



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS**

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : CHACHOA Hadjer**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Hydrocarbures**

**OPTION : Génie Gazier**

### **Thème**

**OPTIMISATION DES PARAMÈTRES MÉCANIQUES  
D'UN OUTIL DE FORAGE TRICÔNES : APPLICATION  
SUR LE PUITTS HTF-12 DANS LE CHAMP DE HASSI TARFA.**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
ABDELMOUIZ Ahmed	MAA	Président
MERIGUI Khaled	MAA	Examineur
TAOUTI Mohamed Bachir	MAA	Rapporteur

**Promotion : JUIN 2018**

# *Remerciements*

*Je tiens tout d'abord à remercier en premier lieu le bon dieu le tout puissant, pour m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.*

*Mes premiers remerciements vont naturellement à mon promoteur Monsieur TAOUTI Mohamed Bachir, mes sincères remerciements pour son aide, sa patience et ses encouragements. Je la remercie pour les qualités scientifiques et pédagogiques de son encadrement et pour sa disponibilité. Je souhaite qu'il reçoive à travers ces lignes toutes les marques de ma reconnaissance.*

*Je tiens à remercier vivement tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrite et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme finale de cet ouvrage.*

*Je présente aussi mes remerciements aux enseignants de département génie des procédés-Laghouat.*

*Je remercie Mr. BENSMINE Adnane, ingénieur commercial à la société HALLIBURTON pour son aide pendant toute la période de mon mémoire.*

*Mes remerciements sont adressés aux responsables ENTP de HMD, Pour leurs services, ainsi que toute l'aide qu'ils nous ont apporté sur le plan scientifique et humain.*

*Enfin, mes remerciements sont adressés à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma mère qui m'a toujours poussé vers le  
meilleur de moi et qui ont tout sacrifié pour  
assurer ma réussite, mon confort*

*et satisfaire à mes besoins.*

*Ma sœur.*

*Mes tantes et oncles.*

*La famille Chachoa.*

*La famille Mrikhi.*

*Mes amis et collègues.*

*Hadjer*

# Sommaire

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Liste des abréviations

Introduction générale..... 1

## **Chapitre I : Généralités sur les outils de forage Tricônes**

I.1. Introduction.....	2
I.2. Les outils de forage à mollettes.....	2
I.2.1. Les outils tricônes.....	3
I.2.2. Mode de travail d'un tricône.....	4
I.2.2.1. Percussion et pénétration.....	4
I.2.2.2. Arrachage.....	4
I.2.2.3. Principe général.....	4
I.3. Les paramètres de forage.....	5
I.3.1. Les paramètres mécaniques.....	5
I.3.1.1. Poids sur l'outil (WOB).....	5
I.3.1.2. Vitesse de rotation (RPM).....	6
I.3.1.3. Vitesse d'avancement ou ROP (Rate Of Pénétration)	6
a. Les paramètres affectant la vitesse d'avancement	7
b. L'influence de paramètre mécanique sur le ROP.....	8

## **Chapitre II : Théorie d'optimisation des outils Tricônes**

II.1. Introduction.....	9
II.2. Définition de base.....	9
II.3. Modèle d'optimisation.....	10
II.4. Les différents critères d'optimisation des outils tricônes à dents fraisées.....	10
II.4.1. Critère de Galle et Woods.....	11
II.4.2. Equation de la vitesse d'avancement.....	12
II.4.3. Equation de la vie des roulements.....	13
II.5. L'optimisation des outils tricônes à dents fraisées et roulements.....	14
II.5.1. Méthode d'optimisation.....	14
II.5.1.1. Représentation du modèle d'optimisation.....	14
II.5.1.2. Le modèle.....	14
II.5.1.3. L'identification des coefficients de formation ( $C_f, k, \alpha$ ).....	16
II.5.1.4. L'identification de coefficient de boue S.....	18
II.5.1.5. L'optimisation des paramètres mécaniques (WOB, RPM).....	19
II.6. Généralisation du modèle.....	19

## **Chapitre III : Application et interprétation des résultats**

III.1. Introduction.....	20
III.2. Présentation de la phase étudiée.....	20
III.3. Présentation du programme d'optimisation.....	21
III.3.1. Les données d'entrées et les sorties.....	21
III.3.1.1. Les données d'entrée.....	21
III.3.1.2. Les sorties du programme.....	21
III.3.2. L'organigramme d'optimisation.....	23
III.4. Applications et Interprétation des Résultats.....	24
III.4.1. Applications.....	24

III.4.2. Résultats et Interprétations.....	24
Conclusion.....	28
Recommandations.....	29
ANNEXE	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

**LISTE DES FIGURES**

**Fig. I.1** : Les différents types des outils à molettes..... 2

**Fig. I.2** : Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes..... 3

**Fig. I.3** : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche..... 5

**Fig. I.4** : Poids sur l'outil..... 6

**Fig. I.5** : Capteur de fréquence RPM..... 6

**Fig. I.6** : L'effet du poids appliqué sur le ROP..... 7

**Fig. I.7** : L'effet de la vitesse de rotation sur le ROP..... 8

**Fig. II.1** : Schéma d'un procédé en bloc..... 9

**Fig. II.2** : Schéma simplifié d'un procédé..... 10

**Fig. II.3** : Résultats chantier..... 12

**Fig. II.4** : Allure de la fonction  $1/a^p$ ..... 13

**Fig. II.5** : La variation de  $1/L$  en fonction de  $W$ ..... 13

**Fig. II.6** : L'usure en fonction de la profondeur..... 17

**Fig. III.1** : L'organigramme d'optimisation par la technique Offset..... 23

**Fig. III.2** : La variation des coefficients de la formation et de la boue en fonction de la profondeur..... 25

**Fig. III.3** : La comparaison entre les paramètres de forage réel et les paramètres optimaux..... 26

**Fig. III.4** : La comparaison entre les avancements en fonction du temps réel et optimisé..... 27

**LISTE DES TABLEAUX**

**Tab. II.1:** Formules de base..... 11

**Tab. II.2:** Variations de L en fonction de W..... 15

### *Liste des abréviations*

**P<sub>m</sub>** : prix de mètre foré [ kDA ]

**P<sub>o</sub>** : prix de l'outil [ kDA ]

**P<sub>h</sub>** : prix de location de l'appareil [ kDA ]

**T<sub>m</sub>** : le temps de manœuvre [ h ]

**T<sub>f</sub>** : le temps de forage [ h ]

**t<sub>fi</sub>** : le temps de forage d'une seule couche [ h ]

**M** : le métrage [ m ]

**Z** : la profondeur [ m ]

**e<sub>i</sub>** : l'épaisseur de chaque couche [ m ]

**h<sub>0</sub>** : la hauteur initiale de la dent [ m ]

**h** : la hauteur résiduelle de la dent usée [ m ]

**ROP** : la Vitesse d'avancement [ m/h ]

**ROP<sub>i</sub>** : la vitesse d'avancement d'une seule couche [ m/h ]

**WOB, W** : le poids sur l'outil [ Tons ]

**RPM, N** : la vitesse de rotation [ r/min ]

**C<sub>f</sub>, K et α** : les coefficients dépendant de la formation

**B** : la durée de vie des roulements

**L** : une fonction décroissante du poids

**S** : appelé paramètre de boue représente les effets de la capacité des roulements et de la nature du fluide de forage

**a** : fonction de l'usure de la denture de l'outil

**D** : le diamètre de l'outil [ in ]

## *Introduction générale*



## Introduction générale

Depuis le début de l'ère industrielle, le premier souci des pays développés est d'assurer l'approvisionnement de leurs industries en énergies. Actuellement les hydrocarbures tiennent une place prépondérante dans la consommation énergétique mondiale, cette forte demande des hydrocarbures à l'échelle mondiale pousse les entreprises pétrolières à des concurrences dans la découverte, le développement de nouvelles réserves de pétrole pour satisfaire la demande croissante de l'énergie.

Cependant les recherches, et l'exploitation des gisements engendrent des coûts énormes que les compagnies pétrolières cherchent à diminuer les coûts à travers des différents leviers dont l'une d'entre elle est l'investissement destiné à la réalisation du puits (forage).

On peut définir la technique de forage comme étant l'action de percer ou creuser un trou de forme presque cylindrique à partir de la surface de la terre jusqu'à la cible souhaitée avec un moindre coût tout en respectant l'aspect sécuritaire.

Dans l'industrie du forage, le premier puits foré dans un nouveau champ aura généralement le coût le plus élevé. La rentabilité de forage est évaluée en termes de dépense d'énergie nécessaire pour creuser un puits avec un minimum de temps que possible ; cela à travers les moyens et techniques employés dites paramètres de forage. Les paramètres de forage sont très nombreux. Ils peuvent être regroupés en deux catégories :

- ✓ Les paramètres mécaniques : le type d'outil, le poids sur l'outil (WOB) et la vitesse de rotation (RPM).
- ✓ Les paramètres hydrauliques : l'énergie hydraulique au niveau de l'outil, la nature du fluide de forage.

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

L'objectif de ce mémoire est l'optimisation des paramètres mécanique de forage dans un puits vertical. L'optimisation des paramètres de forage est considérée comme un défi unique pour les compagnies pétrolières. Le but d'optimisation d'un forage est d'atteindre l'objectif avec un coût minimum.

Nous suivent dans ce travail, les étapes suivantes :

Au début on fait une généralité sur les outils et les paramètres de forage qui nous utilisés. Après on a expliqué la théorie d'optimisation des paramètres mécaniques d'un outil tricône. L'objectif de cette méthode est le choix des paramètres mécaniques (WOB, RPM) optimums afin de maximiser le ROP et par conséquent minimiser le temps total de forage. On va utiliser les équations mathématiques proposées par Gall et Woods qui représentent le processus d'avancement et l'estimation de la vitesse d'usure des dents en fonction du temps d'un outil tricône, et afin d'identifier la nature de la formation qu'on va forer, on va utiliser la technique de l'offset well (puits voisin).

A la fin de cette partie nous faisons une étude de cas par un code de calcul en MATLAB pour faire une projection de graphe, puis une analyse et comparaison entre la courbe de vitesse de d'avancement ROP réel et optimale, en fin on termine par des recommandations.

## *Chapitre I*

### *Généralités sur les outils de forage Tricônes*



## 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.

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

Dans les forages d'exploitation les terrains sont inconnus par contre dans les forages de développement les formations sont connues. Pour une formation donnée plusieurs types d'outils capables d'assurer un bon service.

Une étude comparative de la performance des outils et des paramètres d'utilisation des outils (mécaniques : le poids sur l'outil WOB, la vitesse de rotation RPM, la vitesse d'avancement ROP ; et hydrauliques : le débit, la pression, la nature de fluide de forage) effectués au cours des premiers forages permettra d'effectuer les autres forages de développement dans les meilleures conditions de rapidité et d'économie. Le meilleur outil étant celui qui permet d'obtenir le prix du mètre foré ( $P_m$ ) le plus bas dans des bonnes conditions techniques et de sécurité.

On utilise la formule suivante :

$$P_m = \frac{P_o + P_h \cdot (T_m + T_r)}{M} \quad (I.1)$$

Avec :

$P_m$  : le prix du mètre foré ;

$P_o$  : prix de l'outil ;

$T_m$  : temps de manœuvre ;

$T_r$  : temps de rotation ;

$M$  : nombre de mètres forés ;

$P_h$  : le prix de location de l'appareil.

## I.2. Les outils de forage à molettes :

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

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

- Les bicônes (2 cônes)
- Les tricônes (3 cônes)

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

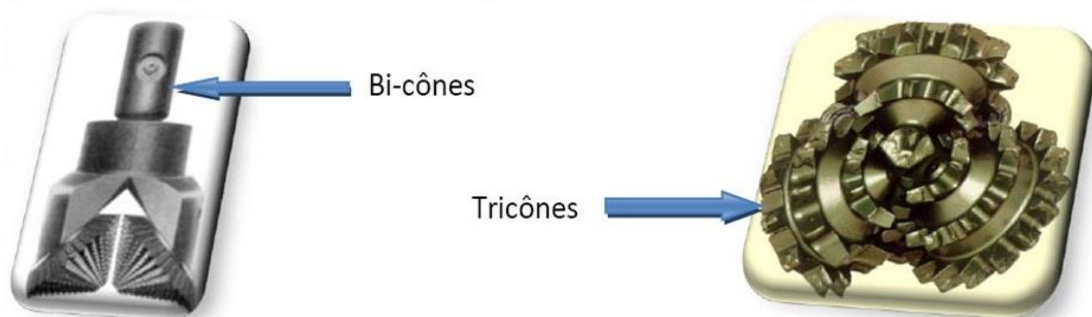


Fig. I.1 : Les différents types des outils à molettes.

## I.2.1. Les outils tricônes :

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, Ces outils travaillent principalement en compression. Les tricônes sont le plus utilisées dans le domaine de forage pétrolier. Les éléments de coupe font partie de la molette, ils ce sont :

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

Les outils à picots ont permis d'améliorer les performances de forage dans les formations dures, là où les outils à dents ne pouvaient forer que quelques mètres avec une vitesse d'avancement faible.

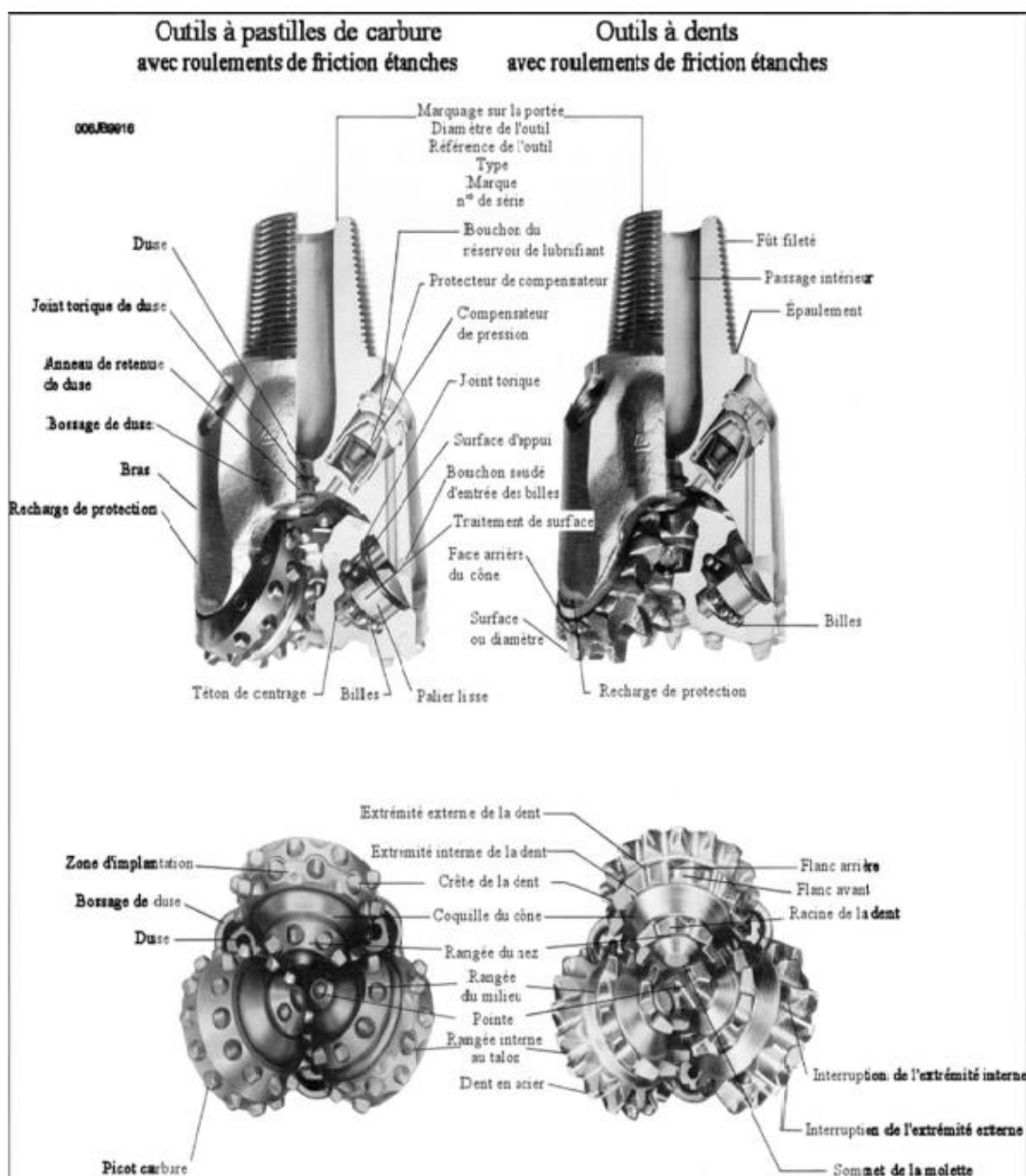


Fig. I.2 : Nomenclature des différents éléments constituant un outil à molettes.

## **I.2.2. Mode de travail d'un tricône :**

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

### **I.2.2.1. Percussion et pénétration :**

De la dent dans la formation pour avoir un meilleur avancement il est donc logique que : plus le terrain est tendre, plus la dent devra être grande. L'outil produit une série de petits cratères résultant de la pression exercée par chaque dent sur le front de taille. La contrainte de compression appliquée sur la formation induit une fracture.

### **I.2.2.2. Arrachage :**

Du «copeau» de terrain par glissement de la molette sur elle-même (ripage). Ce « glissement » devra être plus important en terrain tendre qu'en terrain dur. Ces deux effets sont gouvernés par la géométrie des cônes (décalage angulaire et bombement).

Pour privilégier l'effet de ripage, la rotation du bicorné doit s'éloigner de façon significative d'une rotation vraie (axes des cônes se joignant au centre et cônes « coniques »).

Pour balayer entièrement le « front de taille », il faut un décalage des rangées de dents (indenteurs) sur chaque molette (couverture complète du front de taille).

### **I.2.2.3. Principe général :**

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

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

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

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

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

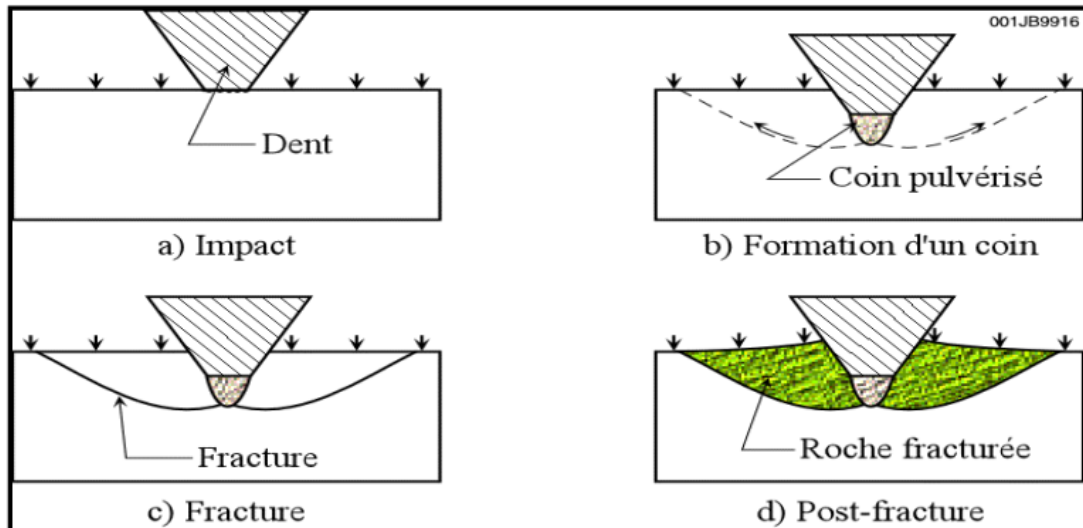


Fig. I.3 : Mécanisme d'action d'un outil à molettes sur la roche.

### I.3. Les paramètres de forage :

On appelle paramètres de forage les différents facteurs qui conditionnent la vitesse d'avancement d'un outil de forage.

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- Les paramètres mécaniques ;
- Les paramètres hydrauliques.

#### I.3.1. 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 bien spécifiques selon la nature géologique.

##### I.3.1.1. Poids sur l'outil (WOB) :

A une vitesse de rotation constante, l'augmentation du poids sur l'outil contribue une augmentation de la vitesse d'avancement, à peu près en proportion directe si le débit de Circulation est suffisant.

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

$$\text{WOB} = \text{WOHL} - \text{WOHF} \quad (\text{I.2})$$

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 constricteur.

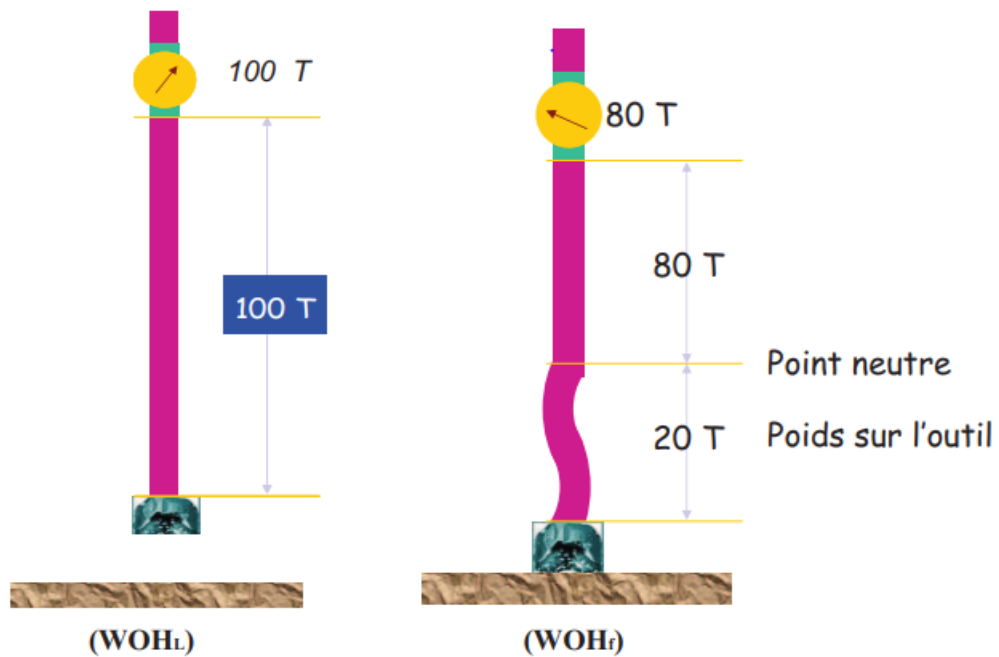


Fig. I.4 : Poids sur l'outil.

**I.3.1.2. Vitesse de rotation (RPM):**

La vitesse de rotation (RPM) c'est un paramètre physique qui indique le nombre de tour de la table dans le rig-floor par minute, identifié à l'aide d'un capteur.



Fig. I.5 : Capteur de fréquence RPM.

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 affect la garniture de forage (phénomène de résonance qui peut être la cause de fatigues et de ruptures).

**I.3.1.3. Vitesse d'avancement ou ROP (Rate Of Pénétration) :**

Le ROP étant définie comme le taux de mètre par unité de temps, ce paramètre est le plus important car tout les autres sont liés d'une manière ou d'une autre a lui dont l'objectif ultime est d'optimiser la vitesse d'avancement.

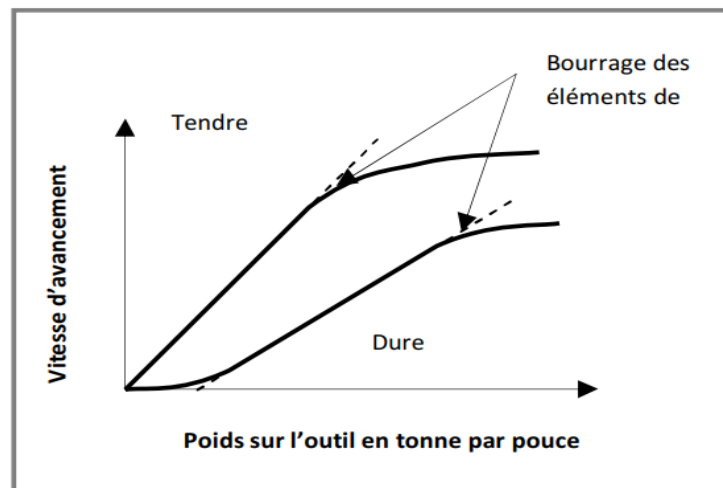
## a. Les paramètres affectant la vitesse d'avancement :

La vitesse d'avancement réalisée par l'outil a un impact très important sur le coût de mètre foré, les paramètres les plus importants qui influent sur le taux de pénétration sont le type d'outil, les caractéristiques de la formation, les propriétés du fluide de forage, les conditions opératoires de l'outil, l'usure et l'hydraulique de l'outil.

## b. L'influence de paramètre mécanique sur le ROP :

### ✚ L'effet de WOB sur le ROP :

La figure (Fig. I.6) 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.



**Fig. I.6 : L'effet du poids appliqué sur le ROP.**

On constate sur la figure (Fig. I.6) que :

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

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

- Le débit n'est pas suffisant pour évacuer tous les déblais du front de taille, les déblais non éliminés sont rebroyés diminuant l'efficacité des éléments de coupe.
- 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 appliqué est faible :

- Dans un terrain tendre, l'outil avance dès que l'on applique du WOB (si la formation est suffisamment tendre et/ou peu, on applique du WOB sur l'outil).
- Dans un terrain dur, il faut appliquer un certain WOB pour que l'outil avance.

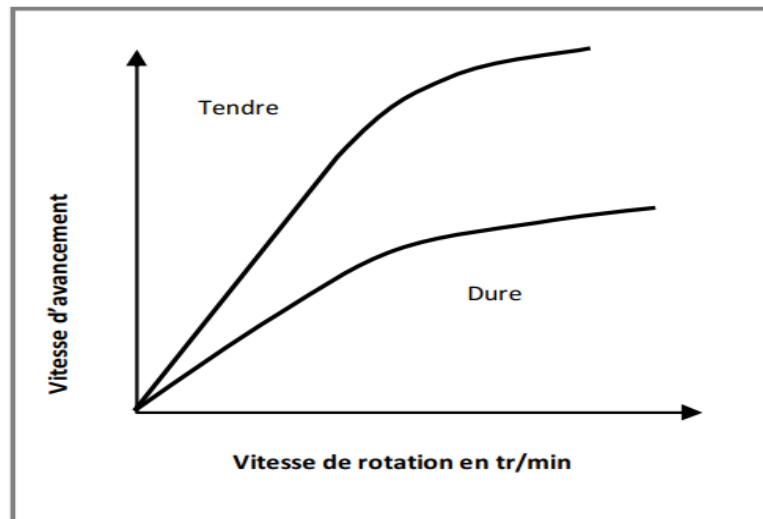
- L'augmentation du WOB a plus d'effet sur les formations tendres que sur les formations dures.

Le poids que l'on applique sur l'outil est fonction de la garniture de forage utilisée et du profil du puits.

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.

### ✚ L'effet de RPM sur le ROP :

La figure (Fig. I.7) montre, que pour un débit et un WOB donnés, la variation du ROP en fonction du RPM.



**Fig. I.7 : L'effet de la vitesse de rotation sur le ROP.**

On constate sur cette figure que :

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

La raison de cette faible augmentation du 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 la RPM produit une diminution du couple à l'outil) afin d'évacuer les déblais et nettoyer efficacement le front de taille.

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

- L'augmentation de la RPM a beaucoup plus d'effet sur les formations tendres que sur 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 applicables (il est recommandé de rester à l'intérieur de ces plages pour ne pas dépasser les capacités des roulements et des structures de coupe).

## *Chapitre II*

### *Théorie d'optimisation des outils Tricônes*



## II.1. Introduction :

La théorie d'optimisation est une approche 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 une nécessité d'améliorer la conception d'un système ou déroulement d'un processus qu'il soit industriel ou autre.

L'optimisation peut être sommairement définie comme :

- Une opération permettant de trouver le meilleur de quelque chose.
- Le choix parmi une série de possibilités du meilleur suivant un critère défini à l'avance.

L'optimisation est un outil quantitatif d'aide à la prise de décision de nombreux problèmes de design (conception), de construction et d'exploitation de procédés industriels souvent pouvant être résolus par les techniques d'optimisation.

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.

## II.2. Définition de base :

N'importe quel procédé industriel ou autre, peut être représenté sous forme de bloc schéma (Fig. II.1) où l'on trouve :

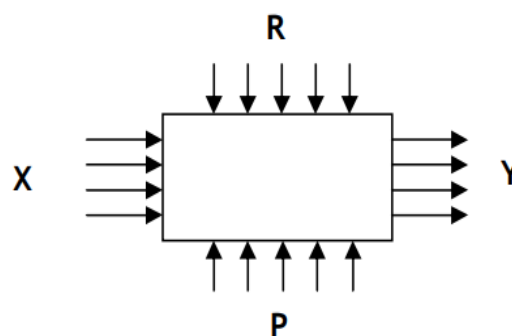


Fig. II.1 : Schéma d'un procédé en bloc.

Où :

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 de commande, 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

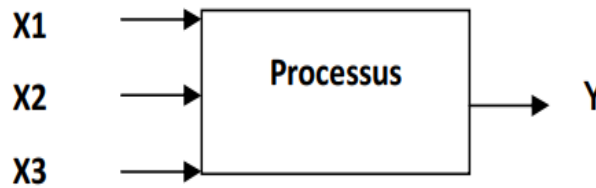


Fig. II.2 : Schéma simplifié d'un procédé.

L'objet de toute modélisation est de définir la relation :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

### II.3. Modèle d'optimisation :

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

- **Fonctionnelle** : Egalement appelée fonction objective ou fonction de but, c'est la représentation mathématique du critère d'optimisation, il s'exprime comme suit :

$$Y = f(X_1, X_2) \rightarrow \text{Optimale} \quad (*)$$

- **Système de contraintes** : les variables de commande et les variables de sortie sont souvent soumises à des limitations d'ordre technologique définissant le domaine des solutions admissibles :

$$X_{\min} \leq X_1 \leq X_{\max} \quad (\text{a})$$

$$X_{\min} \leq X_2 \leq X_{\max} \quad (\text{b})$$

On subdivise le problème d'optimisation en deux catégories :

1. **Problème de programmation linéaire (PL)** : On dit qu'un problème est un PL si le fonctionnel (\*) et toutes les contraintes (a), (b) sont linéaires.
2. **Problème de programmation non linéaire (PNL)** : On dit qu'un problème est PNL si le fonctionnel (\*) ou l'une des contraintes (a) ou (b) sont non linéaires.

### II.4. Les différents critères d'optimisation des outils tricônes à dents fraisées :

L'optimisation de poids sur l'outil et la vitesse de rotation est certainement celle qui a été le plus étudiée.

Nous avons sélectionnés quatre critères d'optimisations du WOB et RPM :

- Woods et Galle (Hughes).
- Woods et Galle (Reed).
- Brown et Young (Humble).
- Graham et Muench (Humble).

Chaque optimisation part des équations techniques suivantes :

1. Equation de vitesse de pénétration.
2. Equation d'usure des dents de l'outil.
3. Equation de la vie des roulements de l'outil.

Et une équation économique tenant compte :

- Des temps de manœuvre, de forage et de toutes les dépenses directes de la sonde y compris fournitures, surveillance géologique chantier...

La différence entre les quatre optimisations citées ci-dessus porte sur les paramètres inclus dans chaque équation. Ne pouvant effectuer une analyse complète de celle-ci, nous n'indiquons dans le tableau (Tab. II.1) que les formules de base.

Tab. II.1: Formules de base.

Méthode	Vitesse d'avancement	Usure des dents	Usure des roulements
Graham et Muench	$V = C Z^k N^{0.584} W$	Néant	$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{S} NW^k$
Woods et Gall	$V = C_f \frac{W^{k_1} N^{k_2}}{(0.93D^2 + 6D + 1)^P}$	$\frac{dD}{dt} = \frac{A(N + kN^3)}{(0.93D^2 + 6D + 1)(k + k \log \frac{W}{D})}$	$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{S} \frac{N}{f(\frac{W}{D})}$
Brown et Young	$V = C \frac{(W - W_0)N^k}{1 + kF}$	$\frac{dB}{dt} = A \frac{N + kN^3}{(1 + kf)(k + kw)}$	$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{S} NW^k$
Reed	$V = C \left(\frac{W}{FD}\right)^2 \frac{FN}{P(k + kN)}$	$\frac{dB}{dt} = A \frac{W^k + N^k}{(FD)^2}$	$\frac{dB}{dt} = \frac{NW^k}{D}$

II.4.1. Critère de Galle et Woods :

Dans toute l'étude qui suit, nous précisons sur les outils tricônes à denture fraisées et à roulement, et nous supposons que les autres paramètres de forage (type de l'outil, énergie hydraulique et nature du fluide) ne peuvent être une limitation dans l'utilisation d'un poids ou d'une vitesse de rotation.

Pour trouver le poids et la vitesse de rotation permettant d'obtenir d'un outil le prix au mètre minimal, il est nécessaire de connaître :

- La relation entre la vitesse d'avancement de l'outil et les facteurs qui la gouvernent.
- La relation entre le taux d'usure des roulements de l'outil et les facteurs qui l'affectent.

Si l'on parvient à définir une équation représentant assez bien chacune de ces trois relations, il sera possible de définir un (ou plusieurs) couples de poids-rotation permettant d'obtenir un prix du mètre minimal.

L'équation du prix du mètre s'écrit:

$$P_m = \frac{P_0 + P_h \cdot (T_m + T_r)}{M} \quad (II.1)$$

Le terme (P<sub>0</sub>+T<sub>m</sub>×P<sub>h</sub>) de cette relation est constant pour un outil donné puisqu'il ne dépend que de son type et de sa profondeur d'utilisation. Nous allons donc rechercher une image

mathématique du métrage (M) et du temps de rotation (T<sub>r</sub>) que peut réaliser un outil sous un couple poids-rotation et dans un milieu (terrain, boue, etc.) donné.

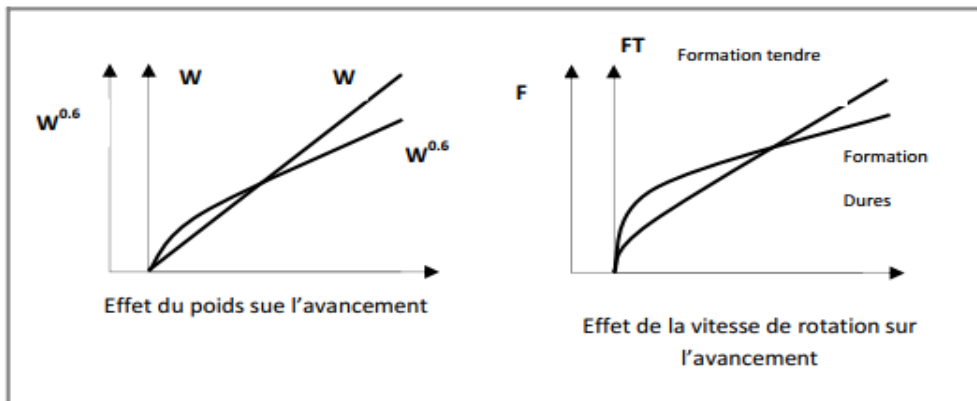
Pour cela, il nous faut déterminer les différents facteurs qui affectent la performance de l'outil et évaluer quantitativement leurs influences.

**II.4.2. Equation de la vitesse d'avancement :**

La vitesse d'avancement d'un outil ROP réalisée par un outil au bout d'un temps de forage T est donnée par l'équation empirique suivante :

$$ROP = \frac{dF}{dT} = C_f \cdot \frac{W^k \cdot N^\alpha}{a^p} \quad (II.2)$$

De nombreux essais ont été effectués sur les chantiers (Fig. II.3) pour voir comment le poids et la vitesse de rotation affectaient l'avancement d'un outil de forage. Ils ont montré que l'avancement d'un outil est proportionnel à (W<sup>k</sup>), W étant le poids appliqué sur l'outil et k une constante liée à la nature de la formation forée. Sa valeur peut varier de 0 dans les terrains très tendres à 1 dans certains terrains durs. De même, l'avancement d'un outil est proportionnel à une puissance (α) de la vitesse de rotation N. α peut varier de 0 dans les terrains durs à 1.5 dans les terrains tendres.



**Fig. II.3 : Résultats d'essais de chantier.**

Ces valeurs de (k) et/ou (α) peuvent facilement être mesurées par des essais réalisés sur le chantier.

La vitesse d'avancement est en outre proportionnelle à une fonction empirique (1/a<sup>p</sup>) de l'usure de la denture de l'outil dans laquelle :

$$a = 0.93D^2 + 6D + 1 \quad (II.3)$$

D : étant la fonction usée de la hauteur initiale de la dent qui peut aussi s'exprimer par :

$\frac{h_0-h}{h_0}$  : Cette forme est la même que celle utilisée pour définir l'état final de l'usure de la denture d'un outil.

- p = 1 pour une usure de la dent donnant un sommet plat ;
- p = 0.5 pour une usure de la dent du type auto-affûtage ou du type écaillage.

L'usure du type écaillage se produit dans les calcaires durs. L'usure de type auto-affûtage se produit surtout dans les formations tendres légèrement abrasives. Enfin l'usure donnant un sommet plat de la denture est fréquente et se produit dans les formations moyennement tendres.

Cette fonction  $1/a^p$  a été définie après de nombreux essais de laboratoire. La figure (Fig. II.4) donne l'allure de la fonction  $1/a^p$  pour les deux valeurs de  $p$ .

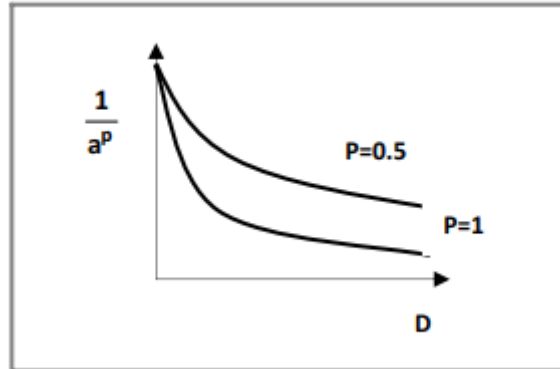


Fig. II.4 : Allure de la fonction  $1/a^p$ .

Enfin,  $C_f$  appelé constante de forabilité est un facteur de proportionnalité représentant principalement la nature de la roche forée et l'effet du fluide de forage sur l'avancement.

**II.4.3. Equation de la vie des roulements :**

La durée de vie des roulements des outils dépend du poids et de la vitesse de rotation auxquels sont utilisés ces outils, et du fluide de forage dans lequel ils travaillent. Bien que l'état d'usure de la denture ait un certain effet sur l'usure des roulements, l'expérience de laboratoire montre qu'il est négligeable. De nombreux essais de chantier et de laboratoire ont conduit à l'équation empirique de la vie des roulements suivante :

$$B = S \cdot \frac{L(W)}{N} \quad (II.4)$$

Si l'on désigne par  $B_x$  la fraction de la vie des roulements (Fig. II.5) utilisée pendant le temps de forage  $T$ , on aura :

$$B_x = \frac{T}{B} = \frac{T \cdot N}{S \cdot L} \quad (II.5)$$

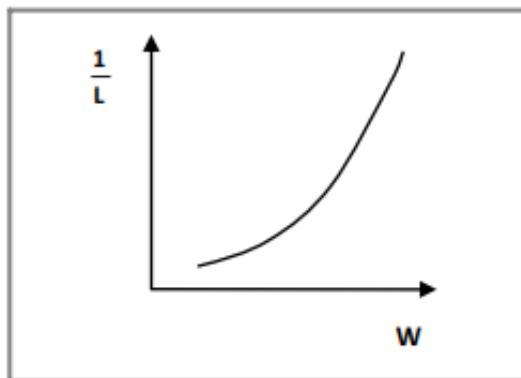


Fig. II.5: La variation de  $1/L$  en fonction de  $W$ .

**II.5. L'optimisation des outils tricônes à dents fraisées et roulements :**

Les outils tricônes à dents fraisées ont l'inconvénient d'usure rapide des dents, ce qui influe négativement sur l'avancement de l'outil, ce déficit devra être compensé par l'augmentation du poids au fur et à mesure de l'usure d'une manière croissante et proportionnelle.

A un moment donné, l'avancement deviendra trop lent et par là trop coûteux ce qui nécessite obligatoirement le changement de l'outil. L'opération de changement de l'outil constitué par le prix de son acquisition majoré par le coût de changement revient aussi chère de même que la perte de temps (temps de manœuvre, remontée et descente) vient en augmentation du coût global de forage.

Cet inconvénient causé par le mauvais choix des paramètres appliqués sur l'outil conforme (bien adapté à la formation), ce choix effectué par le chef de poste d'une manière arbitraire. Cette méthode devra être mise à l'écart et remplacée par une méthode basée sur une analyse axée sur la détermination de poids sur l'outil (WOB) et vitesse de rotation (RPM) optimales qui conduit à une vitesse d'avancement maximale ce qui implique un temps de forage minimum donc obtenir un prix réduit du mètre foré le plus bas possible. En finalité, il sera nécessaire et impératif d'arriver à un forage avec un seul outil durant toute la phase, l'outil reste toujours rentable à la fin de l'opération.

**II.5.1. Méthode d'optimisation :**

**II.5.1.1. Représentation du modèle d'optimisation :**

De ce qui précède, nous pouvons proposer en échange la méthode optimale ayant pour but de minimiser le prix de mètre foré. Pour ce faire, nous devons analyser la formule de détermination de (P<sub>m</sub>) :

$$P_m = \frac{P_0 + P_h \cdot (T_m + T_f)}{M}$$

Après l'analyse nous constatons que tous les éléments de cette formule sont fixes à l'exception du temps de forage (T<sub>f</sub>) qui est déterminant et peut être réduit à plus de 50% sans pour autant influencer sur la qualité de forage (l'état de trou...).

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.

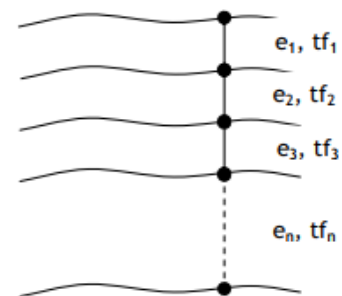
**II.5.1.2. Le modèle :**

On suppose que le nombre de couches dans toute la phase est (n), donc le temps de forage totale (T<sub>f</sub>) c'est la somme des temps nécessaires afin de forer chaque couche :

$$T_f = \sum_{i=1}^n tf_i$$

Tel que :

$$tf_i = \frac{e_i}{ROP_i} \quad (II.6)$$



Selon le critère de Galle et Woods :

$$ROP_i = C_{fi} \cdot \frac{W_i^{ki} \cdot N_i^{\alpha i}}{a_i^p}$$

Donc :

$$tf_i = \frac{e_i \cdot a_i^p}{C_{fi} \cdot W_i^{ki} \cdot N_i^{\alpha i}} \Rightarrow T_f = \sum_{i=1}^n tf_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i \cdot a_i^p}{C_{fi} \cdot W_i^{ki} \cdot N_i^{\alpha i}} \quad (II.7)$$

$$a_i = 0.93D_i + 6D_i + 1$$

Pour évaluer l'usure de roulement  $B_x$  à la fin de chaque couche, on utilise l'équation (II.5).

$$B_x = \frac{t_f \cdot N}{S \cdot L(W)} \Rightarrow tf = \frac{e}{ROP} = \frac{e \cdot a^p}{C_f \cdot W^k \cdot N^\alpha}$$

D'où :

$$B_x = \frac{e \cdot a^p \cdot N}{S \cdot C_f \cdot W^k \cdot N^\alpha} = \frac{e \cdot a^p \cdot N^{1-\alpha}}{S \cdot C_f \cdot W^k \cdot L(W)} \quad (II.8)$$

L'usure du roulement  $B_{xi}$  à la fin de la couche (i) est égale à l'usure  $B_{xi-1}$  due à la couche précédant (i-1) donc :

$$B_{xi} = B_{xi-1} + \frac{a_i^p \cdot N_i^{1-\alpha}}{S_i \cdot C_{fi} \cdot W_i^k \cdot L_i(W_i)} \cdot \Delta H_i \quad (II.9)$$

Tel que :

$$\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$$

Dans l'équation (II.9)  $L(w)$  reste inconnu.  $L$  varie en fonction du poids appliqué sur l'outil :

Tab. II.2: Variations de L en fonction de W.

W	L	W	L	W	L	W	L	W	L
15	6240	29	2630	43	1400	57	794	71	484
16	5840	30	1496	44	1340	58	766	72	467
17	5440	31	2370	45	1288	59	739	73	450
18	5080	32	2260	46	1240	60	714	74	434
19	4750	33	2160	47	1195	61	689	75	418
20	4439	34	2060	48	1150	62	665	76	403
21	4170	35	1963	49	1105	63	642	77	388
22	3920	36	1880	50	1063	64	620	78	373
23	3680	37	1800	51	1025	65	599	79	363
24	3470	38	1725	52	988	66	578		
25	3270	39	1650	53	953	67	558		
26	3080	40	1578	54	918	68	538		
27	2910	41	1515	55	884	69	520		

Par la méthode de moindre carrée, on peut trouver une expression mathématique de la variation de (L) en fonction de (W) à l'aide du tableau. L'expression est :

$$L(W) = a \cdot W^5 + b \cdot W^4 + c \cdot W^3 + d \cdot W^2 + f \cdot W + g \quad (\text{II. 10})$$

Les valeurs des coefficients de l'équation (II.10) sont :

- ✓  $a = -2.1656 \times 10^{-20}$
- ✓  $b = 6.1799 \times 10^{-15}$
- ✓  $c = -7.0569 \times 10^{-10}$
- ✓  $d = 4.1004 \times 10^{-5}$
- ✓  $f = -1.2622$
- ✓  $g = 1.8023 \times 10^4$

Tous les facteurs influant sur le temps de forage sont modélisés par des équations mathématiques en fonction de WOB et RPM. Donc, on peut construire notre modèle d'optimisation avec toutes les contraintes sur le WOB, RPM, D et  $B_x$ .

Le fonctionnel :

$$T_f = \sum_{i=1}^n t_{fi} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i \cdot a_i^p}{C_{fi} \cdot W_i^{ki} \cdot N_i^{\alpha i}} \rightarrow \min \quad (\text{II. 11})$$

Les contraintes :

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{imin} \leq W_i \leq W_{imax} \\ N_{imin} \leq N_i \leq N_{imax} \\ D_i \geq 0 ; i = 1, n. \\ \sum D_i \leq 1. \\ B_{xi} \geq 0 ; i = 1, n. \\ \sum B_{xi} \leq 1. \end{array} \right.$$

Le modèle obtenu est un problème de programmation non linéaire PNL (modèle de progression non linéaire) avec contraintes. Par la résolution de ce modèle, on peut définir le couple poids–rotation optimal de chaque couche.

L'opération d'optimisation du modèle proposé fait appel aux paramètres (ROP, WOB, RPM) repris sur un puits voisin utilisé comme référence afin d'identifier les facteurs de modèle ( $C_f$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ,  $S$ ).

Le puits de référence représente à quelque chose près les mêmes caractéristiques de formation (dureté, tendance abrasivité) que le puits à forer (l'objet de la présente étude).

Prenant en considération l'état d'usure finale ( $D_f$ ) et ( $B_x$ ) de l'outil utilisé pour forer le puits de référence, considérons que l'usure de dents et l'usure de roulement sont subies de manière linéaire en fonction de la profondeur, nous pouvons évaluer l'usure des dents et l'usure de roulement à chaque période ce qui nous permet d'identifier les facteurs de formation ( $C_f$ ,  $S$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ).

**II.5.1.3. L'identification des coefficients de formation ( $C_f$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ) :**

Considérons que le puits de référence à la même caractéristique que le puits à forer, considérons que les facteurs de puits de référence peuvent être déterminés du fait de l'enregistrement instantané des paramètres (Mud Logging), il ne reste qu'à les appliquer aux puits à forer.

A partir de Mud Logging il nous sera facile de déterminer le ROP, WOB, RPM mètre par mètre tout au long du puits.

La méthode de résolution des équations d'une seule couche sera reconduite pour les autres couches.

La vitesse d'avancement de la couche (j) est :

$$ROP = C_f \cdot \frac{W^k \cdot N^\alpha}{a^p} \Rightarrow (a^p \cdot ROP - C_f \cdot W^k \cdot N^\alpha) = 0$$

Donc, le modèle est :

Le fonctionnel :

$$\sum_{j=1}^n [a_j^p \cdot ROP_j - C_f \cdot W_j^k \cdot N_j^\alpha]^2 \rightarrow \min \quad (\text{II.12})$$

Les contraintes :

$$\begin{cases} C_f \geq 0. \\ 0 \leq k \leq 1 \\ 0 < \alpha \leq 1.5 \end{cases}$$

Nous constatons qu'à l'exception de (a) qui reste inconnu, tous les autres paramètres sont connus (ROP, W et N).

**Détermination de (a) :** sera calculé d'après l'équation (II.3) :

$$a = 0.93D^2 + 6D + 1$$

A la lecture de l'enregistrement effectué sur le puits de référence nous constatons l'absence de l'enregistrement de l'usure le long de puits. Seulement nous sommes en possession de cette valeur à l'état initiale  $D=0$  (outil neuf) et l'état final  $D= D_f$  (outil utilisé).

Pour identifier l'usure à chaque instant, ceci est très difficile parce que l'usure se fait d'une manière non linéaire en fonction de la profondeur (Fig. II.6). Pour simplifier le problème, nous supposons que l'usure se fait de manière linéaire tout au long de puits. Nous pouvons déterminer la valeur de (D) le long de puits par les étapes suivant :

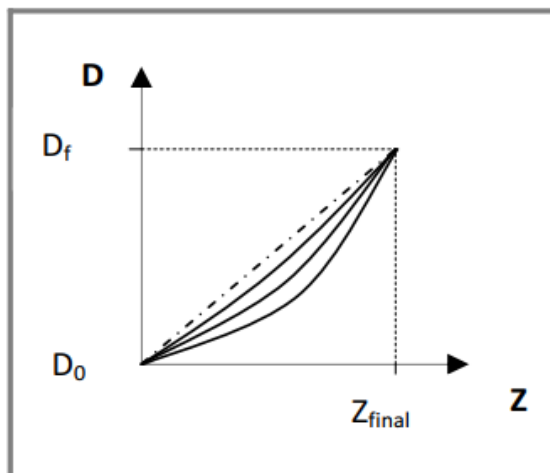


Fig. II.6 : L'usure en fonction de la profondeur.

La relation est linéaire entre le D et le Z implique :

$$\mathbf{D} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{C}$$

A partir de la figure (Fig. II.5) :

$$\mathbf{C} = \mathbf{0}.$$

$$\mathbf{b} = \frac{d\mathbf{D}}{d\mathbf{Z}} = \frac{\mathbf{D}_f - \mathbf{D}_0}{\mathbf{Z}_{\text{final}}}$$

$$\text{Donc : } \mathbf{D}(\mathbf{Z}) = \frac{\mathbf{D}_f}{\mathbf{Z}_{\text{final}}} \cdot \mathbf{Z} \quad (\text{II. 13})$$

A partir de l'équation (II.13), on peut évaluer D tout en donnant la valeur de profondeur Z. en remplaçant la valeur de D dans l'équation (II.3) pour déterminer (a).

Après détermination de (a) le long de la phase, il nous est facile d'identifier ( $C_f$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ) mais avec des contraintes sur ces derniers, cet obstacle nous oblige à passer d'une identification simple par la méthode de moindre carré à la résolution d'un problème de programmation non linéaire (PNL), problème d'optimisation.

Mais la valeur de  $C_f$ ,  $k$  et  $\alpha$  déterminés par le système (II.12) n'est pas exacte, car en remplaçant les valeurs moyennes des ROP, W et N pour chaque couche et pour identifier  $C_f$ ,  $k$  et  $\alpha$  ne sont pas très de grande précision, mais proche de la formation, on examinera tous les points enregistrés par le master log.

Et le modèle d'optimisation se transforme comme suit :

Le fonctionnel :

$$\sum_{j=1}^n [a_i^p \cdot \text{ROP}_i - C_f \cdot W_i^k \cdot N_i^\alpha]^2 \rightarrow \min \quad (\text{II. 14})$$

$$\text{Les contraintes : } \begin{cases} C_f \geq 0. \\ 0 \leq k \leq 1 \\ 0 < \alpha \leq 1.5 \end{cases}$$

**II.5.1.4. L'identification de coefficient de boue S :**

De la même manière, et à partir du master log, on prend l'enregistrement de ROP, W et N en remplaçant (e) dans l'équation suivante :

L'équation (II.8) est :

$$B_x = \frac{e \cdot a^p \cdot N^{1-\alpha}}{S \cdot C_f \cdot W^k \cdot L(W)}$$

$$\Rightarrow B_x \cdot S \cdot C_f \cdot W^k \cdot L_i - e \cdot a^p \cdot N^{1-\alpha} = 0$$

Tous les paramètres sont connus sauf S, on examinera tous les points comme l'identification précédente, donc le modèle sera le suivant :

Le fonctionnel :

$$\sum_{j=1}^n \left[ \mathbf{B}_{xj} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{C}_f \cdot \mathbf{W}_j^k \cdot \mathbf{L}_j - \mathbf{e}_j \cdot \mathbf{a}_j^p \cdot \mathbf{N}_j^{1-\alpha} \right]^2 \rightarrow \min \quad (\text{II. 15})$$

Les contraintes :  $\mathbf{S} \geq \mathbf{0}$ .

Le problème reste avec la valeur d'usure de roulement  $B_x$  à chaque instant, on va résoudre ce problème comme l'usure des dents  $D$ , c'est-à-dire en considérant que l'usure de roulement se fait de manière linéaire en fonction de la profondeur.

Donc :  $\mathbf{B}_x = \mathbf{b} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{C}$  /  $\mathbf{b}$  : la tangente de la droite passe par  $D_0$  et  $D_f$ .  
 $\mathbf{C}$  : l'intersection de la droite et l'axe d'ordonné.

$$\mathbf{C} = 0.$$

$$\mathbf{b} = \frac{dB_x}{dZ} = \frac{B_{xf} - B_{x0}}{Z_{\text{final}}}$$

✚  $B_{x0} = 0$  (outil neuf) et  $B_{xf}$  : il déterminer à partir de fiche du puits.

$$\text{Donc : } \mathbf{B}_x(\mathbf{Z}) = \frac{\mathbf{B}_{xf}}{\mathbf{Z}_{\text{final}}} \cdot \mathbf{Z} \quad (\text{II. 16})$$

La valeur de  $B_x$  est connue, nous pouvons résoudre le problème d'optimisation par le modèle (II.15).

En répéter l'identification des coefficients pour toutes les couches pour pouvoir construire notre modèle complet de toute la phase à forer.

#### II.5.1.5. L'optimisation des paramètres mécaniques (WOB, RPM) :

En application des résultats obtenus dans le puits de référence (les facteurs de formation  $C_f$ ,  $k$ ,  $\alpha$  et  $S$ ) pour le puits à forer, il nous reste à résoudre le modèle d'optimisation (II.11) pour déterminer le couple WOB-RPM à conduire d'un prix de mètre forée le plus bas possible.

### II.6. Généralisation du modèle :

Considérons que la détermination de  $C_f$ ,  $k$  et  $\alpha$  vue précédemment et identifier pour une formation (couche) complète, considérons l'hétérogénéité de la formation, cette méthode restant incomplète pour obtenir des résultats plus précis nous allons discrétiser cette formation sur des intervalles d'épaisseur ( $e$ ). Pour chaque intervalle, nous allons identifier ses propres facteurs. Par cette méthode nous obtiendrons le résultat le plus proche possible de l'état de la formation réelle.

## *Chapitre III*

### *Application et interprétation des résultats*



**III.1. Introduction :**

Ce chapitre présente l'application et l'interprétation des résultats de notre approche d'optimisation des paramètres mécaniques.

L'optimisation efficace de ROP est une étape importante de la réussite processus de forage pétrolier. Avec l'approfondissement d'exploration et le développement de pétrole et gaz, le succès de forage de puits est devenu de plus en plus difficile.

Dans de nombreux cas, des réservoirs de pétrole et de gaz se trouvent profondément sous terre. Il est fréquent que les profondeurs varient de 5.000 à 10.000 mètres sous terre. En raison des propriétés de formation complexes, le temps non productif (NPT) prend une proportion très élevée dans le temps total de forage. Tous ces facteurs conduisent finalement à l'allongement des cycles de forage, et un faible ROP global, qui ralentit sérieusement le progrès de l'exploration et du développement.

En raison de la complexité de pénétration et l'hétérogénéité de la formation, l'approche traditionnelle comme équations mathématiques de ROP et analyse de régression sont confinés par leurs limitations dans la prédiction des paramètres forage, il est donc nécessaire de trouver une méthode de prédiction de ROP commode et relativement précise. Au cours des dernières années, les applications des méthodes d'intelligence artificielle dans le domaine de forage ont évolué progressivement.

Cette étude contient un problème d'optimisation avec un nombre des paramètres à optimiser très grand et des fonctionnels non linéaires avec contraintes.

Pour cela, on a favorisé à effectuer le travail en MATLAB et créer un ensemble des programmes reliés entre eux par tous les problèmes d'optimisation posés dans cette étude.

**III.2. Présentation de la phase étudiée :**

Nous avons choisi la phase 16" pour notre application sur deux puits verticaux de champ de Hassi Tarfa (HTF11 et HTF12). En outre, la formation de la lithologie disponible pour cette phase est présentée comme suit :

**Mio-Pliocène (12m → 189m = 177m) :** Il se compose principalement de sable quartzeux moyen à grossier, mal classé, non consolidé, translucide, passant à grès peu cimenté par ciment argilo-dolomitique, avec intercalations de calcaire blanchâtre localement gréseux et d'argile sableuse, rougeâtre à brunâtre, tendre.

**Eocène (189m → 307m = 118m) :** Il se compose principalement de sable quartzeux, d'argile sableuse et dolomite.

**Sénonien carbonaté (307m → 403m = 96m) :** Prédominance de calcaire dolomitique blanc et beige, vacuolaire, moyennement dur, avec passées de dolomie beige cristalline, marne légèrement dolomitique grise et gypse fibreux blanc à translucide. Niveaux d'argile dolomitique grise, parfois gris-foncée pâteux.

**Sénonien anhydritique (403m → 443m = 40m) :** Dans la partie supérieure : alternances de gypse fibreux translucide devenant anhydrite blanche pulvérulente, dolomie cristalline, calcaire dolomitique et marne. Dans la partie moyenne : prédominance de calcaire et calcaire dolomitique beige vacuolaire, localement argileux avec intercalations d'anhydrite blanche et marne grise pâteuse. Niveaux de dolomie et dolomie calcaire localement argileuse.

Dans la partie inférieure : alternances de dolomie microcristalline grise, anhydrite blanche, argile grise tendre et calcaire crayeux gris tendre.

### **III.3. Présentation du programme d'optimisation :**

Pour trouver un (ROP) optimal il faut tirer les meilleurs avantages que possible sur les paramètres mécaniques c'est-à-dire d'avoir les paramètres optimaux. Il y a plusieurs méthodes d'optimisations des paramètres de forage. Pour notre mémoire, on a choisi la méthode d'optimisation du ROP par les équations mathématiques proposées par Gall et Woods qui représentent le processus d'avancement en fonction du temps d'un outil tricône, et afin d'identifier la nature de la formation qu'on va forer, on va utiliser la technique de l'offset well (puits voisin).

#### **III.3.1. Les données d'entrées et les sorties :**

Toutes les informations de puits de référence ont été prises à partir du rapport d'exécution de l'outil (Bit Run Report) fait par l'ingénieur de chantier de la société de HALLIBURTON.

##### **III.3.1.1. Les données d'entrée :**

Notre modèle de prédiction de la ROP est basé sur les paramètres suivants :

- Les paramètres de forage (WOB et RPM) mètre/mètre appliqués dans le puits de références (HTF11).
- Le temps de forage de puits de référence (HTF11).
- La profondeur finale de puits de référence.
- Le maximum WOB acceptable par l'outil.
- Le maximum RPM acceptable par l'outil.
- $e$  : Pas d'intervalles qu'on va discrétiser la phase.

##### **III.3.1.2. Les sorties du programme:**

#### **1. L'identification :**

- $C_f, k, \alpha$  : les coefficients de formation de chaque intervalle discrétisé.
- $S$  : le coefficient de boue  $S$  dans chaque intervalle discrétisé.
- $B_x$  : Coefficient de fraction de la vie des roulements

#### **2. L'optimisation :**

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

#### **3. La simulation :**

- **ROP** : La vitesse d'avancement conduite par le couple WOB-RPM optimal.
- **T<sub>f</sub>** : Le temps de forage conduit par le couple WOB-RPM optimal.

#### **4. Les courbes :**

- Une courbe présente la variation des coefficients de la formation ( $C_f, k, \alpha$ ) et le coefficient de la boue ( $S$ ) le long du puits.

- Une courbe présente une comparaison graphique entre les paramètres mécaniques (WOB et RPM) réels appliqués sur l'outil dans le puits à optimiser et les paramètres optimaux définis par MATLAB.
- Une courbe présente une comparaison graphique entre les avancements (ROP) dans le puits à optimiser et l'avancement prévu si on appliquera les paramètres optimaux.
- Une courbe présente une comparaison graphique entre le temps de forage le long du puits à optimiser et le temps de forage prévue si on appliquera les paramètres optimaux.

### **III.3.2. L'organigramme d'optimisation :**

On va montrer l'organigramme afin de présenter les démarches de l'application à partir du téléchargement des données jusqu'à l'affichage des résultats.

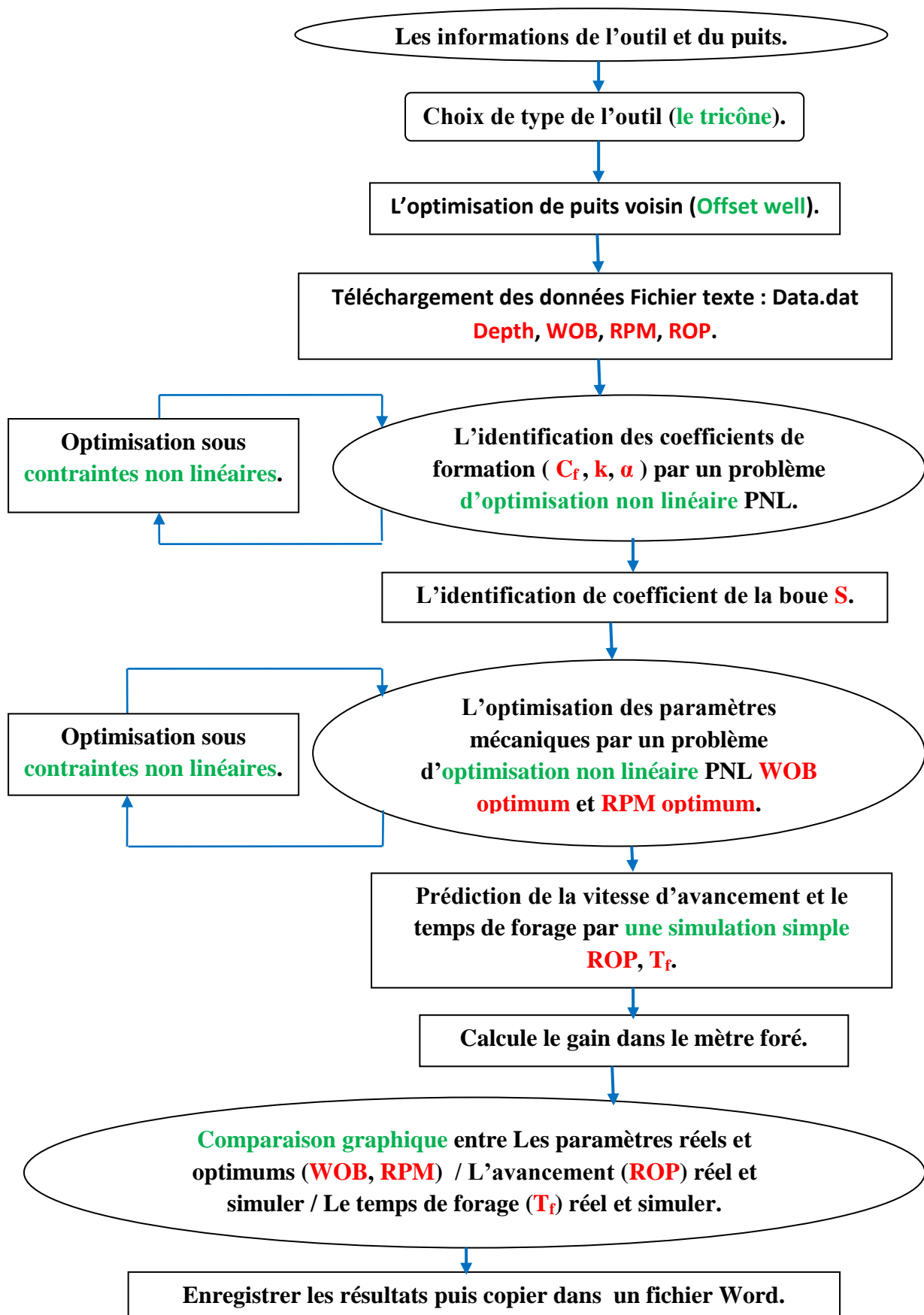


Fig. III.1 : L'organigramme d'optimisation par la technique Offset

### III.4. Application et Interprétation des Résultats :

#### III.4.1. Application :

Application au puits HTF-12 pour la phase 16" :

Toutes les données nécessaires à l'optimisation du puits sont représentées dans les points suivants :

- le puits de référence c'est **HTF-11**.
- L'outil c'est **XT12SC** de diamètre **16"**.
- L'enregistrement des paramètres de forage du puits **HTF-11** (fichier Data.dat).
- La profondeur de la phase 16" de puits **HTF-12** est :  $H = 429$  m.
- Le maximum WOB c'est **25 tonnes**.
- Le maximum RPM c'est **250 tr/min**.
- On discrétise la phase 16" en 430 intervalles, c'est-à-dire  $e = 1$ .
- On fait rentrer toutes les données dans le logiciel et on exécute.

#### III.4.2. Résultats et interprétations :

• Le temps de forage réel est :  $T_{\text{réel}} = 28.75$  hrs, Le temps de forage optimisé est :  $T_{\text{opt}} = 18.64$  hrs.

- Le temps gagné est égal :

$$\Delta T_f = (T_{\text{réel}} - T_{\text{opt}}) = 10.11 \text{ hrs.}$$

• Le prix par heure de location de l'appareil de forage  $P_h = 125,000$  DA/hrs. (**ENTP, 2018**)  
Donc, on peut calculer le gain de prix de mètre foré :

$$\Delta P_m = \frac{P_h \times \Delta T_f}{H}$$

$P_h = 125,000$  DA.  $\Delta T_f = 10.11$  hrs.  $H = 429$  m. D'où :  $\Delta P_m = 2945.8042$  DA/m.

C'est-à-dire, on va gagner **35 %** du coût total de forage.

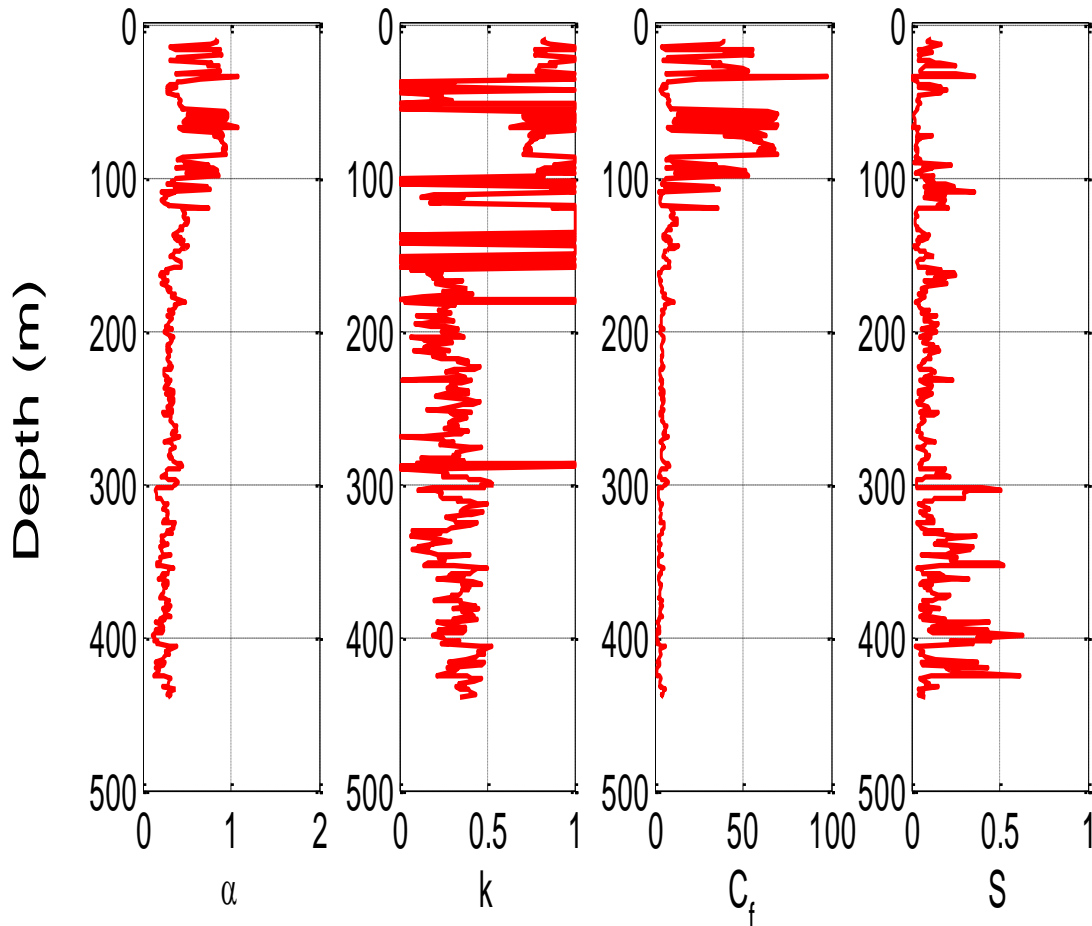
- Nous allons représenter les courbes suivantes :
  1. Les coefficients de la formation ( $C_f$ ,  $k$ ,  $\alpha$ ) et de la boue ( $S$ ),
  2. Les paramètres mécaniques (WOB, RPM) réels et optimaux,
  3. Le temps de forage réel et optimum.

On peut faire l'interprétation de ces courbes comme suit :

- **La figure Fig. III.2** : Cette figure contient les courbes des variations des coefficients de la formation et de la boue en fonction de la profondeur :
  - a. Le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> graphique présentent la variation du coefficient de la rotation  $\alpha$  et du coefficient du poids  $k$  le long de la phase. On constate d'après ces graphes une liaison entre la variation des valeurs des coefficients et la nature de formation.
  - b. Le 3<sup>ème</sup> graphique présente la variation du coefficient de la formation  $C_f$  le long de la phase, l'augmentation de la courbe signifie que la formation est tendre et l'inverse signifie que la

formation est dure, ceci provient de la variation de la courbe qui est proportionnelle à la variation de la vitesse d'avancement ROP.

c. Le 4<sup>ème</sup> graphe présent la variation du coefficient de la boue S, l'augmentation de la courbe signifie que la formation est dure et l'inverse signifie que la formation est tendre.



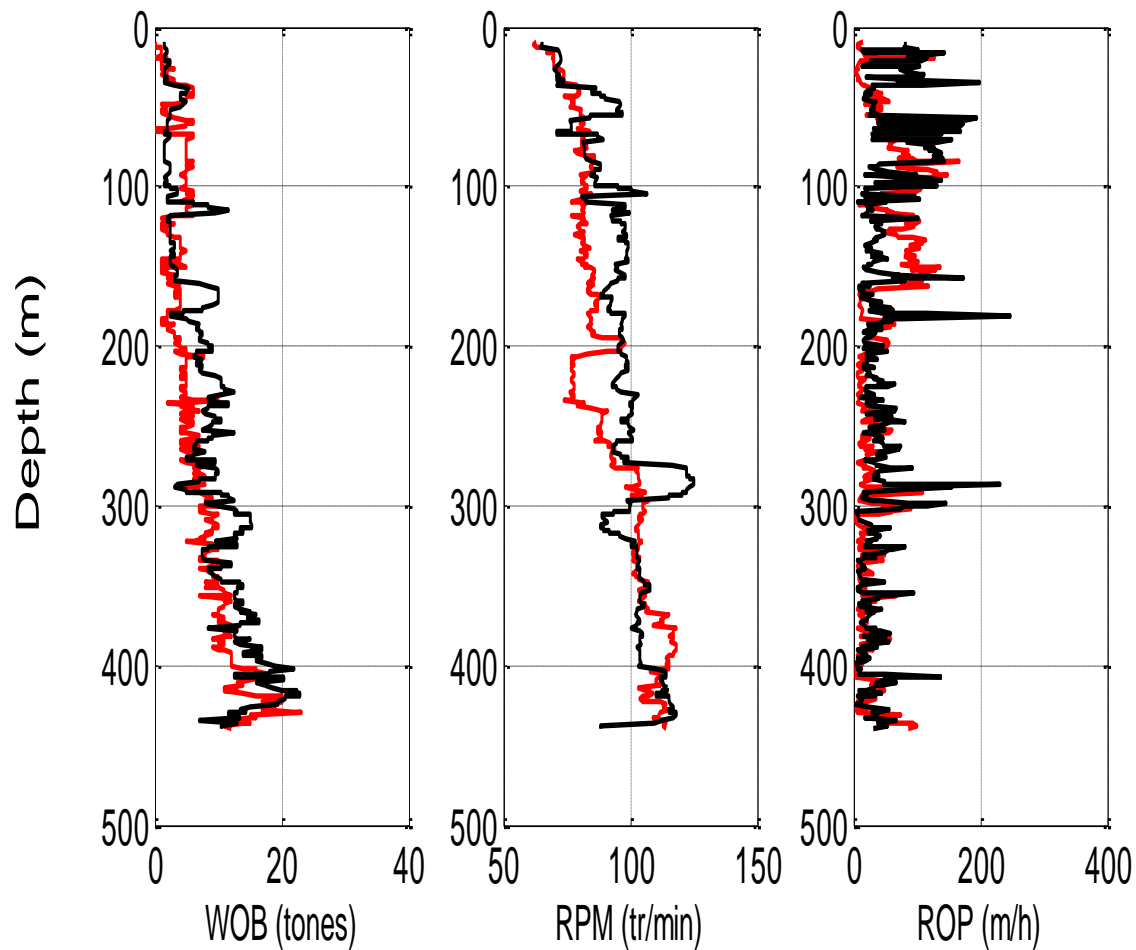
**Fig. III.2 : La variation des coefficients de la formation et de la boue en fonction de la profondeur.**

➤ **La figure Fig. III.3 :** Cette figure contient une comparaison entre les paramètres de forage appliqués réellement (courbe en rouge) et les paramètres optimaux définis par le programme d'optimisation (courbe en noir).

a. Le 1<sup>er</sup> graphe présent la variation du WOB le long de la phase, les poids proposés par le programme d'optimisation restent dans les marges des poids réelles.

b. Le 2<sup>ème</sup> graphe présent la variation du RPM le long de la phase, les rotations proposées par le programme d'optimisation sont totalement différents que les rotations appliqués réellement.

c. Le 3<sup>ème</sup> graphe présent la variation du ROP le long de la phase.



**Fig. III.3 : La comparaison entre les paramètres de forage réel et les paramètres optimaux.**

➤ **La figure Fig. III.4 :** Cette figure contient une comparaison entre les avancements en fonction du temps réel (courbe en rouge) et optimisé (courbe en noir).

On peut remarquer sur cette figure un gain total dans le temps de forage d'environ 10.11hrs par rapport au temps mis dans le forage HTF12 pour terminer la même profondeur dans la phase 16". Ce gain de temps, est dû principalement à l'application des paramètres mécaniques recommandés par le programme d'optimisation.

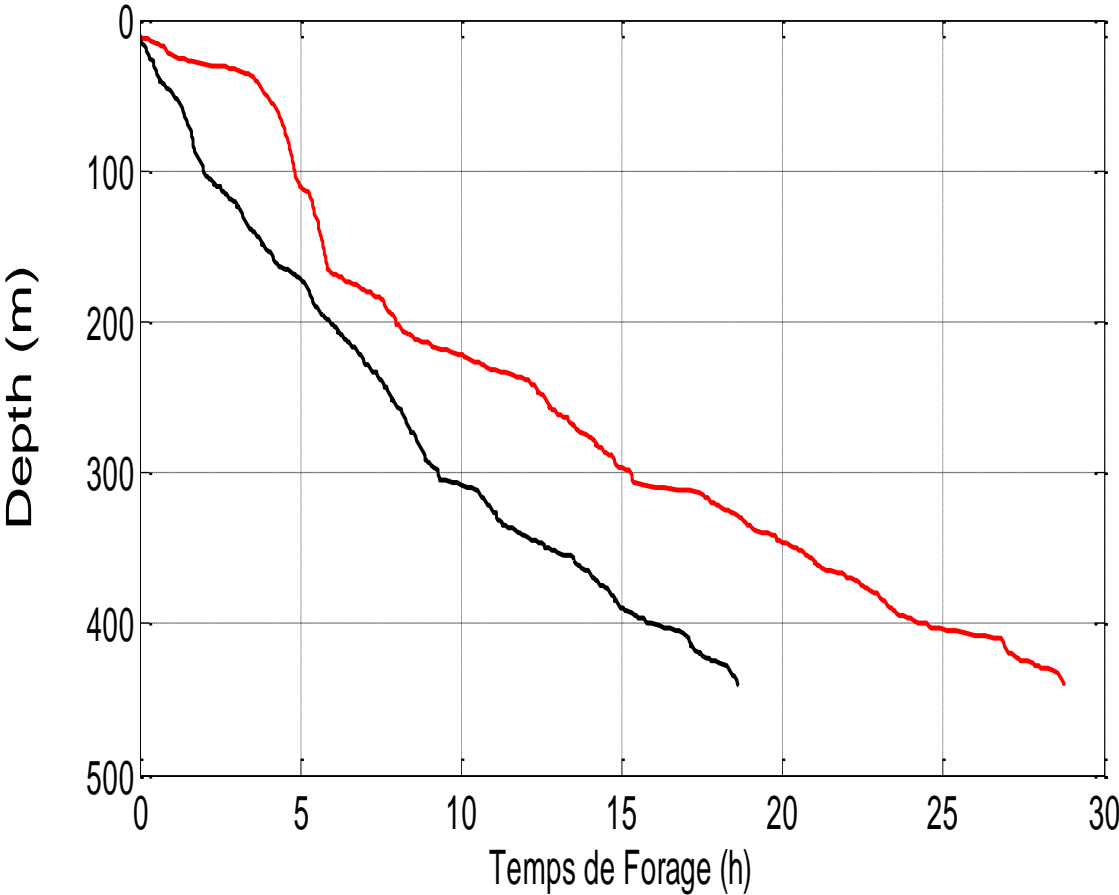


Fig. III.4 : La comparaison entre les avancements en fonction du temps réel et optimisé.

## *Conclusion et Recommandations*



### Conclusion

Une méthodologie de prédiction et d'optimisation de la vitesse de forage ROP a été développée, démontrée et appliquée afin d'atteindre des paramètres de forage contrôlables optimaux.

L'enregistrement des paramètres de forage au cours de leur réalisation nous a permis d'avoir une idée sur le comportement des outils dans les formations géologiques. Notre étude est basée essentiellement sur les paramètres mécaniques d'un outil de forage Tricônes dans la phase 16" du forage HTF 12 dans le champ de Hassi Tarfa.

Le but de cette étude était d'estimer les meilleures conditions pour aboutir à un ROP de plus en plus rapide afin de minimiser le temps total de forage par un traitement des données d'un puits le plus proche.

Nous achevons ce travail en disant que les tentatives de contribuer à l'optimisation des paramètres mécaniques d'un outil de forage Tricônes se déroulent en trois grandes étapes. Dans la première partie nous avons défini les outils de forage Tricône, les paramètres mécaniques. La seconde partie a été destinée aux études théoriques qui servent de base à la construction et à la coordination de travail et l'application. Elle commence par la théorie d'optimisation de Gall et Woods. Cette partie se termine par l'application de la technique de puits voisins sur le champ de Hassi Tarfa (HTF 11) qui nous a permis d'avoir des résultats des paramètres mécaniques optimaux notamment le poids sur l'outil WOB, la vitesse de rotation RPM et la vitesse d'avancement ROP.

Les résultats obtenus ont prouvé que les coûts de forage peuvent être réduits d'une façon considérable par une application judicieuse des paramètres optimaux.

### Recommandations

Le modèle d'optimisation de la vitesse d'avancement a donné des résultats théoriques très encourageants.

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

- Développer ce modèle en introduisant les paramètres hydrauliques ;
- Faire l'optimisation sur des intervalles plus petit, au lieu de faire l'optimisation mètre par mètre on prend des intervalles de 10 cm par exemple (selon les performances réalisées), pour avoir une plus grande précision et minimiser l'effet de décalage selon les tops des formations ;
- Calibrer et adapter bien tous les équipements utilisés pour l'acquisition de données dans l'appareil de forage pour l'application actuelle parce que la qualité de données est un facteur principal dans la modélisation et l'optimisation de la ROP ;
- Appliquer un nombre suffisant des puits afin d'obtenir des résultats satisfaites ;
- Développer un système à base d'agents qui prend en charge tous les aspects de forage pour servir un système d'aide à la décision plus complet ;
- Tester sur le terrain afin de le valider et le développer pour pallier à ces défaillances.

*Annexe*



# Annexe

**HALLIBURTON**

Drill Bits & Services

**HALLIBURTON**

Project Management



## DRILL BIT RUN PARAMETERS

Company	Sonatrach-HPM	Well	HTF 12	Bit Size	16"
Contractor	Nabors	Field	Hassi Tarfa	Bit Type	XT12SC
Rig name	NDIL 283	Zone	Algeria	S/N	
Run Date	15-Apr-12	Block	427	Mat No	
Run No.		Country		IADC	



Photos prises de l'outil tricônes XT12SC lors de forage du puits HTF-12.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Final well report HASSI TARFA, 15/04/2012.
- [2] Outils de forage École Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs Edition TECHNIP, 2006.
- [3] F.GRONDIN, "outils de forage", ENSPM Formation Industrie - Forage • Production • Gisement. 2009.
- [4] A. CHOQUIN, « Cours de forage. 2<sup>ème</sup> partie. Paramètres et contrôle du forage », Publications de l'institut français du pétrole, édition octobre 1975.
- [5] Jean-Paul Szezuka Ingénierie du forage dirigé ENSPM (Edition 3.3 - Juin 2005).
- [6] CULIOLI Jean-Christophe, « Introduction à l'optimisation », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, édition 1994.
- [7] H. Chouaib, Sélection de Caractéristiques : Méthodes et Applications, Thèse de doctorat en informatique, Université Paris Descartes, 2011.
- [8] B. Djelaila, A. Dadi sidi et K. Bouaza, « Optimisation des paramètres mécaniques du forage horizontal Application sur les puits (MDZ491-MDZ492-MDZ501) », Mémoire de master professionnel en forage, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2013.
- [9] H. Horra, Approche adaptative d'optimisation des paramètres mécaniques de forage, Mémoire de magister en exploitation des gisements pétroliers, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [10] I. Zehri et S. Slimani, «Optimisation des paramètres de forage dans les Réservoirs cambro-ordoviens (périmètre Tidikelt la région d'In-Salah)», Mémoire de master professionnel en forage, université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012.

## عنوان المذكرة : تحسين الإعدادات الميكانيكية لمتقاب الحفر ثلاثي المخاريط : تطبيق على بئر HTF-12 في حقل حاسي الطرفة .

المؤطر: الأستاذ تاوتي محمد بشير

الاسم : هاجر

اللقب: شعشوع

**ملخص :** الهدف من حفر الآبار هو الوصول إلى مكن النفط في أفضل الظروف الممكنة بأقل تكلفة ممكنة و في ظروف السلامة القصوى. نقدم في عملنا هذا تقاربا أمثليا لإعدادات الحفر الميكانيكية، حيث حاولنا مقارنة تطور سرعة التقدم على أساس معايير أخرى مثل (الثقل على الأداة – سرعة الدوران) من أجل تقدير أفضل الظروف لتحقيق سرعة التقدم أسرع وأسرع لتحسين المردود. وقد استخدمنا بيانات من سجلات الحفر من آبار في حقل نفطي في جنوب الجزائر << حاسي الطرفة >> وقد أثبتنا أن النموذج المقترح قادر على التنبؤ بسرعة الحفر وتحسينها بطريقة فعالة.

و في النتيجة وجدنا أن وقت الحفر قد انخفض بشكل ملحوظ عند استخدام اعدادات الحفر المثلى وبالتالي فإن تكلفة الحفر يمكن أن تنخفض.

**كلمات مفتاحية :** متقاب الحفر ثلاثي المخاريط، الإعدادات الميكانيكية، سرعة التقدم، تحسين.

---

**Memory title : Mechanical parameters optimization of the Tricône drill bit: Application on the Hassi Tarfa HTF-12 well.**

**Name : CHACHOA**

**First name : Hadjer**

**Directed by : Mr. TAOUTI Mohamed Bachir**

**Abstract :** The oil well drilling objective is to reach the target in the best possible conditions, minimal cost and maximal quality and safety.

We present in our work an optimization approach of the drilling mechanical parameters, or we tried to compare the evolution of ROP based on other parameters such as (WOB-RPM) was end to estimate the best conditions to achieve a ROP faster and faster.

We used data from the well drilled in the Hassi-Tarfa field in southern Algeria. The results of the experiment show that the proposed approach is able to effectively use the engineering data to provide effective prediction ROP and optimize drilling parameters, it was found that the rotating time has been reduced significantly when using the optimum drilling parameters and consequently the drilling cost was decreased.

**Key words:** Tricône drill bit, Mechanical parameters, Rate of penetration, Optimization.

---

**Titre du mémoire : Optimisation des paramètres mécaniques d'un outil de forage Tricône: Application sur le puits HTF-12 dans le champ de Hassi Tarfa.**

**Nom: CHACHOA**

**Prénom: Hadjer**

**Encadreur: M. TAOUTI Mohamed Bachir**

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

Nous présentons dans notre travail une approche d'optimisation des paramètres mécaniques de forage, où on a essayé de comparer l'évolution de ROP en fonction d'autre paramètre comme (WOB -RPM) a fin d'estimer les meilleures conditions pour aboutir a un ROP de plus en plus rapide.

Nous avons utilisés des données des puits foré dans le champ de Hassi-Tarfa situé dans le sud de l'Algérie. Les résultats de l'expérience montrent que l'approche proposée est capable d'utiliser efficacement les données d'ingénierie pour fournir prédiction efficace de ROP et d'optimiser les paramètres de forage de puits.

Il a été constaté que le temps de rotation a été considérablement réduit en utilisant les paramètres de forage optimaux et par conséquent le coût de forage a été diminué.

**Mots clés :** Outil de forage Tricônes, Paramètres mécaniques, Vitesse d'avancement, Optimisation.