteurs :

Secteur Nord : zone des OM et ON.

Secteur Sud : zone des MD.

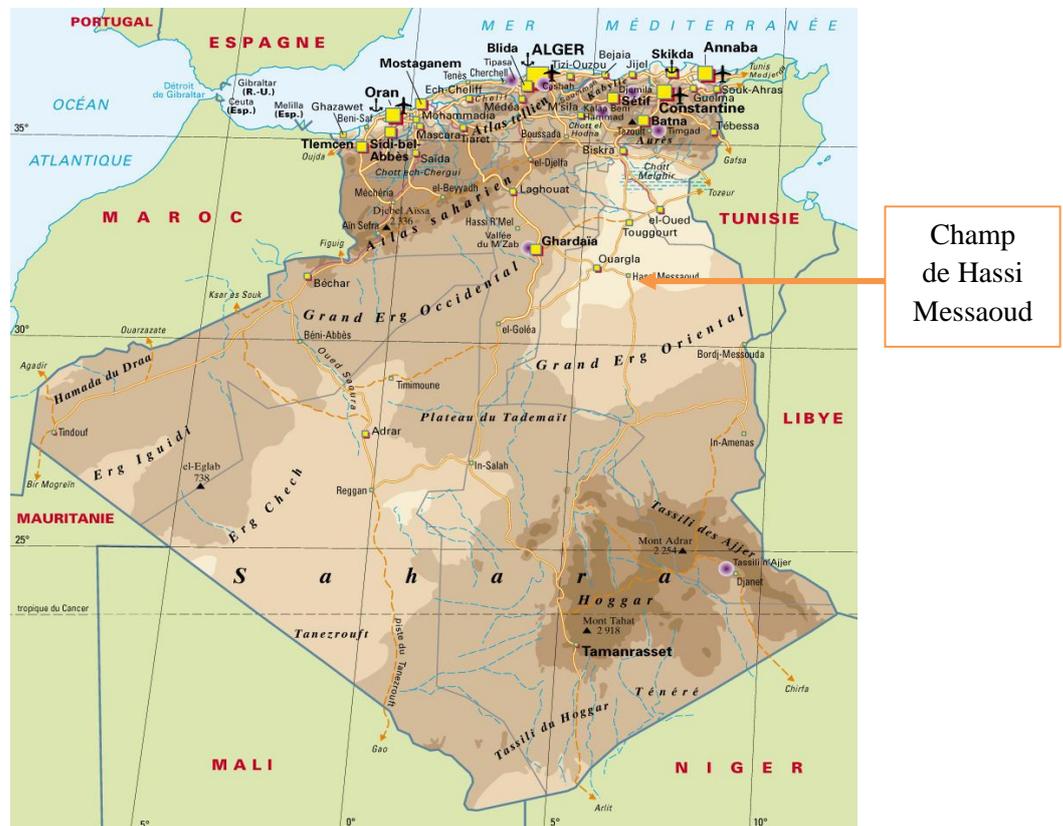


Fig.V.1 : Carte géographique de l'Algérie

V.2. Situation géologique :

Le champ de Hassi Messaoud occupe la partie centrale de la province triasique. Par sa superficie et ses réserves, il est le plus grand gisement de pétrole d'Algérie qui s'étende sur près de 2200 km² de superficie.

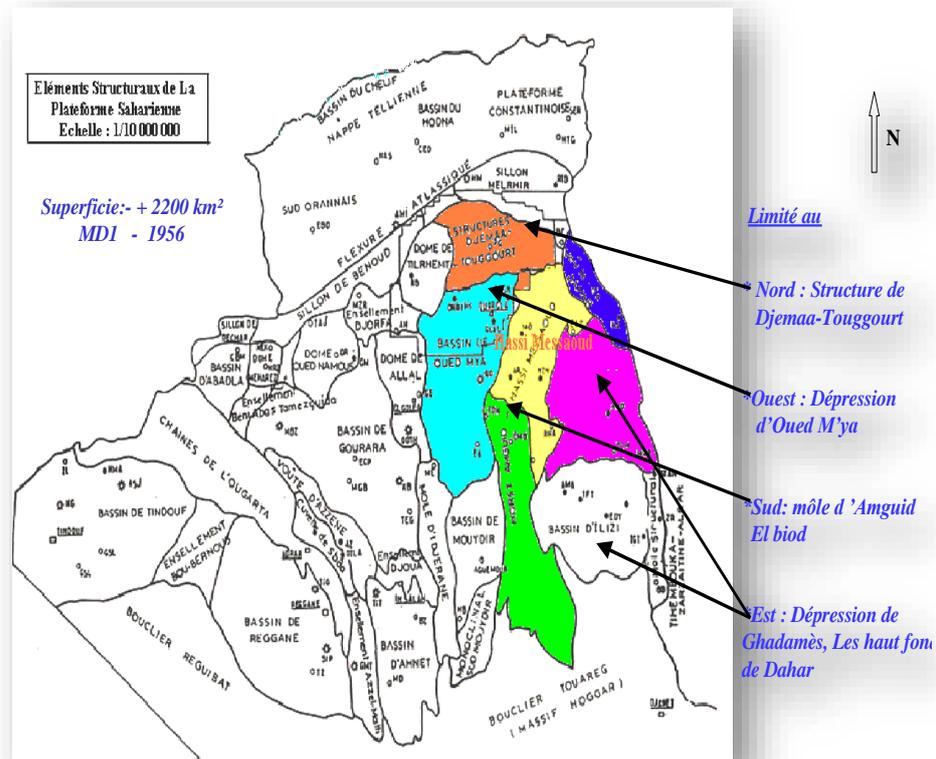


Fig.V.2 : Situation géologique du champ Hassi Messaoud.

Il est limité :

- ✓ Au Nord-Ouest par les gisements de Ouargla [Gellala, Ben Kahla et Haoud Berkaoui].
- ✓ Au Sud-Ouest par les gisements d'El Gassi, Zotti et El Agreb.
- ✓ Au Sud-Est par les gisements ; Rhourde El Baguel et Mesdar.

Géologiquement, il est limité :

- ✓ A l'Ouest par la dépression d'Oued M'ya.
- ✓ Au Sud par le môle d'Amguid El Biod.
- ✓ Au Nord par la structure Djammâa-Touggourt.
- ✓ A l'Est par les hauts fonds de Dahar, Rhourde El Baguel et la dépression de Ghadames.

V.3. Caractéristiques du réservoir :

Le gisement de Hassi Messaoud se caractérise par sa formation COMBRO ORDOVICIEN, sa profondeur entre 3361 à 3473 m.

La légèreté de son huile ($API = 54,5$) et sa pression initiale élevée (482 Kg/cm^2) pour un point de bulle entre 140 et 200 Kg/cm^2 .

V.4. Intérêt pétrolier

Le champ de Hassi Messaoud de par sa superficie et ses réserves est considéré parmi les plus grands gisements du monde avec une pression de gisement varie de 120 à 400 kgf/cm^2 , une température de l'ordre de 118°C à 123°C et une perméabilité très faible de 0 à 1darcy.

Le réservoir est lié aux quartzitiques du cambrien, l'horizon le plus productif est lié aux lithos zone R_a et R_1 dont les qualités pétro physiques sont assez bonnes. La couverture et assurée par une épaisse et étanche assise argilo salifère du trias, le champ de Hassi Messaoud est considéré comme une mosaïque de gisement délimitée par les barrières de perméabilité.

V.5. Lithologie du champ de Hassi Messaoud :

a - CÉNOZOÏQUE:

❖ Mio-Pliocène: (e = 240m)

Il est constitué de grès fin friable carbonaté roux avec intercalations de calcaire gréseux blanc à rosé, et de sable fin hyalin à rosé parfois argileux ou carbonaté, avec des intercalations de grès fins friables carbonatés blancs à roux. Il repose en sur discordance les formations sous-jacentes (discordance alpine).

❖ Éocène: (e = 120m)

Constitué des argiles brune rouges fortement sableuse, marnes, fines passées d'anhydrite blanche et calcaire dolomitique crayeux, avec parfois des rognons de silex.

b - MÉSOZOÏQUE

b.1) Crétacé :

Il est constitué de :

❖ Sénonien carbonaté: (e = 140m)

Principalement formé de calcaire dolomitique beige vacuolaire, localement fossilifère (gastéropodes, échinodermes) avec des intercalations de marne dolomitique et d'anhydrite à la base.

❖ Sénonien anhistorique: (e = 200m)

Il est constitué d'anhydrite blanche, de dolomie microcristalline, dure et d'argile gris-foncé légèrement dolomitique.

❖ Sénonien salifère: (e = 17m)

Il est composé principalement de sel blanc massif, d'anhydrite pulvérulente et de rares passées d'argile brune rouge.

❖ Turonien: (e = 70m)

Il est représenté par un ensemble de calcaire crayeux beige à blanc avec des passées de calcaire argileux gris à blanc. Il constitue un **réservoir aquifère**.

❖ Cénomaniens: (e = 145m)

Constitué essentiellement d'argile avec des intercalations :

- D'anhydrite au sommet avec des passées de sel.
- De marne dolomitique avec des passées de calcaire et de dolomie dans la partie inférieure.

❖ Albien: (e = 550m)

C'est un ensemble gréseux friable à granulométrie fine, argileux et carbonaté, à intercalations de marne, d'argile plastique souvent dolomitique et de sable. Les grès de l'Albien constituent un **réservoir aquifère**.

❖ Aptien: (e = 25m)

Représenté par des marnes dolomitiques grises à brunes avec des intercalations de dolomie microcristalline beige à rosée.

❖ Barrémien : (e = 370m)

Représenté en totalité de sable fin à très grossier avec des grès à la partie supérieure. On y note des intercalations et des passées d'argile sableuse et de dolomie. Il constitue également un **réservoir aquifère**.

❖ Néocomien: (e= 150m)

Composé d'argile verte et grise, sableuse et gypseuse à passées de grès blanc, argileux, et de dolomie rose microcristalline. A signaler la présence de lignite.

b. 2) Jurassique:**❖ Malm: (e = 210m)**

Il est constitué d'alternances:

- Grès fin à ciment calcaire-dolomitique à argileux, friable, blanc, à intercalations d'argile et versicolore de lignite.
- Argile plastique, verte et rouge, silteuse, devenant gris, indurée vers le bas.
- Calcaire dolomitique, blanchâtre et dolomie cristalline, fissurée.

❖ Dogger:

Représenté par deux niveaux:

-Argileux: (e = 140m)

Il est constitué d'argiles indurées, brunes et grises ; de calcaire blanc- crayeux et de marnes grises et silteuse.

-Lagunaire: (e = 100m)

Il est constitué d'anhydrite massive avec intercalations et passées d'argile plastique grise à brun-rouge, de dolomie cristalline, de sel massif et de marne grise.

❖ Lias:

Représenté par six niveaux :

- Anhydritique: (e = 140m)

Composé d'anhydrite massive blanche à intercalations et passées d'argile, de dolomie, de calcaire et de marne.

-Salifère : (e = 55m)

Il est constitué de sel massif incolore à rosé avec intercalations d'argile plastique.

-Horizon "B" : (e = 25m)

Composé de marne grise parfois salifère avec argile dolomitique gris-noir et argile brun-rouge salifère.

-S1 + S2 : (e = 230m)

Composé de sel massif incolore à rosé avec intercalations d'argile plastique salifère brun-rouge, d'argile indurée et d'anhydrite blanche.

-S3 : (e = 210m)

Il est composé de sel massif incolore avec intercalations et passées d'argile plastique salifère brun-rouge et d'argile indurée.

-Argiles supérieures : (e = 70m)

Représentées par de l'argile plastique souvent salifère, brun-rouge avec intercalations d'argile indurée et de sel.

b.3) Trias:

Représenté par cinq niveaux :

❖ **Argiles salifères S4: (e = 50m)**

Constituées d'argile brun-rouge, plastique a indurée avec intercalations de sel incolore.

❖ **Argiles inférieures: (e = 20m)**

Composées d'argile gris-vert à brun-rouge plus ou moins silteuse.

❖ **Argilo-gréseux: (e = 40m)**

C'est un ensemble généralement composé par la superposition de deux niveaux T2 et T1 avec des grès fins à moyens.

* **"T2"** : Composé de grès fin à très fin, à ciment argilo-ferrugineux et dolomitique par endroits avec alternance d'argile silteuse.

* **"T1"** : Composé de grès fin, argileux et d'argile silteuse et ferrugineuse.

❖ **Roches éruptives: (e = 15m)**

Constituées d'andésite verte fortement altérées à fissures subverticales remplies de calcite.

❖ **Série inférieure: (e = 45m)**

Reposant en discordance sur les termes paléozoïques (discordance hercynienne), elle est composée de grès fin à moyen, gris-beige silteux à argileux, et de passées d'argiles silteuse et feuilletées (objectif potentiel dans presque toute la région).

C) PALEOZOIQUE:

❖ **Dévonien inférieur: (e = 75m)**

Caractérisé par de l'argile gris-foncé à noire, indurée localement silteuse, avec des passées de grès très fin à ciment argileux et de silt stone.

❖ **Silurien radioactif: (e= 60m)**

Représenté essentiellement par de l'argile grise à noire, fortement radioactive, fossilifère avec des intercalations et des passées de grès fin gris noir à ciment argileux. On note la présence de pyrite et des traces de dolomie.

❖ **Ordovicien:**

Constitué (haut en bas) par les Assises suivantes :

✓ **" Dalle de M'KRATTA " : (e= 10m)**

Composée de grès quartzitique fin à moyen, gris à blanc, à ciment carbonaté et pyriteux avec des passées micro-conglomératiques.

✓ **" Argiles micro-conglomératiques" : (e = 80m)**

Composée d'argile noire silteuse, compacte à éléments de quartz sub-anguleux à sub-arrondis pouvant atteindre le centimètre avec parfois des éléments de roche éruptive. On y rencontre de la pyrite et des passées de grès.

✓ " **Grès d'Oued Saret** " : (e = 50m)

Composés de deux ensembles :

- Argile noire micacée à intercalations de silt stone gris. A noter la présence de galet pyriteux et de galets de silt stone.

- Grès fin gris à ciment argilo-carbonaté, quartzitique par endroit.

✓ " **Argiles d'Azzel** " ;(e = 50m)

Composées d'argile noire indurée micacée, silteuse et fossilifère (trilobites, graptolites). On y note la présence de silt stone gris et de grès fin blanc à gris avec des traces de pyrite.

-Grès d'Ouargla : (e = 110m)

Caractérisés par des argiles silteuse noires à intercalations de grès très fin et de silt stone et de grès fin à très fin blanc à gris à ciment argileux au sommet et argilo-carbonaté à la base. On y note la présence de glauconie et de débris phosphatés à la partie inférieure.

-Quartzites de Hamra: (e = 100m)

Ensemble de quartzite blanc à gris clair, fin à moyen très fissuré. On y note la présence de tigillites, de joints stylolitiques et de rares joints et passées d'argile noire.

-Grès d'El Achène : (e = 45m)

Formés par une alternance de grés fins à moyen gris à gris-vert glauconieux à ciment argileux et carbonaté parfois quartzitique, et de grès fin à très fin ou de silt stones glauconieux à ciment argileux et carbonaté.

-Argile d'ELGASSI (e = 240 m)

Indurées silteuse avec quelques passées de silt stone et de grès très fin et des traces de pyrite.

❖ **Cambrien:**

Essentiellement constitué de grès hétérogènes, fins à très grossiers, entrecoupés de passées de silt stones argilo-micacés. On y distingue trois litho-zones **R1 (Ri+Ra)**, **R2** et **R3**.

- **Litho-zone R1:**

Ri : Correspond au réservoir isométrique. Il a été recoupé essentiellement à la périphérie du champ, là où la série est complète ; ce sont des grès quartzites isométriques moyens à fins à ciment argileux, avec de nombreuses passées silteuse. Il repose sur le Ra supérieur par une surface d'abrasion (e = 50m)

Ra : Représente le réservoir principal. Dans sa partie supérieure et moyenne (e= 20 à 60m), il est formé de grès quartzites, an isométriques, moyens à grossiers, à ciment silico-argileux (5 % de kaolinite + illite) localement constitué de quartzites franches. Dans la partie inférieure s'intercalent, de manière irrégulière, des passées centimétriques de silt stones argileux (e = 100:120m).

- **Litho-zone R2:**

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

- **Litho-zone R3:**

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

- ❖ **L'infracambrien:**

Unité lithologique la plus ancienne reconnue au Nord de la structure par le forage OMG 47 à une profondeur de 4092 m. Il est composé de grès argileux de couleur rouge (e = 45m).

d) LE SOCLE :

Il s'agit de grands éléments granitiques fracturés et d'altérités de couleur rose, orange, ferromagnésiens et d'éléments volcaniques.

La stratigraphie de champ de Hassi Messaoud est résumée dans le tableau suivant

Tableau.V.1 : La stratigraphie de champ de Hassi Messaoud.

ERE	SYST	ETAGES		Ep moy	DESCRIPTION
CENO-ZOIQUE	NEOGENE	MIO-PLIOCENE <i>discordance alpine</i>		240	Sable, calcaire, marne sableuse
		EOCENE		120	Sable, calcaire à silex
MESOZOIQUE	CRETACE	SENONIEN	CARBONATE	107	Calcaire, dolomie, anhydrite
			ANHYDRITIQUE	219	Anhydrite, marne, dolomie
			SALIFERE	140	Sel massif et traces d'anhydrite
		TURONIEN	90	Calcaire crayeux avec quelques niveaux argileux	
		CENOMANIEN	145	Anhydrite, marne, dolomie	
		ALBIEN	350	Grès, sable avec intercalations d'argile silteuse	
		APTIEN	25	Dolomie cristalline avec niveau argileux, calcaire	
		BARREMIEN	280	Argile, grès, dolomie	
		NEOCOMIEN	180	Argile, marne, dolomie, grès	
	JURASSIQUE	MALM		225	Argile, marne, calcaire, grès et traces d'anhydrite
		DOGGER	ARGILEUX	105	Argile silteuse, marne dolomitique avec fines passées de grès
			LAGUNAIRE	210	Anhydrite, marne dolomitique, marne grise
		LIAS	L.D 1	65	Dolomie, anhydrite, argile
			L.S 1	90	Alternances sel, anhydrite et argile
			L.D 2	55	Anhydrite et dolomie cristalline
			L.S 2	60	Alternances sel et argile
			L.D 3	30	Alternances de dolomie et de marne
	TRIASSIQUE	SALIFERE	TS 1	46	Alternances de sel, d'anhydrite et de dolomie
			TS 2	189	Sel massif à intercalations d'anhydrite et argile gypsifère
			TS 3	202	Sel massif et traces d'argile
		ARGILEUX	113	Argile rouge dolomitique ou silteuse injectée de sel et d'anhydrite	
		GRESEUX	35	Grès, argile	
ERUPTIF <i>discordance hercynienne</i>		0-92	Andésites altérées		
PALEOZOIQUE	ORDOVICIEN	QUARTZITES D'EL HAMRA	75	Quartzites fines avec traces de tigillites	
		GRES D'EL ATCHANE	25	Grès fins à ciment argileux, bitumineux	
		ARGILES D'EL GASSI	50	Argiles schisteuses, vertes ou noires, glauconieuses à graptolithes	
		ZONE DES ALTERNANCES	20	Alternance de grès et argile. Présence de tigillites	
	CAMBRIEN	R1	50	Grès isométriques, fins, silteux	
		Ra	120	Grès à grès quartzitiques anisométriques à niveaux de silts	
		R2	100	Grès moyens à grossiers à ciment argileux illitique	
		R3	300	Grès grossier à ciment argileux, argile silteuse	
	INFRA-CAMBRIEN	45	Grès argileux rouges		
	S O C L E				

V.6. Présentation des données des puits :

V.6.1. Présentation des données de Puits A :

La phase 16'' est la plus longue phase dans le forage, qui représente 40% de temps totale de forage ceci engendré des frais additionnels et un prix de mètre foré élevé, Pour cela on est obligé d'optimisés les paramètres de forage afin de réduit son cout.

➤ **Présentation de l'outil utilisé pour le forage de la section 16'' :**

Tableau. V. 2 : Les données de l'outil utilisé 16''

Bit N°	Type	Size (in)	Bit Performance				
			In (m)	Out (m)	MTR(m)	Tf (hr)	ROP(m/hr)
4	SI913MPBX	16	461	617	156	5,5	28,36
			617	750	133	3,95	33,67
			750	827	77	5,05	15,25
			827	989	162	5,87	27,6
			989	1178	189	3,85	49,09
			1178	1205	27	1,41	19,15
			1205	1470	265	4,37	60,64
			1470	1721	251	5,27	47,63
			1721	1890	169	6,27	26,95
			1890	1997	107	4,68	22,86
			1997	2395	398	33,23	11,98
			2395	2431	36	8,8	4,09

Tableau. V. 3: Présentation de l'usure des cutters outil 16''

Bit N°	Type	Size (in)	Serial N°	IADC Dull Grading							
				I	O	D	L	B	G	O	R
4	SI913MPBX	16	JN2183	1	2	CT	S	X	IN	BT	TD

V.6.1. Présentation des données de Puits (B) :

Le forage des puits dans la phase 6'' rencontre le problème de la diminution de la vitesse d'avancement à cause de la dureté élevée de la formation, ce qui engendre des frais additionnels et un prix de mètre foré élevé, ce qui nous donne une grande marge d'optimisation de ce dernier.

➤ **Présentation des outils utilisés pour le forage de la section 6'' :**

Tableau.V. 4 : Les données des outils 6'' utilisés.

Bit N°1	Type	Bit performance				
		In (m)	Out (m)	MTR (m)	Tf (hr)	ROP(m/hr)
1	DSX713M-A4	4070	4318	248	37,79	6,563
2	DSX713M-A4	4327	4426	99	62,63	1,581
3	M09PX	4429	4501	72	60,19	1,196
4	M16PX	4501	4531	30	27,23	1,102
5	FM2941	4531	4568	37	29,37	1,260
6	FM2941	4577	4602	25	17,81	1,404
7	M09PX	4602	4740	138	60,54	2,279

Tableau.V.5: Présentation de l'usure des dents et des raisons de la remontée

Outil	Usures des dents	Raison de remonté
DSX713M-A4	2	point de carottage
CI3124C	2	atteindre la cote finale de carottage
DSX713M-A4	2	point de carottage
CI3124C	2	remontée de pression
M09PX	1	vitesse d'avancement faible
M16PX	1	vitesse d'avancement faible
FM2941	1	point de carottage
ARC325	1	atteindre la cote finale de carottage
FM2941	1	vitesse d'avancement faible
M09PX	2	atteindre la cote finale

V.7. Application et interprétation des résultats :

Les données de terrain obtenues de deux puits forés au champs de Hassi Mssaoud ont été utilisés dans cette étude. L'emplacement et les noms des puits sont confidentiels.

Donc, ils ne peuvent pas être mentionnés directement.

➤ **Section pour l'analyse :**

Pour vérifier l'exactitude des modèles, deux sections du puits ont été choisie pour être évaluée.

Les objectifs étaient :

- ✓ Évaluez la capacité des modèles de reproduire la performance observée dans le puits.

- ✓ Produisez des modélisations en utilisant différents paramètres de forage. Cette étape a optimisé l'opération de forage en réduisant le coût de la section.

Dans le choix de la section à évaluer, les critères suivants ont été employés :

- ✓ Disponibilité des données. Les paramètres de forage, la lithologie, et les caractéristiques de l'outil ont été considérées des données critiques.
- ✓ L'influence de l'optimisation de coût sur la rentabilité du puits. Nous avons recherché la section la plus influence avec le temps et le coût.

Pour appliquer les modèles d'optimisation on a choisi deux phases 6'' et 16 '' qui sont forées forer dans le champ de Hassi Messaoud, et pour cela on a utilisé des données de formation par chaque 1 mètre.

➤ **Paramètres de forage :**

Les paramètres de forage ont été obtenus à partir de l'unité de Mud Logging. Les données ont relevées à chaque mètre fore

Les paramètres suivants ont été considérés comme critiques :

- La profondeur mesurée du puits (MD), prises à partir de la longueur du train de tiges. Pour les phases étudiées. La profondeur MD et la profondeur verticale (TVD) ont été considérées égales même en raison de faible écart observé dans cette section du puits.
- Poids sur l'outil (WOB), le poids total appliqué sur l'outil de forage.
- Taux de pénétration (ROP), la vitesse de pénétration de l'outil dans le la formation.

Rotation par minutes (RPM), la vitesse de rotation de l'outil

V.7.1. Application sur le puits A :

La méthode adaptée pour l'optimisation de la phase 16 '' est d'Eckel, la résolution de ce problème a été réaliser à l'aide d'un logiciel programmé sous Matlab. Pour plus des détails sur logiciel voire l'annexe.

V.7.1.1. Présentation et interprétation des résultats obtenus par le modèle d'Eckel (puits A) :

Tous les résultats d'optimisation (WOB_{opt}, Nopti, ROP_{opt}, Cf, k, a, Tfop) obtenu par le logiciel sont représentés dans les tableaux (V.6, V.7).

Tableaux. V. 6 : Résultats obtenus par MMC linéaire (puits A)

TVD (m)	Cf	K	A	WOB opt	RPM opt	ROP opt	Tfopt
462,009	1,58E-06	-1,03232	3,87008	7,2863395	121,6512	23,89918	0,41842
472,009	5,63E-05	-1,54327	3,45279	8,33141679	171,8435	111,36378	0,50822
482,029	207,278	-0,45446	-0,0044	7,3268	166,0146	81,967751	0,63022
492,009	0,001175	-0,05394	2,13057	7,59659682	166,7871	57,13629	0,80524
502,019	5,781862	1,110574	-0,1701	15,760356	127,547	54,194629	0,98976
512,019	369,4718	0,274529	-0,4394	16,625357	155,9649	86,937777	1,10478
522,009	106,4881	1,271173	-0,9096	18,8125559	159,5911	44,007399	1,33202
532,009	0,000391	-0,35302	2,39382	12,9181204	163,7903	31,663943	1,64784
542,009	3,78E-05	-1,67529	3,53896	10,0446115	162,0336	52,353606	1,83884
552,009	2,06E-05	-0,0707	2,86694	7,14213385	163,7903	40,051808	2,08852
562,019	79,11913	0,396826	-0,2765	11,0280614	158,0128	50,574425	2,28625
572,009	763,6545	-0,31385	-0,5407	8,82405512	158,8959	24,882419	2,68814
582,009	0,007766	0,171547	1,47882	18,5683147	163,9125	24,14698	3,10227
592,009	0,000177	0,258719	2,23272	16,8210761	162,973	31,901932	3,41573
602,019	107,7609	0,411588	-0,5045	19,074524	159,779	28,046571	3,77228
612,019	0,245796	-0,49669	1,17485	11,4523912	162,8603	29,051895	4,11649
622,009	4,64E-05	0,289215	2,47794	19,403869	167,7923	35,627873	4,39717
632,009	8,14E-05	0,286217	2,40141	17,9836707	168,0836	41,130707	4,6403
642,109	113,6375	2,341813	-1,4799	17,5754373	159,9481	51,189162	4,83565
652,009	8,162086	0,708834	-0,1257	19,1915877	159,7696	35,028222	5,12114
662,009	99,82049	0,745586	-0,6046	17,853036	160,2487	39,769549	5,37259
672,009	7,518091	0,502301	0,10182	14,9954028	167,1629	49,333754	5,57529
682,009	11,13073	-0,21297	0,39673	12,2037734	168,0648	49,892866	5,77572
692,019	856,4136	0,561937	-0,9574	21,0696939	147,1248	39,907106	6,0263
702,009	14,44223	0,517498	-0,0569	17,8532689	145,2647	48,345284	6,23314
712,009	62,74179	0,39791	-0,34	18,0492209	152,6862	35,900766	6,51169
722,009	1151,803	1,975663	-1,6224	15,6819213	156,7258	72,743386	6,64916
732,019	302,3047	-2,17304	0,75087	12,5140307	166,045	57,923664	6,8218
742,009	107,8683	-0,85754	0,20017	9,90179108	166,0074	42,018461	7,05979
752,009	0,000107	0,263703	2,3882	11,9914921	166,712	41,713064	7,29952
762,009	209,2324	0,911384	-0,7248	13,069228	166,8623	53,363378	7,48692
772,009	38,137	0,656947	-0,292	10,0977431	167,1629	39,080156	7,7428
782,019	51,58378	0,860478	-0,4672	13,0446237	82,50111	59,835014	7,90993
792,009	137,8303	-0,07893	-0,1075	12,097976	164,2037	65,416234	8,0628
802,019	12,96884	0,478763	-0,0128	15,2490836	164,7204	44,781752	8,2861
812,019	0,007813	0,242564	1,52843	15,0289809	167,5387	37,815978	8,55054

Tableaux. V. 7 : Les résultats obtenus par MMC non linéaire (puits A)

TVD (m)	Cf	K	A	WOB opt	RPM opt	ROP opt	Tfopt
462,009	3,13E-05	-0,60968	3,103646	7,2863395	121,6512	27,61897	0,36207
472,009	0,000108	-2,0732	3,582496	8,3314168	171,8435	135,761	0,435729
482,029	0,278451	-0,30635	1,223033	7,3268	169,4363	80,52433	0,559915
492,009	0,000198	0,03564	2,449401	15,450099	166,7871	60,44202	0,725363
502,019	0,07473	1,664128	0,430818	15,760356	161,4511	65,71418	0,877537
512,019	144,9157	-0,48829	0,126985	9,8822	162,8509	90,40812	0,988146
522,009	246,0616	0,571532	-0,66176	18,812556	159,5911	45,87387	1,206135
532,009	8,45E-09	-0,7476	4,773721	12,91812	163,7903	46,38702	1,421713
542,009	0,012008	-2,23733	2,696548	10,044611	162,0336	62,53434	1,581625
552,009	3,96E-05	0,129228	2,684584	22,486202	163,7903	52,13514	1,773434
562,019	51,80484	0,281369	-0,13403	11,028061	158,0128	51,64163	1,967077
572,009	16769,62	-0,42379	-1,05668	8,8240551	158,8959	31,46975	2,284842
582,009	0,003097	0,25525	1,618252	18,568315	163,9125	25,03756	2,684242
592,009	0,003256	0,43913	1,606066	16,821076	162,973	40,16638	2,933206
602,019	179,8366	0,331495	-0,5516	19,074524	159,779	29,09904	3,27686
612,019	0,002948	-0,27811	1,940653	11,452391	162,8603	29,33915	3,617702
622,009	0,000574	0,325233	1,964037	19,403869	167,7923	35,23879	3,90148
632,009	0,001512	0,382336	1,787845	17,983671	168,0836	43,48498	4,131444
642,109	257,3288	1,042274	-0,92716	17,575437	159,9481	46,19333	4,347926
652,009	7,656808	0,414774	0,058813	19,191588	162,8321	35,18264	4,632157
662,009	87,46399	0,654245	-0,51875	17,853036	160,2487	41,40226	4,87369
672,009	6,080011	0,461863	0,164643	14,995403	167,1629	49,32417	5,07643
682,009	1,234572	-0,15847	0,799904	12,203773	168,0648	50,06224	5,276181
692,019	517,85	0,639095	-0,87625	21,069694	147,1248	45,78388	5,494599
702,009	31,07921	0,434484	-0,16569	17,853269	145,2647	47,65235	5,704452
712,009	54,22802	0,26521	-0,23979	18,049221	152,6862	34,97773	5,990348
722,009	437,2303	1,118353	-0,99306	15,681921	156,7258	62,76036	6,149685
732,019	2489,503	-2,36947	0,450734	12,514031	166,045	62,60271	6,309422
742,009	1998,071	-0,56095	-0,52851	9,9017911	163,5555	37,33542	6,577264
752,009	0,001573	0,346986	1,82942	11,991492	166,712	43,25552	6,808449
762,009	123,0204	0,678142	-0,51407	13,069228	166,8623	50,64255	7,005911
772,009	420,8355	0,61311	-0,73813	10,097743	167,1629	39,70601	7,257762
782,019	314,3445	1,380875	-1,04438	13,044624	82,50111	108,6828	7,349773
792,009	57,22783	0,048451	0,002928	20,359711	168,1399	67,22564	7,498526
802,019	17,95194	0,382851	-0,02783	15,249084	164,7204	44,1994	7,724773
812,019	0,004628	0,338373	1,586142	15,028981	167,5387	39,02935	7,980991

Nous allons représenter les courbes WOB_{opt} et WOB_{réel}, RPM_{opt} et RPM_{réel}, ainsi que les courbes de ROP_{opt} et ROP réel, le temps optimal et réel pour faire leurs interprétations

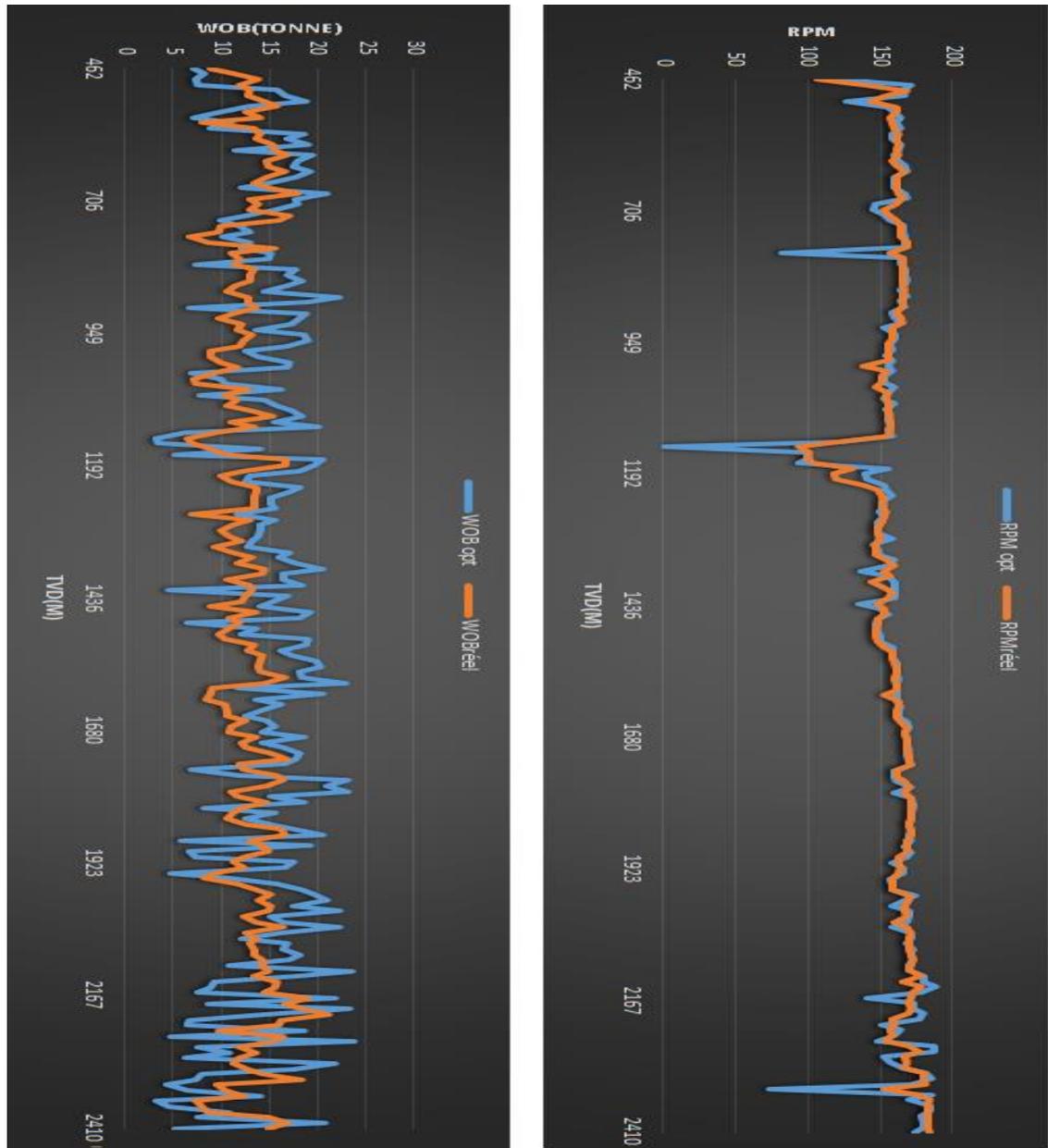


Fig. V. 3 : Comparaison (WOB, RPM) réel et (WOB, RPM) optimal (MMC linéaire)

Fig.V.3 contient une comparaison entre les paramètres de forage mécanique (WOB et RPM) appliqués réellement (courbe en orange) et les paramètres optimaux (courbe en bleu) définis par le modèle d'optimisation par la méthode de MMC non linéaire, on observe que la variation des (WOB et RPM) optimaux le long de la phase, reste dans les marges des paramètres réels.

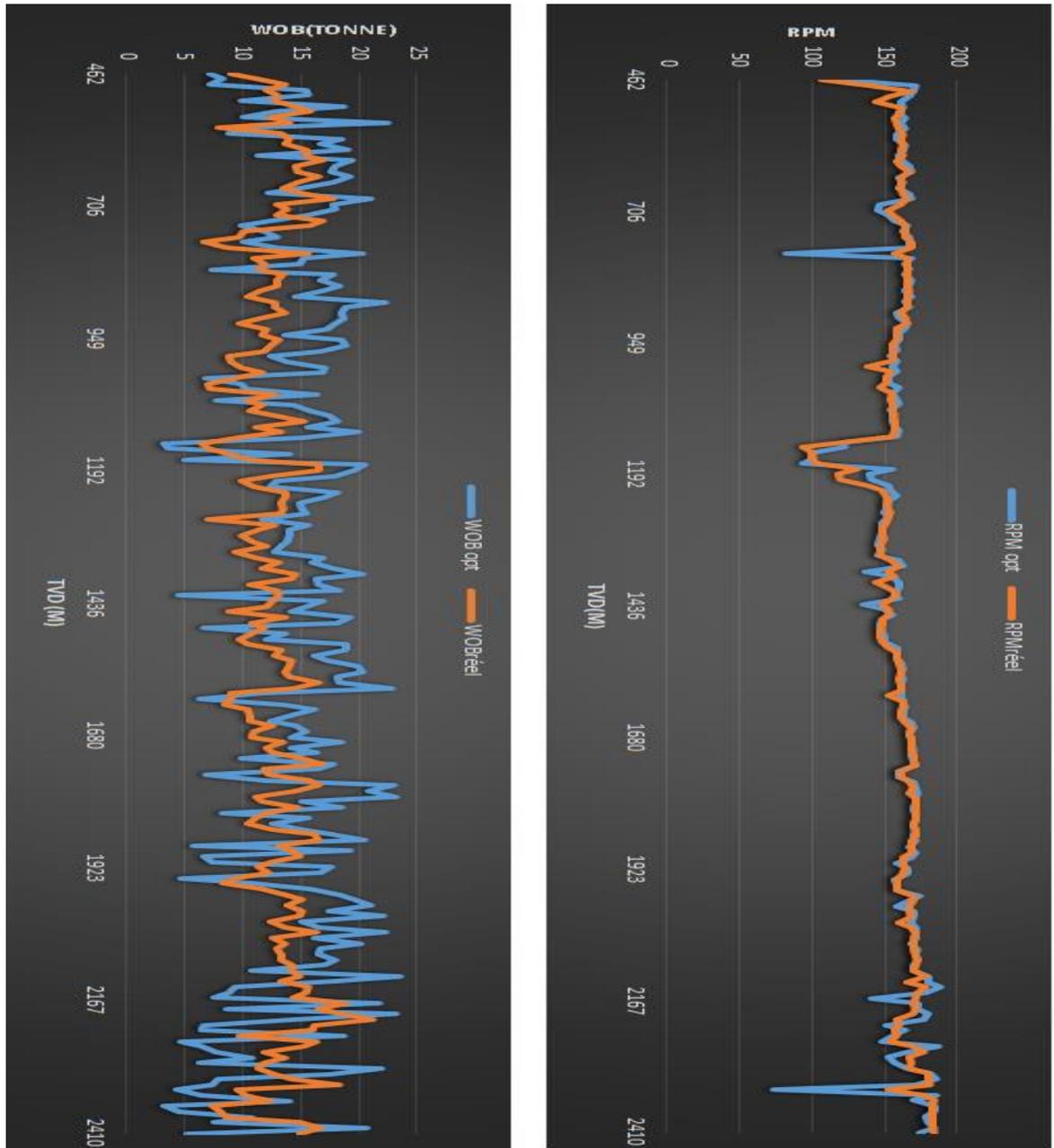


Fig. V. 4 : Comparaison entre (WOB, RPM) réel et (WOB, RPM) optimal (MMC non linéaire)

Fig.V.4 contient une comparaison entre les paramètres de forage mécanique (WOB et RPM) appliqués réellement (courbe en orange) et les paramètres optimaux (courbe en bleu) définis par le modèle d'optimisation par la méthode de MMC linéaire, on observe que la variation des (WOB et RPM) optimaux le long de la phase, reste dans les marges des paramètres réels.

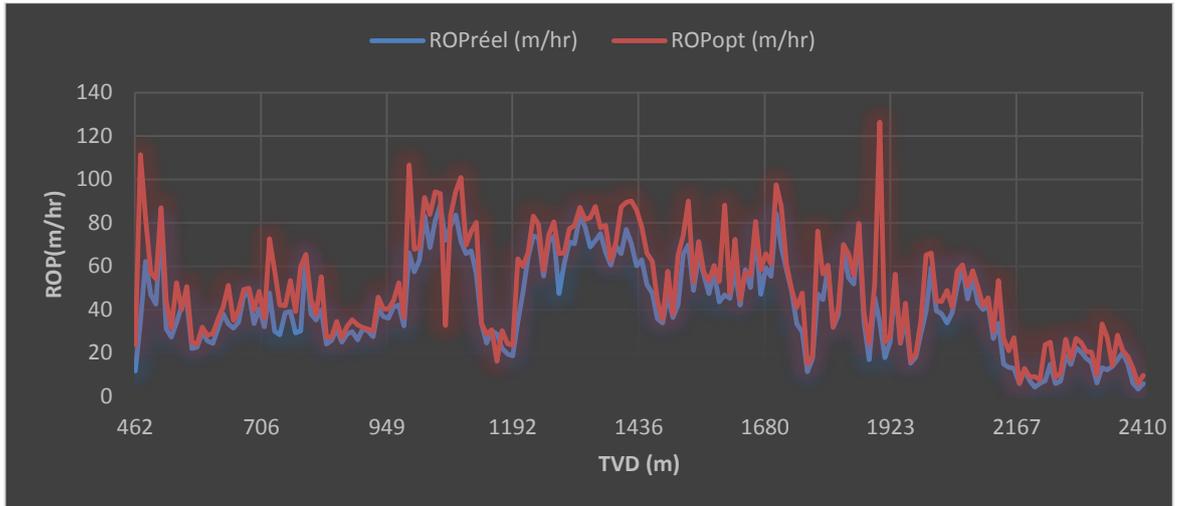


Fig. V. 5 : Comparaison ROP réel et ROP optimal (MMC linéaire).

Fig. V.5 : représente une comparaison entre la ROP réel (courbe en bleu) et ROP optimal (courbe en rouge) définis par le programme d'optimisation (MMC linéaire), On l'observe qu'il y a une amélioration Claire de la vitesse de pénétration quand le poids sur l'outil optimum et la vitesse de rotation optimale sont utilisés. $ROPOpt$ est supérieure de 13.45 % par rapport au ROP réel en autre terme le $ROPOpt$ mettra moins du temps pour atteindre la profondeur prévue que le ROP réel. Ceux-ci indiquent que le modèle d'Eckel donne des bons résultats, lors de la prédiction de $ROPOpt$ à partir des paramètres mécaniques bien déterminés

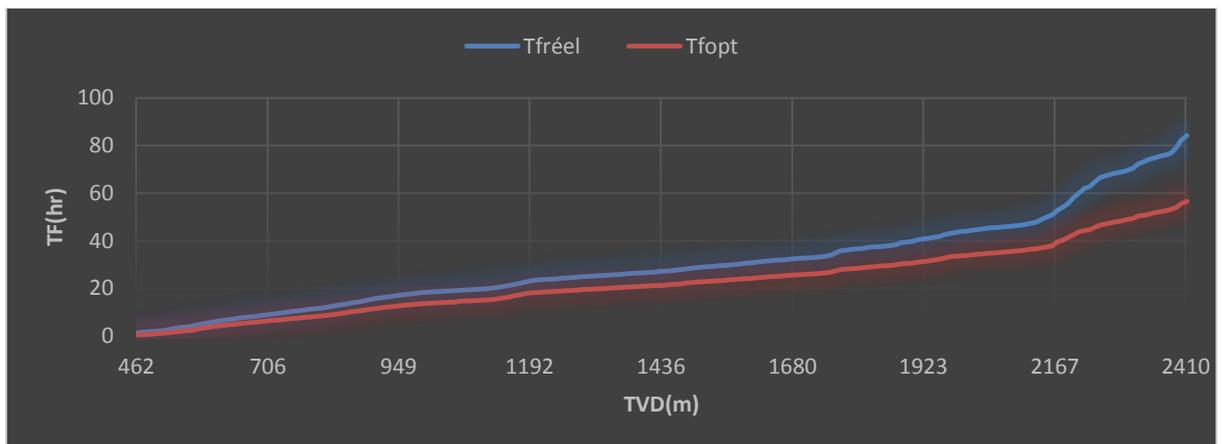


Fig. V. 6 : comparaison entre le temps de forage réel et le temps optimal (MMC linéaire).

Fig. V. 6, montre l'évolution de courbe de temps réel (courbe en bleu) a été plus lente pour atteindre la profondeur finale que le courbe de temps optimal définit par la MMC linéaire (courbe en rouge). Cette différence se traduit par un gain de 27.63 heures soit 2301.9 KDA.

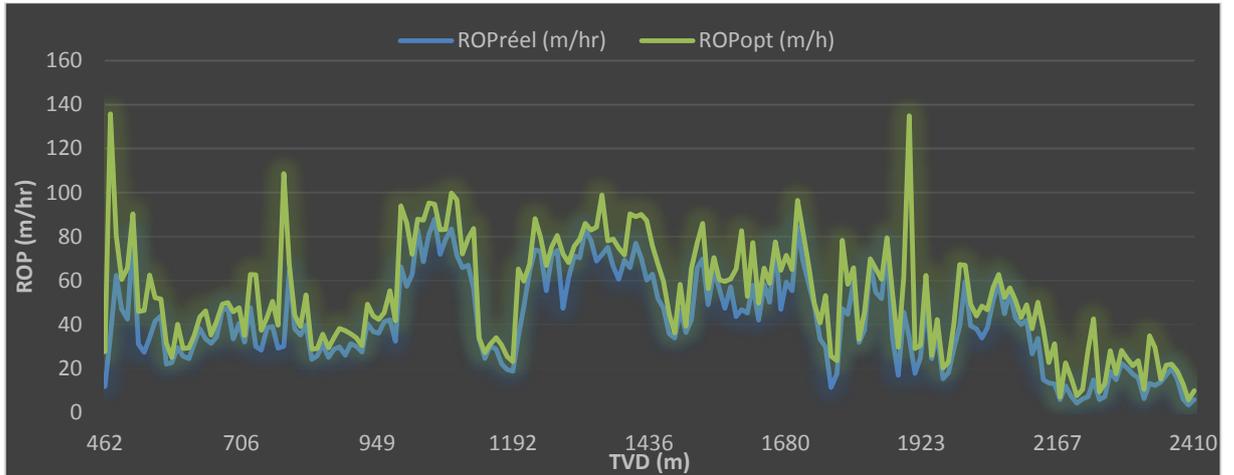


Fig. V. 7 : comparaison ROP réel et ROP optimal (MMC non linéaire)

Fig. V. 7 : contient une comparaison entre la ROP réel (courbe en bleu) et ROP optimal (courbe en vert) définis par le programme d'optimisation (MMC non linéaire), On l'observe que les valeurs de ROPopt sont en dessus de ROPréel sur presque toute la profondeur, en autre terme ROPopt est supérieure de 20.25 % par rapport au ROP réel.

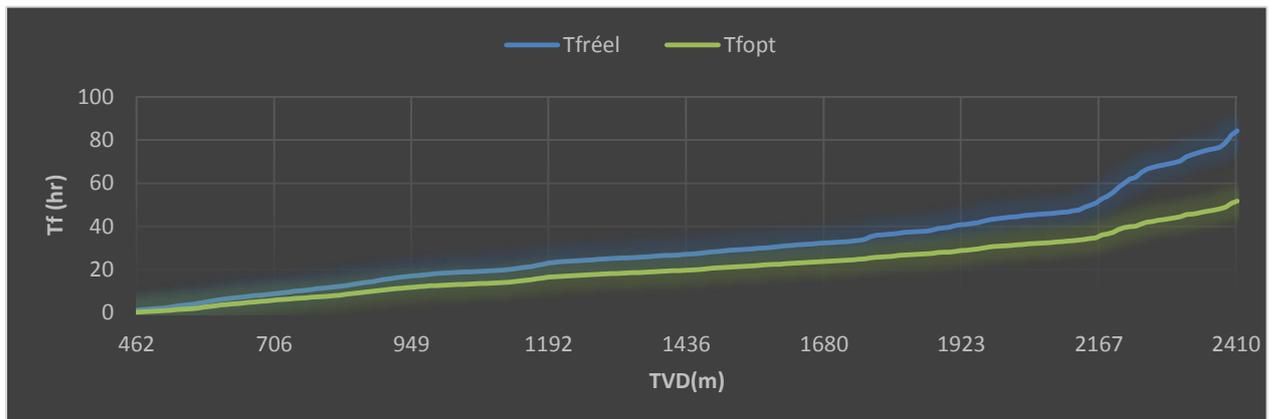


Fig. V. 8 : comparaison temps de forage réel et le temps optimal (MMCnon linéaire)

Fig. V. 8, donne une comparaison entre le temps réel (courbe en bleu) et le temps de forage optimisé par MMC non linéaire (courbe en vert) requis pour forer le même intervalle de profondeur, les résultats montre que le temps réel a été plus lente pour atteindre la profondeur finale que le temps optimal, Cette différence se traduit par un gain de 32.49 heures soit 2707.6 KDA.

Comparaison des résultats obtenu par les deux méthodes :

Tableaux. V. 8 : résumé des résultats obtenus par MMC linéaire et non linéaire (puit B)

La méthode	Intervalle foré (m)	Temps de forage réel (hr)	Temps de forage optimal (hr)	Gain de temps (hr)	Gain de prix (KDA)
MMC linéaire	1960	84,2017	56,5766	27,63	2301,9988
MMC non linéaire			51,7088	32,49	2707,6292

D'après les résultats obtenus, on a vérifié que le modèle d'Eckel est un bon modèle, il représente d'une bonne manière le comportement de la vitesse d'avancement en fonction des paramètres mécaniques de forage, et avec l'utilisation de la méthode des moindres carrés non linéaire qui donne des résultats plus significatifs que MMC linéaire.

V.7.2. Application sur le puits B :

La méthode adaptée pour l'optimisation de la phase 6'' est de la théorie de l'énergie spécifique, la résolution de ce problème a été fait à l'aide des outils d'optimisation dans l'Excel (solver et analyse Tool pack). Pour plus des détails sur les étapes de calcul voir l'annexe.

V.7.2.1. Présentation et interprétation des résultats obtenus par le modèle de l'ES (puits B) :

Tous les résultats d'optimisation (WOB_{opt}, RPM_{opt}, ROP_{opt}, Cf, k, a, Tfop, Wfopt) obtenu sont représentés dans les tableaux (V.8, V.9)

Tableaux. V. 9: les paramètres réels et les paramètres optimaux défini par ES (puits B)

TVD	Les paramètres réel			Les Coefficients de formation			Les Paramètres Optimaux		
	WOB	RPM	ROP	Cf	K	A	WOB	RPM	ROP
4071	5,93	69,71	11,22	0,183	0,431	0,7231	4,56	65,25	7,23
4091	7,89	90,94	16,94	6E-05	0,647	2,4678	3,57	96,02	11,19
4111	8,41	86,05	12,42	9E-28	0,02	14,595	8,41	86,05	15,69
4131	8,82	87,97	13,12	2E-05	-1,13	3,5357	6,79	88,57	15,89
4151	8,27	86,12	8,70	5E-05	-1,31	3,3215	8,27	87,13	9,40
4171	8,32	92,82	7,89	2E-20	-0,23	10,527	8,32	92,82	7,01
4191	7,51	84,38	5,85	122,8	0,263	-0,786	6,50	84,38	6,15
4211	7,12	91,30	6,74	0,004	1,354	1,0195	7,98	93,07	7,52
4231	8,52	87,16	6,07	2E-04	0,418	2,0995	7,88	96,60	7,97
4251	7,79	92,99	7,52	0,006	1,287	0,9644	8,29	84,87	6,94
4271	8,43	83,26	5,57	7457	2,065	-2,6035	8,43	82,17	6,30
4291	7,34	89,22	6,73	2E-08	-0,52	4,5264	5,94	91,47	5,98
4311	6,46	92,92	5,87	5E-06	-1,47	3,7155	6,23	92,92	6,55
4341	6,89	80,69	4,82	2E+19	-5,89	-7,1526	6,89	72,26	9,34
4361	8,56	84,16	0,90	21,07	-2,12	0,315	7,15	73,89	1,27
4381	9,34	79,13	1,44	0,752	-0,45	0,3848	7,42	73,05	1,58
4401	9,74	76,23	1,90	0,037	4,051	-1,2311	9,77	72,42	1,93
4421	9,84	70,95	0,85	7E-04	3,466	-0,1782	10,42	67,74	1,14
4441	8,11	114,96	1,05	0,002	0,742	1,0054	8,11	118,21	1,29
4461	7,01	130,62	1,64	1E-08	3,061	2,5826	10,21	130,62	4,71
4481	7,15	100,12	1,70	0,002	-2,1	2,2704	7,15	106,31	1,46
4501	8,18	101,00	0,88	125,2	-2,16	-0,0463	8,18	101,00	1,08
4521	7,60	108,83	0,68	0,005	-0,2	1,2424	7,78	117,08	1,13
4541	9,65	112,99	1,01	4,3	-1,32	0,2592	5,43	92,71	1,50
4561	6,95	110,27	1,17	0,023	0,449	0,6782	6,63	90,84	1,15
4591	8,11	103,52	8,11	1	1	-3E-06	6,79	100,04	6,79
4611	5,08	132,83	23,17	9E-12	-4,07	7,0494	4,81	137,49	18,38
4631	6,38	134,12	28,72	7E-37	-2,88	18,721	6,38	134,12	22,93
4651	5,04	116,52	7,33	3E-07	-0,67	4,0695	5,04	118,64	27,97
4671	8,42	112,52	0,67	3E+14	-9,26	-2,9525	7,34	107,69	2,77
4691	7,92	120,12	3,92	738,8	-1,84	-0,266	7,19	119,18	5,51
4711	8,26	105,04	1,80	1E+10	-0,39	-4,6048	7,63	98,63	2,98
4731	7,33	116,29	5,76	7E+10	-4,34	-3,0916	6,69	95,82	14,29
4733	6,53	113,64	4,39	1E+21	-9,04	-6,3582	5,82	104,64	20,28
4737	7,15	117,38	1,47	1E+21	-9,04	-6,3582	6,31	113,64	5,73
4738	7,16	118,61	1,43	1E+21	-9,04	-6,3582	6,31	113,64	5,73

Tableaux. V.10: l'usure et le temps de forage optimal (puits B).

TVD	Tf réel	Tf opt	Wfopt
4071	0,24	0,40	0,00
4091	1,99	2,42	0,02
4111	3,71	3,61	0,04
4131	5,47	5,27	0,06
4151	7,51	6,65	0,08
4171	9,79	8,62	0,11
4191	13,71	12,41	0,13
4211	16,95	19,24	0,15
4231	20,12	21,86	0,17
4251	22,93	24,10	0,19
4271	26,16	26,72	0,21
4291	30,76	30,24	0,23
4311	34,51	32,75	0,25
4341	38,26	35,23	0,04
4361	47,89	42,92	0,08
4381	68,35	56,56	0,14
4401	80,73	68,25	0,19
4421	95,86	78,88	0,24
4441	110,97	91,64	0,02
4461	126,73	103,54	0,06
4481	142,89	114,12	0,09
4501	163,96	126,06	0,13
4521	178,66	138,27	0,08
4541	202,10	154,02	0,03
4561	218,22	173,04	0,10
4591	222,78	175,68	0,07
4611	225,81	180,82	0,01
4631	230,94	184,21	0,05
4651	236,66	186,30	0,09
4671	252,41	189,59	0,13
4691	259,88	197,28	0,16
4711	274,34	205,87	0,20
4731	279,61	208,64	0,24
4733	280,11	208,76	0,24
4737	281,97	209,46	0,25
4738	282,67	209,63	0,25

Nous allons représenter les courbes WOB_{opt} et WOB_{réel}, RPM_{opt} et RPM_{réel}, ainsi que les courbes de ROP_{opt} et ROP réel, le temps optimal et réel pour faire leurs interprétations

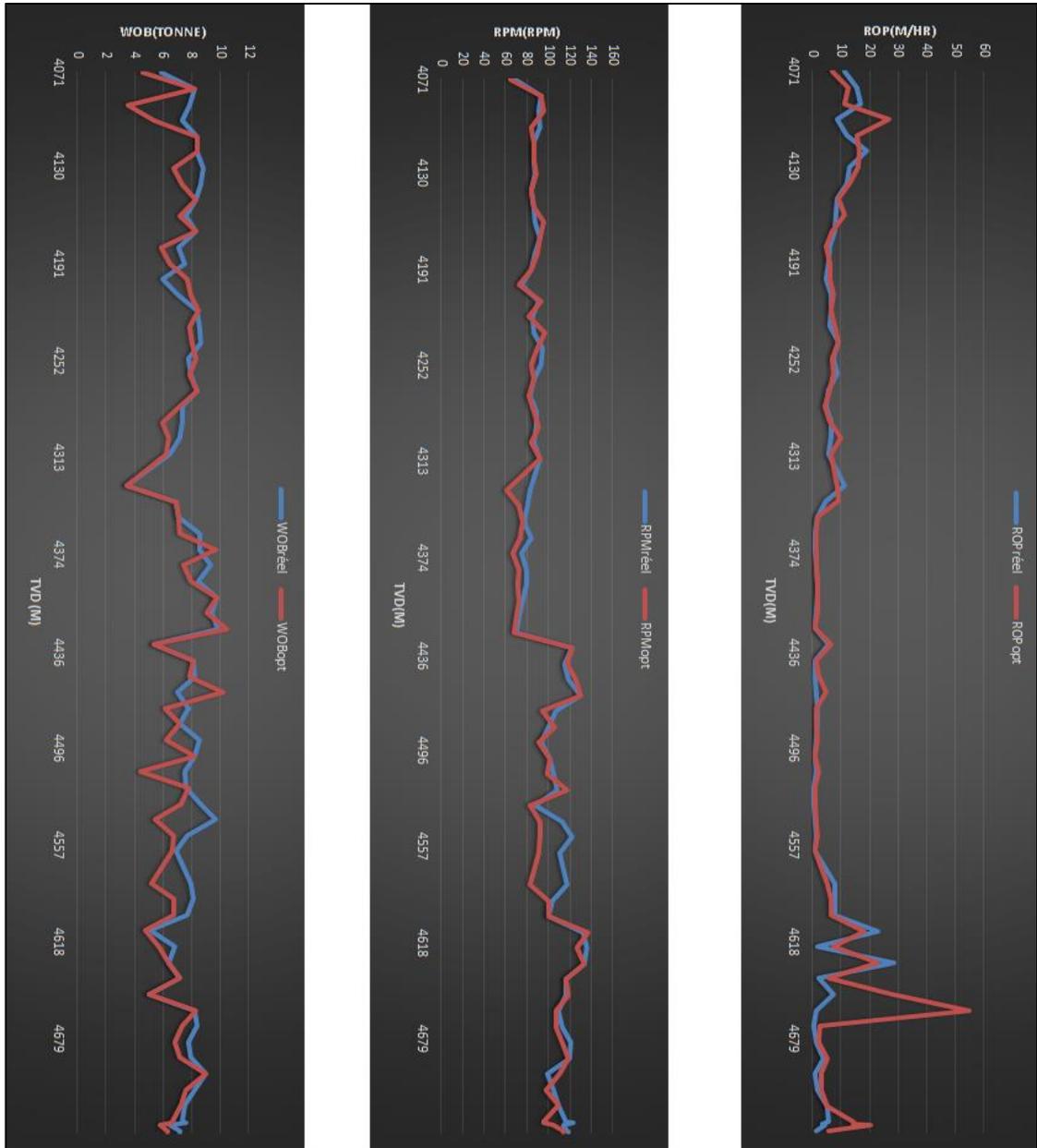


Fig. V.9 : les paramètres réels et les paramètres optimaux définis par le modèle d'ES.

Figure. V.9 : contient une comparaison entre les paramètres de forage appliqués réellement (courbe en bleu) et les paramètres optimaux définis par le modèle d'optimisation (courbe en rouge) :

- Les 1er et 2eme graphes présentent la variation des WOB et RPM le long de la phase, les paramètres proposés par le modèle d'optimisation restent dans les marges des paramètres réels.

- Le 3eme graphe présent la variation du ROP le long de la phase, On l'observe qu'il y a une amélioration Claire de la vitesse de pénétration quand le poids sur l'outil optimum et la vitesse de rotation optimale sont utilisés, ROPopt est supérieure de 27.78 % par rapport au ROP réel. Cependant, une grande différence entre la vitesse d'avancement réalisée et optimisé a été constatée après des changements brusques de la vitesse d'avancement dus au changement de la nature de formation, ces résultats représentent un point faible pour la méthode d'optimisation basée sur le modèle d'ES.

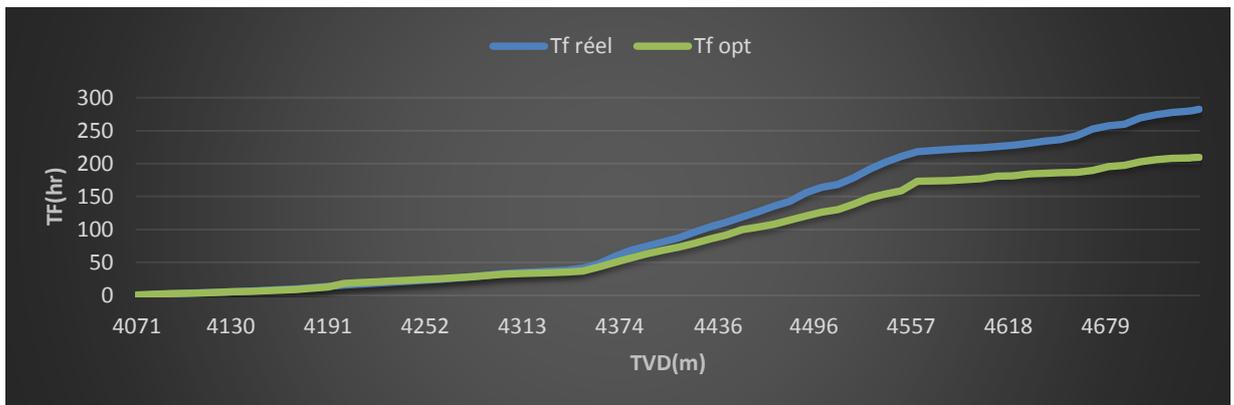


Fig. V. 10 : la comparaison entre le temps de forage réels et le temps optimal défini par le modèle d'ES.

Figure. V. 10 : contient une comparaison entre temps réel (courbe en bleu) et optimisé (courbe en vert), l'évolution de courbe de temps réel a été plus lente pour atteindre la profondeur finale que le courbe de temps optimal, On remarque que les nouveaux paramètres appliqués donnent théoriquement de très bons résultats avec un gain de temps de 73.04 heures dans un intervalle de 668 m qui représente un gain de 8217 KDA.

Tableaux. V. 11 : Résumé des résultats obtenus par le modèle d'ES (puit B).

La méthode	Intervalle foré (m)	Temps de forage réel (hr)	Temps de forage optimal (hr)	Gain de temps (hr)	Gain de prix (KDA)
L'énergie spécifique	668	282,67	209,63	73,04	8217

Tableau. V. 12 : L'usure réel et celle résultante de l'application des paramètres optimisé.

Usure	N 01	N 02	N 03	N 04	N 05	N 06	N 07
Usure mesuré	0,26	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,25
Usure opt	0,19	0,02	0,36	0,22	0,121	0,25	0,31

Ce tableau représente les valeurs de l'usure réelle enregistrées et celle résultante de l'application des paramètres optimisés calculé sur la base du modèle Hareland et Rampersad pour chaque outil

Limitation du modèle :

- Les paramètres hydrauliques sont supposés optimums.
- Pas de différence entre les différents types de boues : boue à base d'eau et à base d'huile.
- Ne prend pas en charge la conception des outils telle que : l'offset, usure des dents.
- Besoin d'être appliqué en temps réel (sur site).
- Difficultés de calculer la résistance à la compression confinée (CCS)

Les résultats de l'optimisation des paramètres mécaniques sont très satisfaisants, On a abouti à un gain total de 26% de temps de forage de la phase 6'' Ces bons résultats méritent d'être testés sur terrain. Ce gain de temps est équivalent à un gain d'argent de l'ordre 8217 KDA qui représente une somme colossale d'argent et fait de cette optimisation un très bon investissement.



CONCLUSION
ET
RECOMMANDATIONS



Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de minimiser le prix du mètre foré par le choix des paramètres mécaniques de forage optimaux (WOB et RPM) qui conduisant à une vitesse d'avancement maximal et par conséquent un temps de forage minimal, ces paramètres sont calculés par l'utilisation du modèle d'Eckel et le modèle de l'énergie spécifique, les données du puits utilisées pour cette étude appartiennent au champs de Hassi Messaoud.

Cette étude a confirmé que le prix de mètre foré peut être minimiser par l'utilisation de modèle d'Eckel, on a assuré aussi que ce modèle représente une bonne manière la processus de la vitesse d'avancement en fonction de poids sur l'outil et la vitesse de rotation, il nous permet de faire l'optimisation des paramètres mécanique, et de générer des gains de temps importants, et avec l'utilisation de la méthode de moindre carré non linéaire qui est la meilleure méthode mathématique pour calculer les coefficients de formation, elle permet de limiter les résultats dans les marges raisonnables.

L'énergie spécifique est un modèle éprouvé dans la quête de prédiction ou d'analyse à la performance de la vitesse d'avancement, et avec l'utilisation de modèle de Hareland et Rampersard qui nous permet contrôler les paramètres appliqués d'une façon à réaliser de bonnes performances sans trop user l'outil de forage, Par l'utilisation de ces modèles dans l'optimisation des paramètres mécanique (WOB et RPM) on a pu de générer des gains de temps importants,

Le travail actuel a indiqué que le forage avec un poids sur outil optimum et une vitesse de rotation optimale résolu à partir du modèle de ROP et des outil informatique tel que le Matlab et L'Excel peut diminuer le temps de forage pendant l'utilisation d'un outil jusqu'à 26 à 38 %.

Recommandation

Les modèles d'optimisation des paramètres mécaniques ont donné des résultats théoriques très encourageants, ils méritent d'être testés sur le terrain.

Nous recommandons en premier lieu à nous et ceux qui sont concerné ou entreprennent des recherches d'optimisation par le modèle d'énergie spécifique et le modèle d'Eckel par ceux-ci :

- ✓ La vérification de la validité des modèles (d'Eckel et l'Energie spécifique) dans des laboratoires spécialisés afin d'aller vers une recherche approfondie d'un modèle plus efficace.
- ✓ Les recherches mathématiques tel que les méthodes numériques, les méthodes d'optimisations doivent être adaptée avec la technologie de forage et fait la mise à jour périodiquement.
- ✓ Introduire le paramètre d'usure des dents d'outil dans le modèle d'Eckel.
- ✓ Utilisé les logiciel pour déterminer les valeurs précises de CCS.
- ✓ Développer ces modèles en introduisant les paramètres hydrauliques.
- ✓ L'application d'un nombre suffisant des puits afin d'obtenir des résultats satisfaites.



REFERENCES



Références

- [1] A. SLIMANI, « Module M2 », SONATRACH-Division forage, formation superviseur, édition juin 2006, 55p.
- [2] AMADOU-Abdoulaye. Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier. Thèse de doctorat en Automatique et Traitement du Signal. Paris : l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2010. 156p.
- [3] ANDREAS Nascimento et David Tamas KutasMathematical, et al. Modeling Applied to Drilling Engineering: An Application of Bourgoyne and Young ROP Model to a Presalt Case Study, 9p
- [4] BENCHEIKH Samir et RABHI MOHAMMED ZAKARIA. 'Etude du choix des outils de forage dans le champ de Hassi-Messaoud'. Mémoire de Master professionnel en forage d'eau. Ouargla : UNIVERSITE KASDI MARBAH, département de génie civil et hydraulique, 2017,45p
- [5] BILLINGTONAN, S.A. AND BLENKARN, K.A, 1962. Constant Rotary Speed and Variable Weight for Reducing Drilling Cost. Presented at the spring meeting of the Mid Continent District, API Division of Production, April 1962
- [6] CENERG GLOBAL TOOLS PVT. LTD.'bit catalogue'', 11p.
- [7] DJELAILA BRAHIM. 'Optimisation des paramètres mécanique du forage horizontal'. Mémoire de Master professionnel en forage. Ouargla : UNIVERSITE KASDI MARBAH, département d'hydrocarbure, 2013, 44p.
- [8] ELLAFI Djelloul,' Technique de forage horizontal et optimisation de la trajectoire par trou pilote sur le champ de Hassi Messaoud', memoire de fin d'etudes en vue de l'obtention du diplome d'ingenieur d'etat en forage petrolier. Université M'hamed Bougara, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2006, 114p.
- [9] ENSPM, formation industrie, IFP, 2006
- [10] F. GRONDIN, « module second l'outil de forage », SONATRACH-Division forage, édition juin 2004.
- [11] FICHER Sonatrach.'Choix Des Outils et paramètres de forage ''.
- [12] FICHER Sonatrach. 'Les paramètres de forage''.59p
- [13] GALLE, E.M. H.B,1960. Variable Weight and Rotary Speed for Lowest Drilling Cost, presented at the annual meeting of AAODC, New Orleans 1960.

- [14] GALLE, E.M. AND WOOD 1963. Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. Presented at the spring meeting of the Pacific Coast District. API Division of Production May 1963.
- [15] GHALEM Khaled, Etude et optimisation de la vitesse d'avancement d'un outil de forage. Mémoire de magistère en forage et production. Ouargla : université kasdi Merbah, 2015, 87p.
- [16] HAMMADI Lokman. "L'impact de quartzite de Hamra sur l'usure des outils". Mémoire de Master professionnel en forage Ouargla : UNIVERSITE KASDI MARBAH, département d'hydrocarbure, 2014, 34p
- [17] HORRA HICHEM. " approche adaptative d'optimisation des paramètres mécanique de forage", mémoire de magistère en forage et production, Université M'hamed Bougara, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2010, 135p.
- [18] J.P. NGUYEN, "technique d'exploitation pétrolière le forage", institut français de pétrole, édition TECHNIP 993, 369p
- [19] LAOUER FIRAS et KHELIF ADNANE. Les Paramètres de performances des outils dans la phase 6". Mémoire de Master professionnel en forage. Ouargla : UNIVERSITE KASDI MARBAH, département d'hydrocarbure, 2014, 36p
- [20] M. DADDOU. "Les caractéristiques physique de la boue de forage ", SONATRACH-Division forage, formation superviseur, édition juin 2009, 47p.
- [21] NACEF Ali. "Modélisation de la vitesse d'avancement de l'outil de forage". Mémoire de magister en forage des puits. Université M'hamed Bougara, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2015, 103p./
- [22] NGOC Ha DAO. "Modélisation de la fatigue des systèmes de forage de puits à trajectoire complexe". Thèse de Doctorat en Technique et Economie de l'Exploitation du Sous-sol. Paris : l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2014, 179p
- [23] SLIMANI Samir. "Optimisation des paramètres de forage dans le réservoir cambro-ordovicien". Mémoire de master professionnel en forage. Ouargla : UNIVERSITE KASDI MERBAH, département d'hydrocarbure, 2012, 63p
- [24] TEALE, R., 1965. The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. Int. J. Rock Mech. Mining Sci.
- [25] TUNA EREN. " Real time optimization of drilling parameters during drilling operation", a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, 2010, 145p.

REFERENCES

- [26] VINCENT OTRI," Drill Bit Performance Optimization Using DROPS Simulator", MASTER'S THESIS in Petroleum Engineering: UNIVERSITY OF STAVANGER, Faculty of Science and Technology,2010,127p.
- [27] William M, Hector U et all," Unique ROP Predictor Using Bit-specific Coefficient of Sliding friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling Performance", Chevron Texaco Energy Technology Company,2005,SPE/IADC drilling conference, 19p.



ANNEXE



1. Description de Logiciel:

Le logiciel s'exécute directement sous MATLAB ; quand on a exécuté ce dernier, le logiciel va afficher une première fenêtre.

Cette fenêtre (comme présente dans la figure 1) :



Figure.A.1

Le bouton RUN permet de passer à la deuxième fenêtre

Deuxième fenêtre :

Cette fenêtre contient Les informations générales suivant :

- Well information.
- Load data
- Identification methode
- descritisation number
- Drilled depth
- Option
- Scoreboard Resultas.

Cette fenêtre (comme présente dans la figure 2) :

The screenshot displays the software interface for well optimization. It is divided into several sections:

- Info Well:** Contains input fields for 'Name of the Well' (puits A), 'Bit size' (16"), 'Bit type' (SI913MPBX), 'field' (HMD), and 'Rig coast' (83.33).
- Identification method:** A dropdown menu set to 'NonLinear'.
- Descritization number:** An input field with the value '10'.
- Drilled Depth (m):** An input field with the value '1960'.
- Option:** A vertical sidebar with buttons for 'Identification', 'Optimization', 'Simulation', 'Analysis', 'Curves', 'Comparing' (highlighted), 'Send results', and 'Clear'.
- Analysis results:** A summary section with the following data:

Treal (hr)	84.2017	ROPreal (m/hr)	44.0626	GC (kda)	2707.6292	R ²	0.99983
Topt (hr)	51.7088	ROPopt (m/hr)	52.991	GCM (kda/m)	1.3885		
- Data Table:** A table with 10 columns: Depth, Cf, k, a, ROPest, WOBop, RPMop, ROPop, and Tf. It contains 20 rows of data, with the 'Comparing' button highlighted in the interface.

Figure.A.2

2. Les étapes d'utilisation de programme :

2.1. Etape 1 :

Dans cette étape on va remplir les informations suivantes comme montre la figure 3 :

- Le nom de puits.
- Diamètres et type de l'outil.
- Le champ.
- Le prix horaire de l'appareil (KDA/hr).

This screenshot shows the 'Info Well' section of the software interface, which is a subset of the main interface shown in Figure A.2. It contains five input fields:

- Name of the Well:** puits A
- Bit size:** 16"
- Bit type:** SI913MPBX
- field:** HMD
- Rig coast:** 83.33

Figure.A.3

2.2. Etape 2 :

Cette étape consiste à : comme montre la figure.4

- Télécharger les paramètres appliqués dans le puits de références (WOB, RPM et ROP) mètre/mètre à partir d'un fichier Excel par un Click sur le bouton « **Load data** ». : avant de téléchargement les données nécessaires pour l'optimisation, il faut respecter l'arrangement suivant :

	A	B	C	D	E
1	TVD (m)	ROP m/h	WOB (tonnes)	RPM (rpm)	Tf (hr)

- Le choix de la méthode de l'identification qu'on va suivre afin de résoudre le problème d'optimisation : l'identification linéaire ou non linéaire.
- Introduire le nombre de discrétisation Le nombre d'intervalle qu'on choisit pour l'identification, ce dernier est limité par la capacité de résolution de MATLAB lui-même.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- A button labeled "Load data".
- An "Identification method" dropdown menu currently set to "NonLinear".
- A "Discritization number" input field containing the value "10".
- A "Drilled Depth (m)" input field containing the value "1960".

Figure.A.4

2.3. Etape 3 :

Ce champ contient trois actions :

- Le tableau d'affichage
- Result analysis.
- Option

2.3.1. Le tableau d'affichage :

Dans ce tableau, on va afficher tous les résultats obtenus par le programme d'optimisation :

cf: le coefficient de formation.

K: le coefficient de l'influence de WOB sur la ROP.

a : le coefficient de l'influence de RPM sur la ROP.

WOBopt : c'est le poids optimum défini par le programme d'optimisation.

RPMopt : c'est la rotation optimum définie par le programme d'optimisation.

ROP et Tf : c'est l'estimation du ROP, et le temps de forage, si on applique les couples WOB-RPM optimaux définis par le programme d'optimisation.

2.3.2. Results Analysis :

Dans cette partie, on va faire une comparaison entre le temps de forage réel et le temps de forage optimal ainsi que la ROP moyen réel et ROP moyen optimisé ; et déceler le gain dans le prix de mettre forer et on affiche le coefficient de corrélation.

2.3.3. L'ensemble des boutons d'option :

Après le téléchargement des données, on va passer vers l'étape d'exécution des sous-programmes d'identification, optimisation et simulation. Les fonctions de chaque bouton selon son ordre dans le logiciel :

- **Identification** : la première étape de calcul est l'identification des coefficients de la formation (Cf K a).
- **Optimisation** : après l'identification, on va vers l'optimisation des choix des paramètres WOB et RPM qu'il faut appliquer sur la formation déjà identifiée, son coefficient afin de maximiser le ROP.
- **Simulation** : dans cette étape, on va appliquer théoriquement les paramètres optimums définis par le programme d'optimisation sur la formation définie par son coefficient ; afin d'estimer le ROP et le temps de forage.
- **Analysis** : Dans cette étape, on va afficher la comparaison entre le temps de forage final réel et optimal, le ROP moyen et optimiser et aussi le gain dans le prix de mettre forer comme représente la figure.5.

Analysis results						
Treal (hr)	84.2017	ROPreal (m/hr)	44.0626	GC (kda)	2707.6292	
Topt (hr)	51.7088	ROPopt (m/hr)	52.991	GCM (kda/m)	1.3885	
					R ²	0.99983

Figure.A.5

- **Curves** : on va afficher ici les coefficients de la formation sous forme de courbes comme montre les figure (6,7,8).

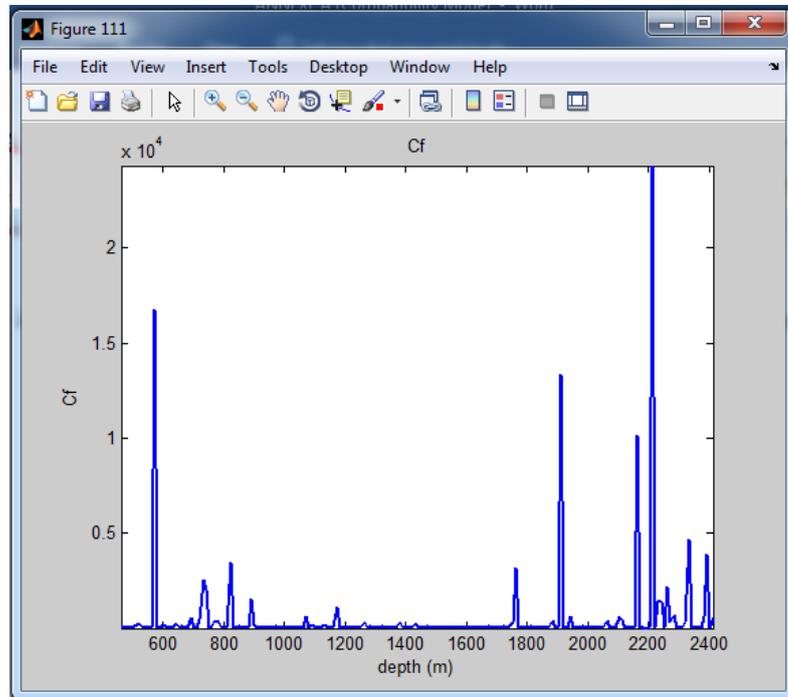


Figure.A.6

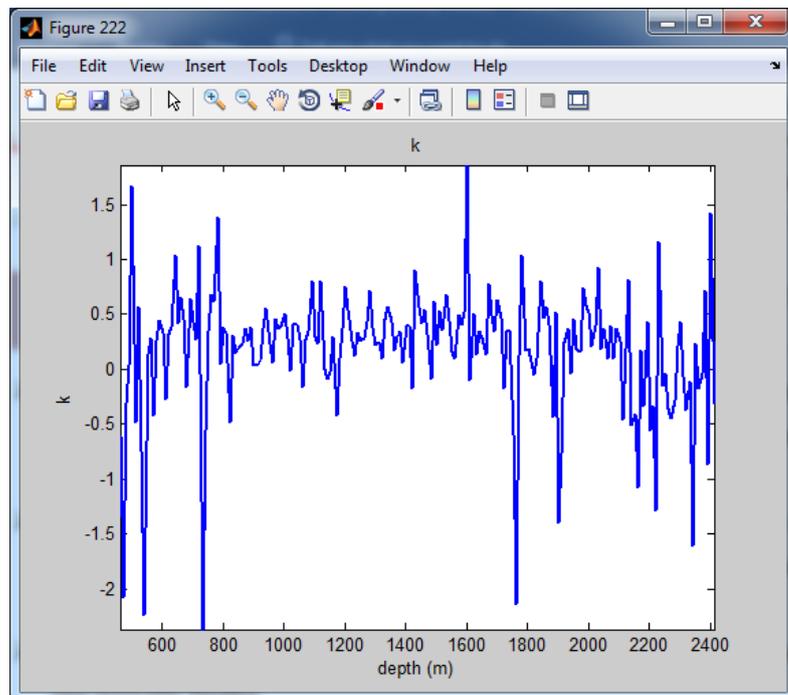


Figure.A.7

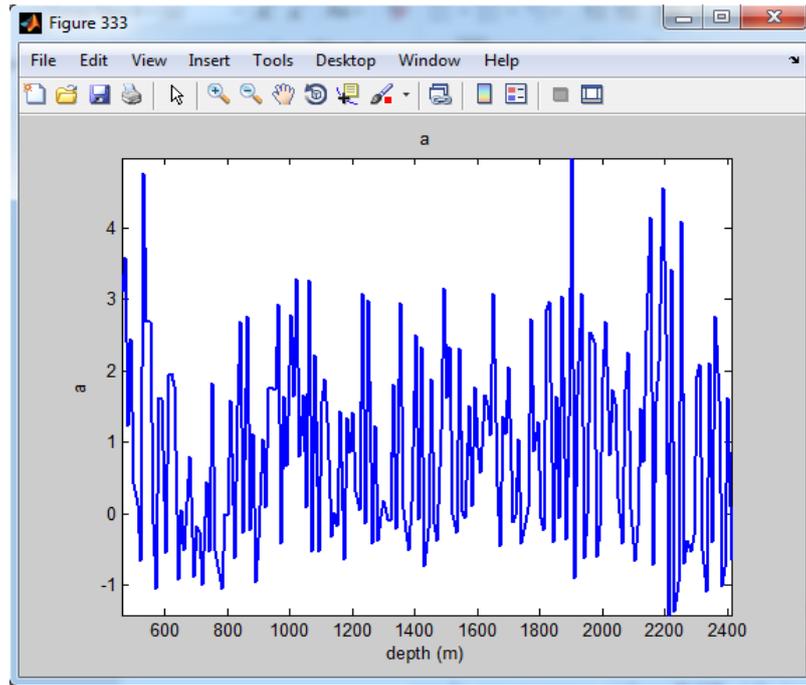


Figure.A.8

➤ **Comparing :**

Après les résultats d'optimisation, on va comparer les paramètres appliqués en réalité ainsi que la ROP et le temps de forage réel avec les paramètres optimum définis par le programme et leur ROP et le temps de forage simulé. comme montrent les figures (A.9,A.10,A.11,A.12)

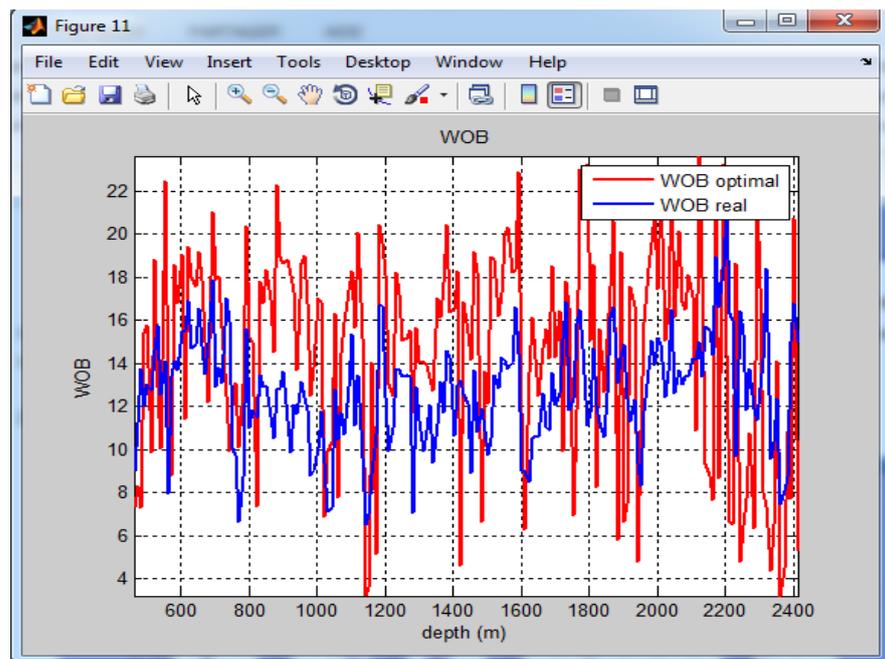


Figure.A.9

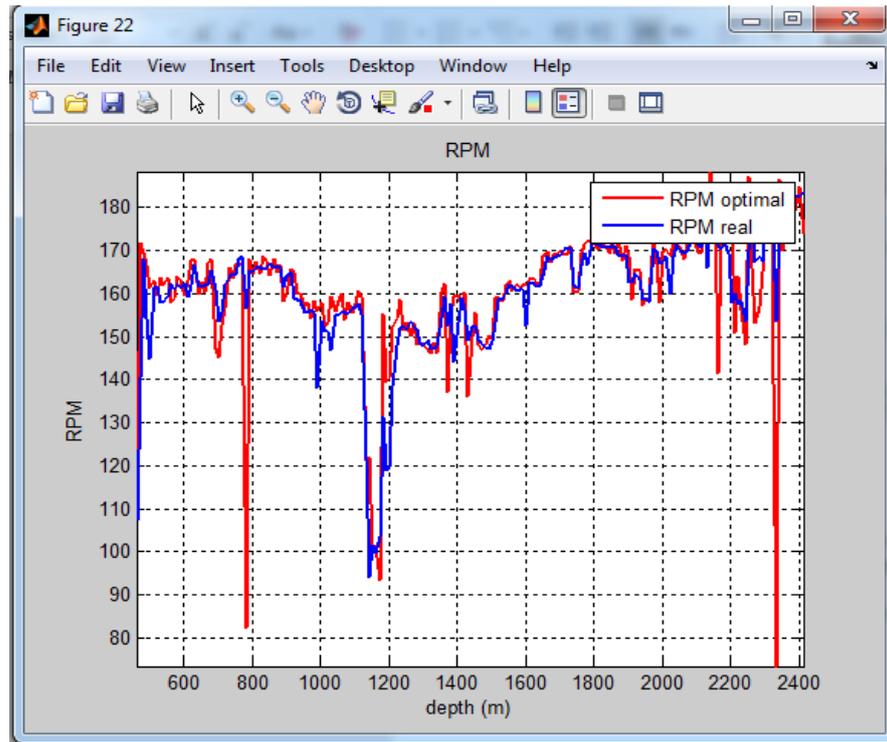


Figure.A.10

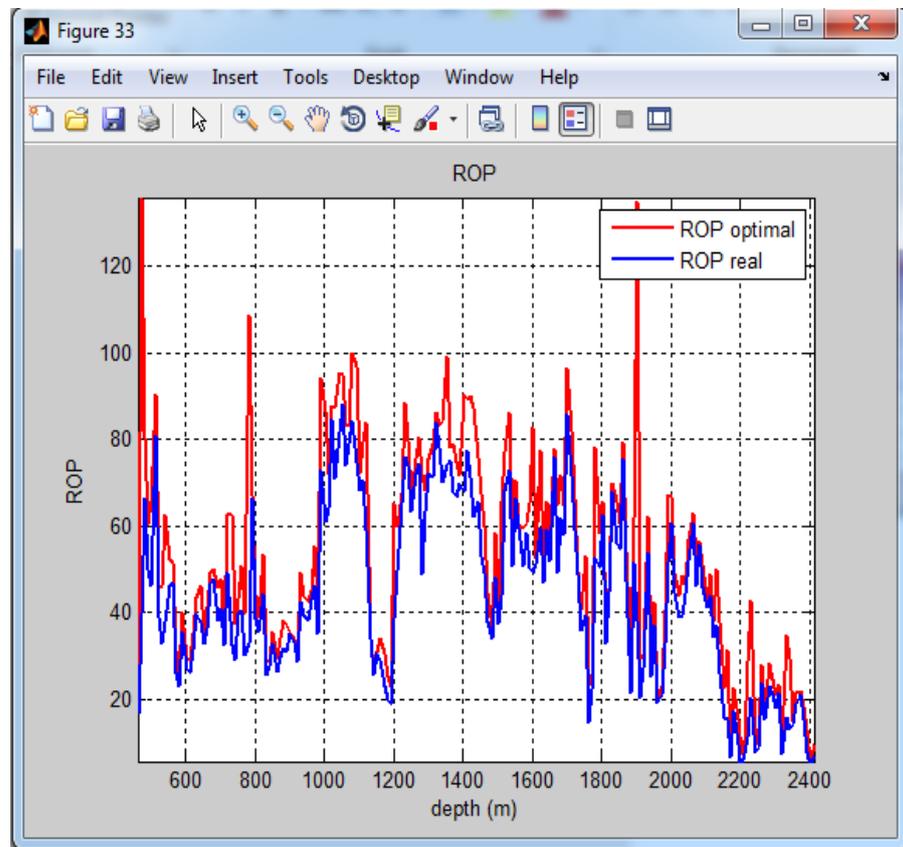


Figure.A.11

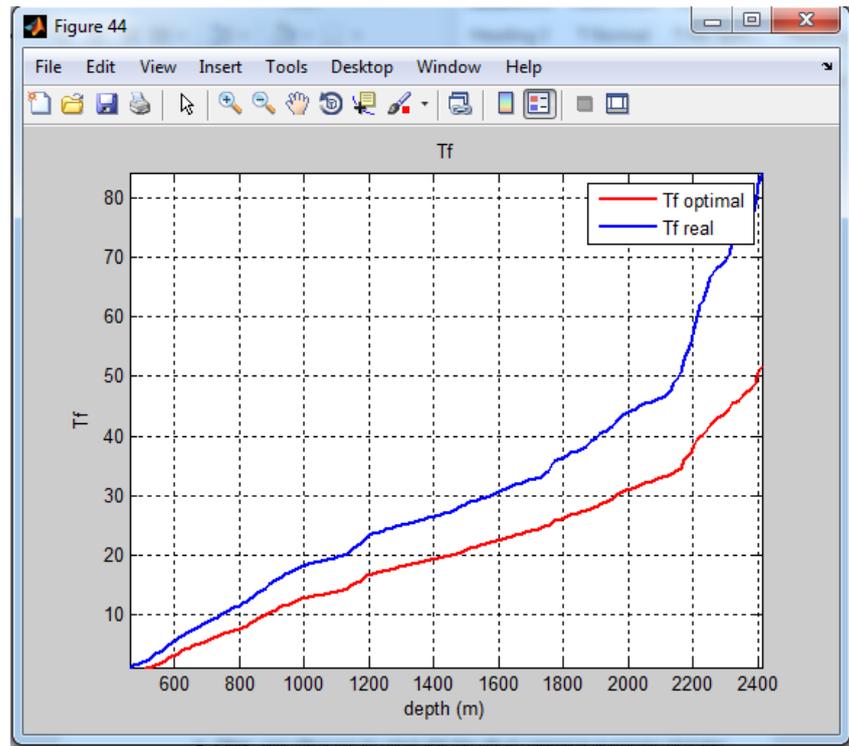


Figure.A.12

- **Send Results** : avec ce bouton, on va envoyer tous les résultats vers un fichier Excel afin de libérer l'espace dans le logiciel pour d'autres applications et aussi sauvegarder le résultat dans une Data Base
- **Clean** : pour effacer tous les calculs déjà faits afin de commencer un nouveau calcul.

1. Les étapes d'optimisation par l'énergie spécifique :

- Identification des coefficients de formations (Cf, k, a).
- Identification des coefficients d'usure (Wci, Aabr).
- Détermination des paramètres optimaux (WOB, RPM).

1.1. Identification des coefficients de formations (Cf, k, a) :

D'après l'équation d'Eckel la vitesse d'avancement est équation comme suit :

$$ROP = C_f \cdot WOB^k \cdot RPM^a$$

La détermination des coefficients se fait par plusieurs étapes :

- 1- Calcul ln de chaque paramètre (ln(ROP), ln(WOB), ln(RPM)).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	TVD (m)	ROP (m/hr)	RPM (rpm)	WOB (tonnes)	ln(ROP)	ln(RPM)	ln(WOB)								
2	4070	6,525318	65,25067	5,829044	1,87569	4,178236	1,762853								
3	4071	11,22395	69,71047	5,92822	2,41805	4,244351	1,779724								
4	4072	7,795018	72,05766	8,081172	2,053485	4,277467	2,0895369								
5	4073	14,06099	75,53585	7,863922	2,643404	4,324607	2,0622854								
6	4074	8,77061	79,27595	5,755668	2,171406	4,372935	1,7501851								
7	4075	8,503345	86,07825	4,560224	2,14046	4,455257	1,5173716								
8	4076	10,66296	84,30524	8,078887	2,366776	4,434444	2,0892541								
9	4077	12,55349	85,81045	7,138778	2,529999	4,452141	1,9655417								
10	4078	8,945131	89,31082	7,466538	2,191109	4,492123	2,0104314								
11	4079	11,49245	92,77547	6,592254	2,44169	4,530182	1,8858954								
12															
13															

Figure.B.1

2- Sélectionner :

Data → data analysis → regression

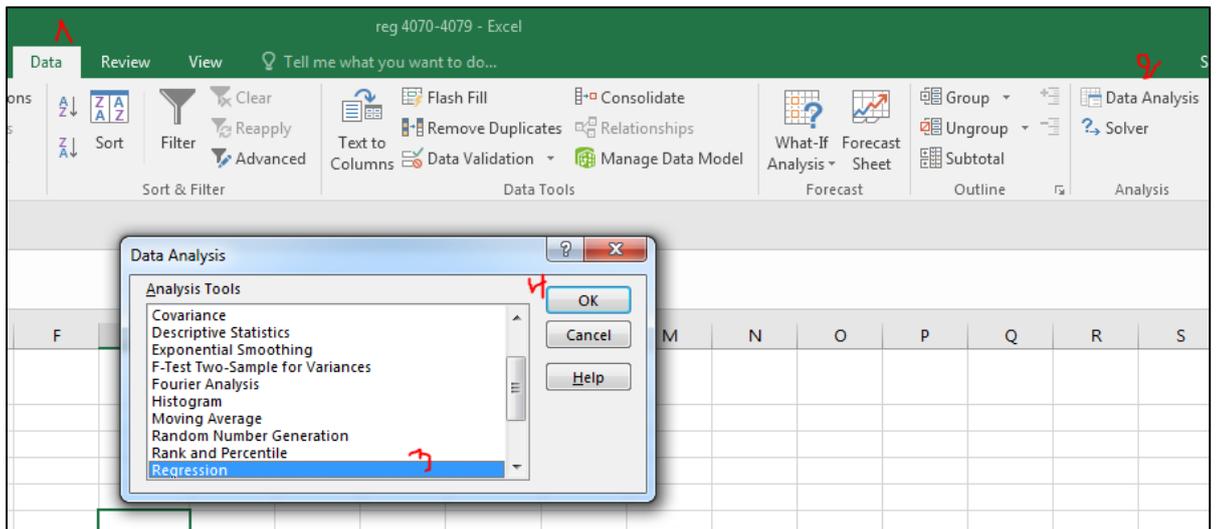


Figure.B.2

3- Entrer input X et input Y :

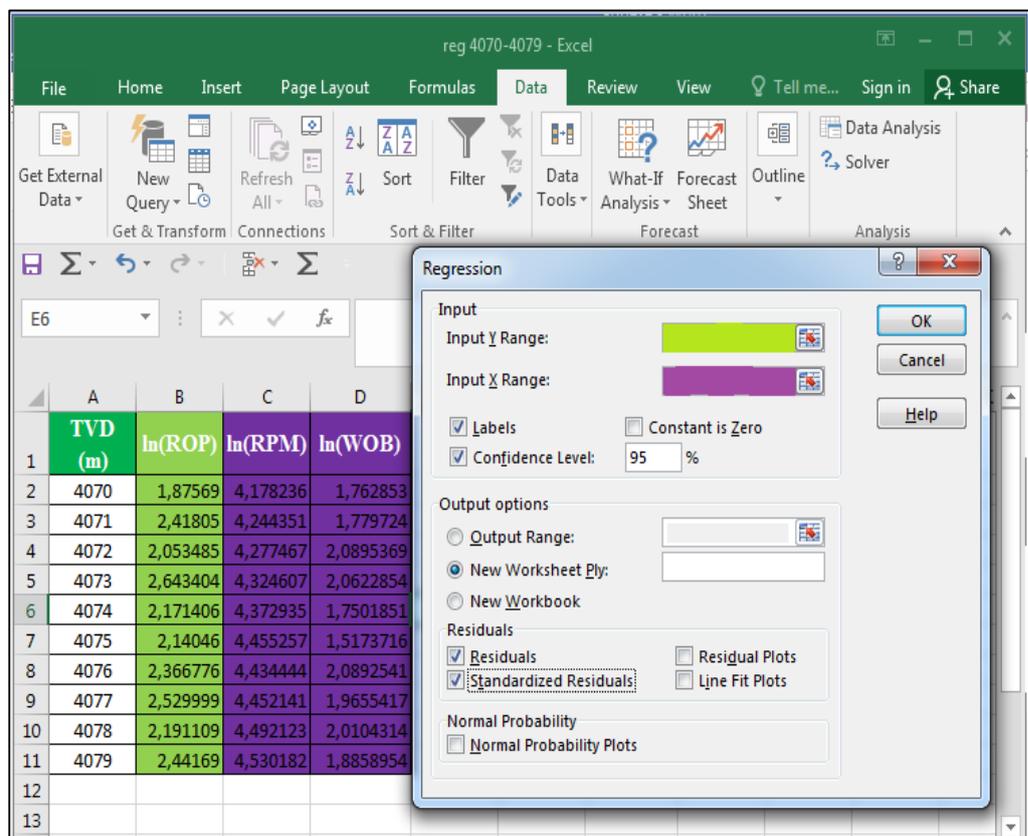


Figure.B.4

4- Affichage des résultats :

	A	B	C	D	E	F
1	SUMMARY OUTPUT					
2						
3	Regression Statistics					
4	Multiple R	0,509889173				
5	R Square	0,259986968				
6	Adjusted R Square	0,048554673				
7	Standard Error	0,230169041			RESIDUAL OUTPUT	
8	Observations	10				
9					Observation	Predicted ln(ROP)
10	ANOVA				1	2,084698932
11		df			2	2,139779565
12	Regression	2			3	2,297290541
13	Residual	7			4	2,319629617
14	Total	9			5	2,220024505
15					6	2,179182593
16		Coefficients			7	2,410679287
17	Intercept	-1,696582657	=	Ln(Cf)	8	2,370141721
18	ln(RPM)	0,723102057	=	a	9	2,41840527
19	ln(WOB)	0,43111384	=	k	10	2,392237056

Figure.B.5

1.2. Identification des coefficients d'usure (Wci, Aabr) et détermination des paramètres optimaux (WOB, RPM) :

La résolution de Ces deux équations se fait de la même façon à l'aide de solver

- Pour déterminer les coefficient d'usure on base sur le problème non linéaire (PNL) suivant :

Le fonctionnel :

$$[8. (1 - W_f) - \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i]^2 \Rightarrow \min \dots \dots \dots (IV. 28)$$

Les contraintes:

$$W_{ci} \geq 0 \quad i = 1:n$$

$$A_{abri} \geq 0 \quad i = 1:n$$

- Et pour déterminet les paramètre optimaux on utilise le PNL ci-dessus:

Le foctionnel :

$$\sum_{i=1}^n [C_f \cdot WOB + 3.33\pi \cdot D \cdot RPM^{1-a} \cdot WOB^{1-K} - A_b \cdot CS]^2 \Rightarrow \min \dots \dots \dots (IV. 26)$$

Les contraintes :

$$W_{iMin} \leq W_i \leq W_{iMax} \quad i = 1:n$$

$$N_{iMin} \leq N_i \leq N_{iMax} \quad i = 1:n$$

$$\left[\frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^n W_{ci} \cdot WOB_i \cdot ROP_i \cdot A_{abri} \cdot CS_i \right]^2 \leq 1 \quad i = 1:n$$

Pour la résolution on suive les étapes suivant :

1. Premier étape :

Enter toutes les données de votre problème sur votre feuille de calcul :

TVD	ROP (m/hr)	Wob(tonnes)	Wf	CS Psi	Wci	Aabr	Ft
4070	6,525318	5,829043791	0	17020,4107	0,00074773	0,00724888	3,50898897
4071	11,22395	5,928219719	0,00104167	17020,4107	0,00029874	0,00298157	1,00872322
4072	7,795018	8,08117189	0,00208333	17020,4107	0,00033581	0,00334509	1,20439449
4073	14,06099	7,863921564	0,003125	17020,4107	0,00113776	0,0001603	0,34325637
4074	8,77061	5,755667799	0,00416667	17020,4107	0,00026128	0,00245347	0,55079265
4075	8,503345	4,56022353	0,00520833	17020,4107	0,00024758	0,00204622	0,33435399
4076	10,66296	8,078886697	0,00625	17020,4107	0,0001082	0,00108151	0,17157528
4077	12,55349	7,138778277	0,00729167	17020,4107	9,1679E-05	0,0009166	0,12817673
4078	8,945131	7,466537699	0,00833333	17020,4107	0,0001831	0,00180745	0,37620571
4079	11,49245	6,592254245	0,009375	17020,4107	0,00015241	0,00151899	0,29853259
Fo 01							Fonction objectif
[8(1-Wf)- sum(wobi*ropi*Wci*Cs*Aabri)^2] min							0,98133789
Wci ≥0 i=1:10							
Aabi ≥0 i=1:10							

Figure.B.6

Notation= il faut donner les valeurs initiales de Wci et Aabr

2. Deuxième étape :

Après avoir rentré toutes les données de votre problème sur votre feuille de calcul, ouvrez le menu data et choisissez la commande Solveur.

3. Troisième étape :

Spécification de la cellule cible Dans la zone Cellule cible à définir, tapez la référence ou le nom de la cellule que vous voulez minimiser, maximiser ou rapprocher d'une valeur donnée. Si vous désirez maximiser la cellule cible, choisissez le bouton Max. Si vous désirez minimiser la cellule cible, choisissez le bouton Min. Si vous désirez que la cellule cible se rapproche d'une valeur donnée, choisissez le bouton Valeur et indiquez la valeur souhaitée dans la zone à droite du bouton.

4. Quatrième étape :

Spécification des cellules variables Tapez dans la zone Cellule variables les références ou les noms des cellules devant être modifiés par le solveur jusqu'à ce que les contraintes du problème soient respectées et que la cellule cible atteigne le résultat recherché. Cellule Cible :

se dit d'une cellule de la feuille de calcul contenant la fonction à maximiser, minimiser, ou à rapprocher d'une valeur donnée.

5. Cinquième étape :

Spécification des contraintes A l'aide des boutons ajouter, Modifier et Supprimer de la boîte de dialogue Paramètres du Solveur. Établissez votre liste de contraintes dans la zone Contraintes. Ex: $\$B\$2 \leq 1200$.

Figure ci-dessous résume les étapes de 2 à 5

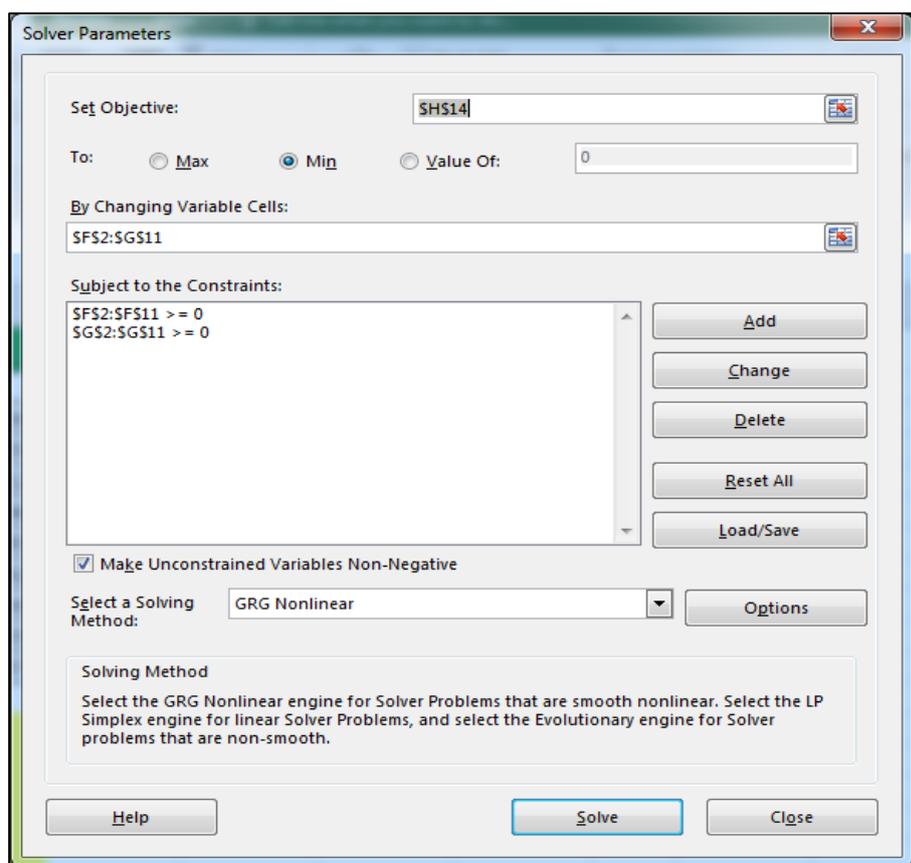


Figure.B.7

6. Sixième étape :

Les options du solveur Cette boîte de dialogue permet de contrôler les caractéristiques avancées de résolution et de précision du résultat. En général, la plupart des paramètres par défaut sont adaptés à la majorité des problèmes d'optimisation

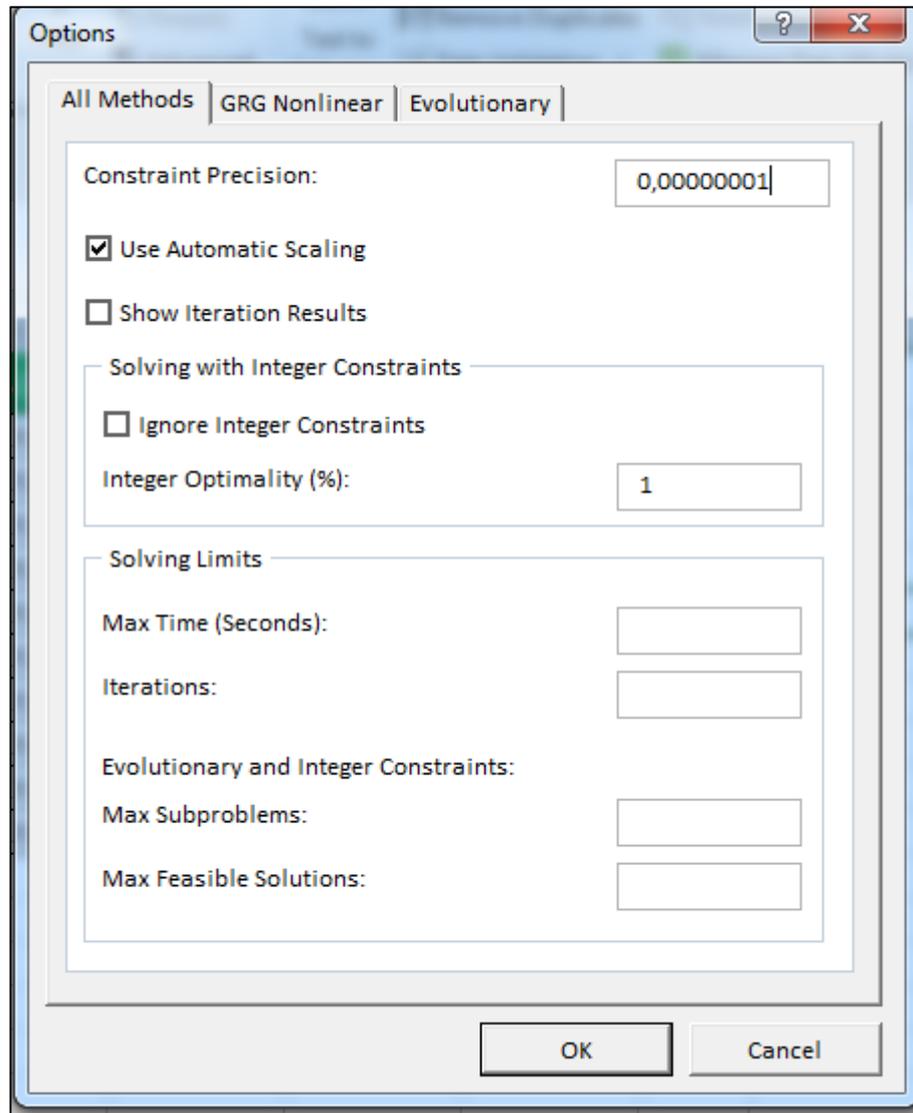


Figure.B.8

7. Septième étape :

Résolution et résultat Une fois tous les paramètres du problème mis en place, le choix du bouton **solve** amorce le processus de résolution du problème. Vous obtenez alors une de ces réponses :

- Le solveur a trouvé une solution satisfaisant toutes les contraintes et les conditions d'optimisation. Toutes les contraintes ont été respectées selon le degré de précision et de tolérance des nombres entiers spécifiés et, le cas échéant, une valeur minimale, maximale ou cible a été trouvée pour la cellule indiquée dans la zone Cellule cible à définir. La solution globale a été trouvée.

- Le solveur a trouvé une solution. Toutes les contraintes sont satisfaites. La valeur de la cellule désignée dans la zone Cellule cible à définir n'a pratiquement pas varié pour les cinq dernières solutions intermédiaires. Cela peut aussi bien signifier qu'une solution a été trouvée, ou que le processus est encore loin d'une solution Mathématiquement, c'est une solution locale, mais pas forcément global.
- **Que faire des résultats du solveur**

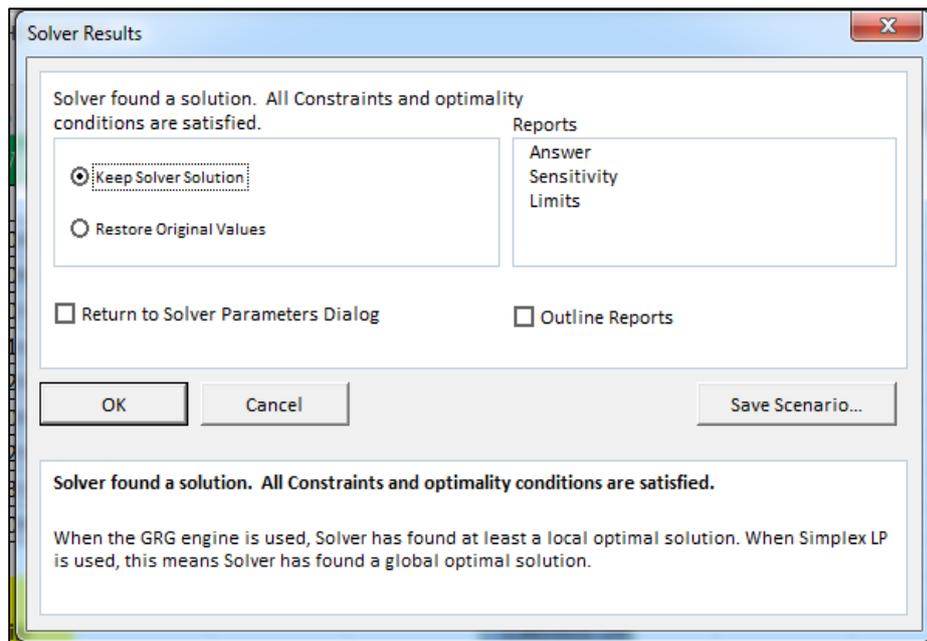


Figure.B.9

- Garder la solution trouvée par le solveur ou rétablir les valeurs d'origine dans votre feuille de calcul.
- Enregistrer la solution sous la forme d'un scénario nommé, à l'aide du Gestionnaire de scénario.
- Créer un des rapports intégrés du solveur.