

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2019

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département Gisements miniers et pétroliers

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Présenté par :

BELLACHE Hamid

DJAFOUR Aghiles

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits d'hydrocarbures

Thème

**Prédiction du ROP par la méthode des réseaux de neurones artificiels.
Application pour la résolution des problèmes liés aux argiles gonflantes
cas du puits HOUA-1**

Soutenu publiquement, le .../07/2019

Devant le jury :

MELLAK Abderrahmane	Professeur	UMBB	Président
AZRIL Nadjat	MA (A)	UMBB	Encadreur
HADJADJ Ahmed	Professeur	UMBB	Examinateur
BOUMAZA Nadia	MA (A)	UMBB	Examinatrice
BOUGHLOUL Abdelouahab	Ingénieur	Division forage	Invité

Année universitaire 2018/2019

Résumé

Le but de ce travail est de traiter du problème de la faible vitesse d'avancement du forage (ROP) lors de la traversée des formations argileuses dans le champ de Ain-Amenas notamment dans le puits HOUA-1.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la contribution de la boue de forage dans ce problème par l'étude des caractéristiques chimiques, physiques et rhéologiques de cette dernière, et son influence sur la vitesse d'avancement (ROP), pour cela nous avons commencé par une modélisation du ROP en utilisant le réseau de neurones artificiels (ANN) en fonction des paramètres mécaniques, hydrauliques et rhéologiques.

Dans un second temps, nous avons abordé la problématique de chute de la vitesse d'avancement du forage. Pour répondre à cette question nous avons fait un diagnostic afin d'identifier les causes qui y sont responsables, après des analyses diagraphiques, géologiques, stratigraphiques etc... de la phase 16'' du puits HOUA-1, notre étude a révélé que la formation est principalement constituée d'argiles.

Enfin nous avons montré que la chute de la vitesse d'avancements est directement liée à la nature de la boue utilisée et non pas aux paramètres appliqués, ce qui nous a mené à proposer d'autres types de boues, notamment les boues minérales et les boues synthétiques qui sont d'une part plus performantes et rentables, et d'autre part moins polluantes et engendrent moins d'impacts environnementaux, grâce à leurs biodégradabilité et leur toxicité réduite.

Mots clés: vitesse d'avancement, argiles, réseau de neurones artificiels, boue de forage.

Abstract

The purpose of this work is to deal with the problem of the low rate of penetration (ROP) during the crossing of clays formations in the Ain-Amenas field, particularly in the HOUA-1 well.

At first, we were interested to the contribution of drilling mud in this problem by studying its chemical, physical and rheological characteristics, and its influence on the rate of penetration (ROP), for this reason we began by modeling the ROP using artificial neural network (ANN) based on mechanical, hydraulic and rheological parameters.

In a second step, we approached the problem of falling progress of the rate of penetration. To answer to this question we made a diagnosis to identify the causes that are responsible, after the analysis of log, geological, stratigraphic etc. data of the 16 " phase of the well HOUA-1, and our study revealed that the formation is mainly made of clays.

Finally we realized that the drop in the rate of penetration is directly related to the nature of the mud used and not to the applied drilling parameters, which led us to propose other types of mud, in particular mineral muds and synthetic muds which are both more efficient and profitable, less polluting and generate less environmental impacts, because to their biodegradability and reduced toxicity.

Keyword: rate of penetration, clays, artifical neuronal network, drilling mud.

Ayzul

Iswi leqdic agi, d asqerdec n wugur usubu n urured n tyuzi (ROP) mi ara n-zger tumlilt de huriq n in aminos aba3da deg umruj n Houa-1.

Di tazwara nerra tamuyl nney yer tiwsi n walud tyuzi de ugur agi, s unelmed tulmisin tukrarin tifizihiyin ines, aked d tezirt ines yef urured n tyuzi, yef waya nezwar anelmed nney s usmudem n urured n tyuzi s useqdec n uzeta ur-agaman (ANN) s immagen imkaniken, imiswan.

Di tama tis snat nerfed ugur n usubbu agi, akken ad nerr yaf usteqsi agi ngad asnefru akken ad n-af timentilin i yellan deffir-s, imi nga d inesladin n wakal de umruj n HOUA-1 ,tazrawt nney tennad d akken azal ameqran n tbessasin n wakal id neyza d tewgant s tumlilt.

Ar tagara nebded d akken asubu n urured agi icud yer tewsit n walud I nesseqdec ,macci ar imgan n tyuzi, d aya i y-yessawden nbedred tiwsitin nniden n walud aba3da alud n zzit d walud amguran d wigi i yellan s3an tazmert , aked I yellan d arrarayan,di tama nniden ur yesluuyen ara s watas ur yellan ara d imihawen.

Awalen tisura : arured n tyuzi tumlilt, uzeta ur-agaman, alud tyuzi

ملخص

الغرض من هذا العمل هو التعامل مع مشكلة انخفاض سرعة تقدم الحفر (ROP) أثناء عبور الطبقات الطينية في حقل عين أميناس، وبالخصوص في بئر HOUA-1. في البداية، كنا مهتمين بمساهمة سائل الحفر في هذه المشكلة من خلال دراسة الخصائص الكيميائية والفيزيولوجية والريولوجية لهذه الأخيرة، وتأثيرها على سرعة التقدم (ROP)، لهذا السبب نحن بدأنا من خلال نمذجة سرعة تقدم الحفر باستخدام الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) بناءً على العوامل الميكانيكية والهيدروليكية والريولوجية. في الخطوة الثانية، تعاملنا مع مشكلة انخفاض التقدم في سرعة الحفر. للإجابة على هذا السؤال، قمنا بتشخيص لتحديد الأسباب المسؤولة في ذلك، بعد التحليل، الجيولوجية، الطبقيّة، الخ... للمرحلة 16 " من البئر HOUA-1، كشفت دراستنا أن الطبقة تتكون أساساً من الطين. وأخيراً أدركنا أن الانخفاض في سرعة التقدم يرتبط ارتباطاً مباشراً بطبيعة السائل المستخدم وليس بالعوامل المطبقة، مما أدى بنا إلى اقتراح أنواع أخرى من السوائل، وخاصة السوائل المعدنية و السوائل الاصطناعية التي هي من جهة أكثر فعالية وربحية، ومن جهة أخرى أقل تلويثاً وتولد تأثيرات بيئية أقل، وذلك بفضل قابليتها للتحلل الحيوي وتقليل سمومها.

الكلمات المفتاح: سرعة تقدم الحفر، الطين، الشبكة العصبية الاصطناعية، سائل الحفر

Dédicaces

“ Je tiens à dédier ce modeste travail à mes très chers parents que dieu les protège de tous les maux, à mes frères et sœurs ainsi qu’à toute ma famille et amis ”

« Hamid. BELLACHE »

“ Je tiens à dédier ce modeste travail à la communauté scientifique. À mes très chers parents, ma sœur Lynda, mon frère Kocela pour tout ce qu’ils ont fait pour m’assurer de bonnes conditions de vie et d’étude. À D. Kechemir pour sa présence et motivation quotidienne (Lamba). Aux membres du club scientifique AFAK pour les belles choses que vous m’avez apprises. À mes amis pour les beaux moments que nous partageons toujours ”

« Aghiles. DJAFOUR »

“ Un hommage particulier à notre regrettable et défunt ami Ali. BOUASKER, que nous gardons toujours dans nos cœurs ”

Remerciements

Nous remercions dieu ALLAH le tout puissant et le miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre aimable enseignante Madame **Nadjet AZRIL**, pour avoir dirigé ce travail et également pour les encouragements qu'elle n'a cessé de nous prodiguer. Nous sommes heureux de pouvoir lui exprimer nos plus sincères remerciements.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury qui ont accepté d'être examinateurs de ce manuscrit. Nos sincères remerciements à tous nos enseignants qui nous ont accompagnés le long de notre cursus universitaire au sein de la faculté des hydrocarbures et de la chimie (Ex INH) université M'Hamed Bouguerra.

Nous avons eu beaucoup de plaisir à travailler avec **F. BOUGRINAT** et **H. DJELILI** ingénieurs de boue **BASP** en qui nous avons trouvé des réservoirs de connaissances scientifiques et culturelles. Nous vous remercions, pour vos qualités humaines et votre gentillesse.

Au terme de notre mémoire de fin d'études, nous tenons à adresser nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail, donc à tout le personnel des entreprises ; **ENAFOR**, **SONATRACH** et **BASP**.

Il aurait été impossible pour nous de mener ce travail sans la guidance éclairée de **Mohamed Riad** thésard à la faculté des hydrocarbures et de la chimie (Ex INH) il sut éveiller notre curiosité envers les ANN et nous poussa à aborder le sujet sous tous ses aspects.

Nos sincères remerciements à tous nos camarades **STH14**, particulièrement notre groupe **MAFP14**, avec qui nous avons partagé cinq formidables années d'amitié, d'entraide et de solidarité.

Nous ne saurons terminer sans remercier nos aimables parents, frères et sœurs pour leur soutien durant ces années.

Merci aux personnes qui viendront nous encourager et partager notre joie le jour de la soutenance.

**“C’est le devoir de l’homme de rendre au monde au moins
autant qu’il en a reçu”**

Albert. EINSTEIN

Table des matières

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Concepts et revues de littérature

1- Rôles du fluide de forage.....	2
2- Composition et type des fluides de forage.....	2
2.1- Les fluides à base d'eau WBM.....	3
2.2- Les fluides à base d'huile OBM.....	4
2.3- Les fluides de forage gazeux.....	4
3- Classification des fluides.....	4
3.1- Fluides newtoniens.....	5
3.2- Fluides non-newtoniens indépendants du temps.....	5
3.2.1- Fluides rhéofluidifiants.....	5
3.2.2- Fluides rhéoépaississants.....	5
3.2.3- Fluides plastiques (fluides à seuil de contrainte).....	6
3.3- Fluides non-newtoniens dépendants du temps.....	6
3.3.1- Fluides thixotropes.....	7
3.3.2- Fluides rhéopectiques.....	7
3.4- Fluides viscoélastiques.....	7
4- Interactions boue/formation	7
4.1- Argile et phénomène de gonflement.....	8
4.1.1- Les formations argileuses gonflantes.....	8
4.1.2- Phénomène de gonflement des argiles en cours de forage....	8
4.1.3- L'hydratation des argiles par l'eau.....	9
4.2- Contamination.....	10
4.2.1- Indications.....	10
4.2.2- Principaux contaminants.....	11
4.3- Les pertes de boue.....	11
4.3.1- Nature des pertes.....	12
4.3.2- Causes de pertes liées à la boue de forage.....	13
4.4- Filtration.....	15

Chapitre II : Etude du programme de boue de la phase 16'' cas du puits HOUA-1

1- Présentation du puits HOUA-1.....	15
1.1- Généralités.....	15
1.2- Localisation.....	15
1.3- Cadre géologique régional.....	16
2-Programme prévisionnel du puits HOUA1.....	17

2.1- Architecture et coupe lithologique du puits HOUA-1.....	17
2.2- BHA et programme des outils.....	18
2.3- Programme de boue.....	20
3- Etude technologique de la boue utilisée dans la phase 16''.....	21
3.1- Risques de forage et précautions à prendre pour la phase 16''.....	21
3.2- Formulation de la boue utilisée.....	22
3.3- Recommandations.....	23
3.4- Testes physiques et chimiques.....	23
3.4.1- Les caractéristiques physiques de la boue.....	23
3.4.2- Les caractéristiques chimiques de la boue.....	28
3.4.3- Résultats des tests.....	33
3.5- Simulation avec DFG (Drilling Fluids Graphics).....	34
3.5.1- Données nécessaires aux calculs (input).....	34
3.5.2- Simulation du modèle rhéologique.....	36
3.5.3- Simulation des pertes de charges.....	37
3.5.4- Simulation de l'efficacité de nettoyage.....	38

Chapitre III : Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

1- Synthèse bibliographiques.....	39
1.1- Taux d'avancement ROP.....	39
1.2- Réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Network).....	42
2- But du travail.....	43
3- Méthodologie du travail.....	43
4- Présentation des logiciels utilisés.....	44
4.1- IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) version 26.0.0.0.....	44
4.2- MATLAB 2015.....	45
4.3- Excel 2007.....	45
5- Traitement et analyse des données.....	45
5.1- Collecte des données.....	45
5.2- Influence de différents paramètres sur ROP.....	47
5.2.1- Facteur de corrélation R.....	47
5.2.2- Influence des paramètres mécaniques et hydrauliques sur ROP.....	47
5.2.3- Influence des paramètres rhéologiques sur ROP.....	48
6- Matrice de corrélation.....	49
6.1- Définition.....	49
6.2- Etablissement de la matrice de corrélation.....	50
6.3- Analyse et interprétation de la matrice de corrélation.....	50
7- Intelligence artificielle en forage.....	51
7.1- Définition.....	51
7.2- Réseau de neurones artificiels RNA.....	52
7.2.1- Définition.....	52
7.2.2- Architecture du réseau de neurones artificiels.....	52
7.2.3- Perceptron multicouche PMC.....	53

7.3- Nouvelle approche pour la prédiction du ROP.....	53
7.3.1- Construction du réseau de neurone.....	53
7.3.2- Développement du modèle mathématique du ROP.....	53
7.3.3- Fonction de transfert utilisée.....	54
7.3.4- Fonction de ROP normalisée.....	54
7.5- Elaboration d'un algorithme pour le modèle mathématique développé du ROP	55
7.5.1- Import des données et déclaration des entrées.....	55
7.5.2- Création du réseau de neurones.....	55
7.5.2.1- Choisir le nombre de couches cachées.....	55
7.5.2.2- Critère de convergence.....	56
7.5.2.3- Calage du modèle.....	56
7.5.2.4- Génération de la fonction ROP.....	56
7.6- Simulation du modèle mathématique.....	56
7.6.1- Apprentissage du simulateur.....	57
7.6.2- Performance de la simulation.....	57
7.7.3-Résultats de la simulation.....	58
7.7.4 Numérisation de la fonction ROP.....	58
7.8- Comparaison de ROP réel et ROP prédit pour le Puits HOUA-01.....	59
7.8.1- Analyse et interprétation.....	59
7.8.2- Discussion.....	60

Chapitre IV : Alternatives pour remédier au gonflement des argiles cas du puits HOUA-1

1- Etude et exposition du problème d'avancement du forage pour la phase 16''...	61
1.1-Introduction.....	61
1.2- Avancement de l'opération de forage.....	61
1.2-1- Tracé de la courbe de ROP pour le puits HOUA-1.....	61
1.2-2- Discussion.....	62
1.3- Identification du problème.....	62
1.3.1- Interprétation du masterlog	62
1.3.2- Interprétation de diagraphie Gamma-ray.....	63
1.3.3- Analyse des déblais des formations.....	64
1.3.4- Analyse géologique.....	64
1.3.5- Analyse stratigraphique.....	64
1.3.6- Analyse minéralogique.....	65
1.3.7- Forage de la formation argileuse.....	65
1.4- Conclusion	66
1.5- Recommandations pour intervention immédiate.....	66
2- Evaluation économique de la phase 16''	67
2.1- Temps non productif	67
2.2- Coûts journaliers	68
2.2.1- Coûts journaliers de la boue.....	68
2.2.2- Coûts journaliers totaux.....	69
2.2.3 – Discussion	69

2.3- Contribution de la boue dans le coût journalier total	69
2.4- Analyse du temps de réalisation de la phase 16''	70
3- Proposition de programmes de boue alternatifs	71
3.1- Boue à émulsion inverse (OBM).....	71
3.1.1-Propriétés	72
3.1.2-Utilisation.....	72
3.1.3-Avantages et inconvénients des boues à émulsion Eau/Huile	72
3.1.4-Elaboration du programme.....	73
3.1.4.1-Formulation et propriétés rhéologiques	73
3.1.4.2-Simulation avec le logiciel DFG.....	74
3.1.5- Estimation de ROP.....	77
3.2-boue à base d'huile basse toxicité	77
3.2.1- Boues à base d'huiles minérales améliorées (Enhanced Mineral Oil Based Fluids, EMOBF).....	78
3.2.2- Boue à base d'huiles synthétiques.....	78
3.2.2.1- Caractéristique des boues synthétiques.....	78
3.3- Evaluation économique	81
3.3-1- Estimation du ROP.....	81
3.3-2- Temps et coûts de réalisation de la phase 16'' cas du puits HOUA-1	82
3.3.3- Coûts de réalisation de la phase 16'' cas du puits HOUA-1..	84
Conclusion générale	86
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste des tableaux

Chapitre I

- Tableau .I.1- Liste d'additifs et leurs fonctions
Tableau .I.2- Degrés des pertes de circulation

Chapitre II

- Tableau.II.1- Architecture et stratigraphie du puit HOUA 1
Tableau.II.1- Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 26''
Tableau.II.3- Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 16''
Tableau.II.4- Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 12^{1/4}
Tableau.II.5- Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 8^{1/2}
Tableau.II.6- Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 6''
Tableau.II.7- Programme de boue
Tableau.II.8- Composition de la boue pour la phase 16''
Tableau.II.9- Propriétés de la boue 16''
Tableau.II.10- Les calculs des concentrations en ions à partir des résultats de Pf et Mf
Tableau.II.11- Resultats des testes
Tableau II.12- Cote des phases 26" et 16"
Tableau II.13- Caractéristiques des casings 185/8 et 13^{3/8}
Tableau II.14- BHA de la phase 16"
Tableau II.15- Diamètres des duses de l'outil 16"
Tableau II.16- Caractéristiques rhéologiques de la boue 16"
Tableau.II.17- Résultats de la simulation des pertes charges

Chapitre III

- Tableau III.1- Différents modèles du ROP
Tableau III.2- Paramètres mécaniques et hydrauliques
Tableau III.3- Paramètres rhéologiques
Tableau III.4- Facteurs de corrélation R avec le ROP
Tableau III.5- Matrice de corrélation des différents paramètres
Tableau.III.6- Analyse et interprétation de la matrice de corrélation
Tableau III.7- Intervalles des valeurs

Chapitre IV

- Tableau.IV.1- Coûts journaliers de la boue et totaux
Tableau IV.2- Charges engendrées par la boue
Tableau.IV.3- Composition de la boue OBM 16"
Tableau.IV.4- Caractéristiques rhéologiques de la boue OBM 16"
Tableau IV.5- Valeurs des pertes de charges
Tableau.IV.6- Formulation de la boue OBM

- Tableau.IV.7- Rhéologie de la boue OBM
- Tableau.IV.8.- Paramètres Optimaux
- Tableau.IV.9- Pertes de charges engendrées
- Tableau.IV.10- Chimie de base des SBM
- Tableau.IV.11- Coûts de service de boue
- Tableau.IV.12- Prix de chaque type de boue
- Tableau.IV.13- Coût engendré par chaque type de boue
- Tableau.IV.14- Coûts des boues KCL-Polymer, OBM et SBM en fonction de la durée de réalisation

Liste des figures

Chapitre I

- Fig.I.1- Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide Newtonien.
Fig.I.2- Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide pseudo-plastique (A droite) et d'un fluide dilatant (A gauche).
Fig.I.3- Rhéogramme d'un fluide plastique idéal (fluide de Bingham) et d'un fluide plastique fluidifiant.
Fig.I.4- Courbe rhéologique résultant fluide dépendant du temps
Fig.I.3- L'argil avant et après le gonflement
Fig.1.6- Le gonflement et l'hydratation des matériaux argileux
Fig.I.9- Carractéristique de la filtration

Chapitre II

- Fig.II.2- Itinéraire et localisation du puits HOUA
Fig.II.2- Densimètre
Fig.II.3- Viscosimètre Fann
Fig.II.4- Filtre presse API
Fig.II.5- Distillateur
Fig.II.6- Interface du logiciel DFG
Fig.II.7- Schéma du trou 16''
Fig.II.8- Rhéogrammes des modèles rhéologiques
Fig.II.9- Graphe du taux de nettoyage de la boue KCl Polymer

Chapitre III

- Fig.III.3- Etapes d'exécution de l'algorithme
Fig.III.4- Influence des paramètres mécaniques et hydrauliques sur ROP
Fig.III.5- Influence des paramètres rhéologiques sur ROP
Fig.III.6- Architecture du réseau de neurones artificiels
Fig.III.7- Fonctionnement d'un neurone
Fig.III.8- Fonction de transfert Log-sigmoid
Fig.III.9- Combinaison de neurones
Fig.III.10- Test d'apprentissage
Fig.III.11- Facteur de corrélation du test
Fig.III.12- Histogrammes de l'erreur
Fig.III.13- Meilleure performance de l'apprentissage
Fig.III.14- Résultats de la simulation
Fig.III.15- Comparaison entre ROP réel et prédit
Fig.III.16- Droite de la régression linéaire entre ROP réel et prédit

Chapitre IV

- Fig.IV.5. ROP du puits HOUA-1
Fig.IV.2. Master log de la phase 16''

- Fig.IV.3. Diagraphie GR de la phase 16"
- Fig.IV.4. Outil 16'' bourré
- Fig.IV.5. Argile raclée par la garniture de forage
- Fig.IV.6. Argile raclée par un stabilisateur
- Fig.IV.7. Temps non productif
- Fig.IV.8. Coûts journaliers de la boue
- Fig.IV.9. Coûts journaliers totaux
- Fig.IV.10. Contribution de la boue dans le coût journalier total
- Fig.IV.11. Pourcentage des coûts journaliers de la boue par rapport au coût total
- Fig.IV.12. Coûts journaliers totaux en fonction des NPT
- Fig.IV.13. Rhéogramme de la boue OBM 16"
- Fig.IV.14. Simulation du taux de nettoyage
- Fig.IV.15. Comparaison des ROP
- Fig.IV.16. Quelques caractéristiques des SBM
- Fig.IV.17. Comparaison des ROP
- Fig.IV.18. Coûts engendrés par chaque type de boue (KCl, OBM, SBM)

Nomenclature

AAPE :	Average absolute percentage error (%)
b:	bias
d:	Bit diameter (in)
d :	densité (kgf/cm ³)
FILTR:	filtrat de boue
FLW:	Flow (l/mn)
FV:	fann viscosité
GEL 10:	gel 10 minutes (lb/100 ft ²)
GEL 0:	gel 10 second (lb/100 ft ²)
HB-K:	constante du modèle Hershel Brukly
HB-N:	constante du modèle Hershel Brukly
h:	profondeur en mètre (m)
ID:	inside diameter
MD:	measurement depth
Mse:	mean square error
MT:	Marsh funnels time (s)
MW:	mud weight (sg)
OBM:	Oil based mud
OD:	outside diameter
P:	pression (psi)
Ph:	pouvoir d'hydrogène
PL-k:	constante du modèle power law
PL-n:	constante du modèle power law
PV:	viscosité plastique (cp)
Q:	Flow rate, (gpm)
R:	facteur de corrélation
ROP:	Rate of penetration, (m/h)
RPM:	Rotation per minute (Tr/mn)
SPP:	stand pipe pressure (Psi)
SBM:	Synthetic based mud
TRQ:	Torque (klb-ft)
TVD:	True vertical depth,(ft)
UCS:	Uniaxial compressive strength, (psi)
W:	weight
WOB:	weight on bit (T)
YP :	yeild point(lb/100ft ²)

Lettres grecques

Θ:	lecture
μ	viscosité
τ:	contrainte
γ_p:	yield value

Introduction générale

Le forage des formations argileuses dans les puits d'hydrocarbures engendre dans la majorité des cas des problèmes très considérables, qui se manifestent par une chute considérable de la vitesse d'avancement (ROP), provoquant le coincement de la garniture dans le puits, ce qui complique d'avantage l'opération de forage, et implique le recours aux méthodes de décoincement qui le plus souvent prennent un temps très élevé, et ne garantissent pas toujours leurs réussites, car dans de nombreux cas on est amené à abandonner le puits et opter pour d'autre forage. Toutes ces contraintes engendrent aux compagnies pétrolières des complications techniques et logistiques importantes qui se traduisent par des coûts astronomiques par puits foré.

En effet, les formations argileuses dénommées aussi 'hydratable shales', se caractérisent par une capacité importante de gonflement. Ce dernier se manifeste par l'hydratation de ces formations provoquée par le fluide de forage due à sa filtration à travers les parois du puits. Ces argiles provoquent une forte augmentation de la viscosité de la boue, le bouchage des tamis et causent des problèmes de bourrage des outils, ainsi que les risques de coincement de la garniture.

En Algérie elles sont rencontrées à partir du Crétacé, notamment dans la région de In-Amenas, c'est le cas de notre puits d'étude HOUA-1, où nous avons constaté une chute importante de la vitesse d'avancement qui atteignait 0.66 m/h (Côte 730 m), cette chute est remarquable à partir de la côte 300 m (Touartine supérieure), ce puits n'est pas un cas isolé car plusieurs puits avoisinant ont dû être déviés par sid-track en raison de l'ampleur du coincement causé par ce phénomène. Dans notre travail nous allons identifier les raisons de cette chute de vitesse d'avancement en s'appuyant sur les données recueillies sur le terrain ; diagraphies, analyses géologique minéralogique, stratigraphiques, comme nous allons évaluer les coûts engendrés par ce problème.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'objectif de ce travail, qui consiste à décrire l'influence de la boue de forage, notamment la boue à base d'eau dans ce phénomène de gonflement des argiles. Nous allons commencer par l'établissement d'un modèle numérique prédictif du ROP en fonction des paramètres de forage et des paramètres hydrauliques et rhéologiques de la boue, par l'emploi de la méthode de réseaux de neurones artificiels (Artificial neuronal network ANN), et les statistiques multivariées.

Enfin, nous allons proposer des programmes alternatifs que nous jugeons adéquats pour remédier au problème sus-cité, nous allons exposer des boues de nouvelle génération, notamment les boues à base d'huiles minérale paraffinées et les fluides synthétiques à base d'ester, d'éther et d'oléfines, qui sont plus adéquates au forage des formations argileuses.

Pour atteindre ces buts, notre travail se structure comme suit : dans le premier chapitre, nous présenterons les concepts et revues de littérature, le deuxième chapitre est consacré à l'étude du programme de boue de la phase 16'' cas du puits HOUA-1. Dans le chapitre trois, une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle a été développée pour la prédiction du ROP de la phase 16', enfin le quatrième et dernier chapitre, traite les alternatives proposées pour remédier au problème de gonflement des argiles, cas du puits HOUA-1 et ensuite, nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

Chapitre I

Concepts et revues de littérature

Dans ce travail de recherche, la boue de forage a été un de nos principaux objets d'étude. Pour cela, il nous a semblé intéressant de présenter en premier lieu son rôle au cours du forage, sa composition et son comportement rhéologique, ainsi que les phénomènes régissant ses interactions avec les formations traversées.

1- Rôles du fluide de forage

En général, les principaux rôles du fluide de forage [MILPARK, CKS 1990] sont :

- Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu'à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire, ces déblais donnent des informations géologiques sur les formations traversées lors du forage.
- Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide.
- Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées. Du fait de cette différence de pression, le fluide va "filtrer" dans les formations perméables et déposer un film sur la paroi appelé "cake de filtration". Ce film permet de réduire la perméabilité des parois et d'isoler le fluide de forage de la formation mais ne doit pas être épais afin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil. Le fluide de forage joue donc un rôle déterminant dans la résolution du problème de stabilité des parois du puits de par sa densité mais également de par sa capacité à former une barrière limitant les transferts de fluides entre l'espace annulaire et la formation.
- Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie.

2- Composition et type des fluides de forage

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue " vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés.

Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile. Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires [BAROID, 2012].

Les boues doivent par exemple être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont

donc ajoutées à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Le tableau suivant donne un classement grossier de ces composants :

Tableau I.1. Liste d'additifs et leurs fonctions

Additif	Exemple d'additif utilisé
Inhibiteurs de gonflement des argiles	Glycol
Viscosifiant	Bentonite, Attapulgite
Alourdissant	Barytine, Carbonate de Calcium
Réducteurs de filtrat	Amidon, CMC, PAC
Fluidifiant	Lignosulfonate
Contrôleurs d'alcalinité	Soude Caustique
Anti-mousses	Strate d'Alumine
Saumure	Sel
Emulsifiants	Tension Actif
Huile minérale ou organique	Pétrole brute, Gazole

2.1- Les fluides à base d'eau WBM

Les fluides à base d'eau sont des fluides dont la phase continue est l'eau. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation (activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines).

2.2- Les fluides à base d'huile OBM

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur

l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazole.

2.3- Les fluides de forage gazeux

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard :

- Forage à l'air.
- Forage à la mousse.
- Forage à la boue aérée.

3- Classification des fluides

L'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la vitesse de déformation à pression et température constantes, dans un fluide, est représentée mathématiquement par une relation qui la forme [Gareche. M, 2013] :

$$\tau = f(\gamma.\dot{\gamma}.t) \dot{\gamma} \quad (I.1)$$

Où f est une fonction qui peut dépendre de la déformation γ , de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et du temps t .

La classification des fluides consiste donc, à regrouper dans la même classe toutes les substances représentées par une fonction f qui manifeste la même dépendance des paramètres γ , $\dot{\gamma}$ et t .

3.1- Fluides newtoniens

Pour ces fluides, la contrainte de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de déformation (Figure. I.1). La fonction f est une constante qui coïncide avec la viscosité dynamique μ .

$$f(\gamma.\dot{\gamma}.t) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{Cte} = \mu \quad (I.2)$$

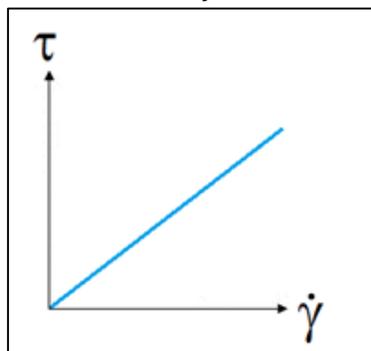


Fig [I.1]. Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide Newtonien.

3.2- Fluides non-newtoniens indépendants du temps

Pour cette classe de fluides, f est une fonction qui dépend uniquement de la vitesse de déformation. L'équation rhéologique se résume donc à la relation:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (I.3)$$

Où $f(\dot{\gamma})$ est appelée « viscosité apparente par analogie avec la viscosité dynamique des fluides newtoniens. L'évolution de cette dernière en fonction de la vitesse de déformation présente une allure universelle.

Les fluides non-newtoniens indépendants du temps sont subdivisés en trois groupes, qui se caractérisent par des comportements rhéologiques distincts.

3.2.1- Fluides rhéofluidifiants

Appelés également pseudo-plastiques, ces fluides sont caractérisés par la diminution de leurs viscosités apparentes avec l'accroissement de la vitesse de déformation (courbe gauche de la Figure. I.2). Ce comportement est très répandu et on peut citer en guise d'exemples: les polymères à longues chaînes en solution ou à l'état fondu, les colles, les pâtes à papier, les ciments

3.2.2- Fluides rhéoépaississants

Beaucoup moins fréquent, ces fluides sont caractérisés par une viscosité apparente qui décroît avec l'accroissement de la vitesse de déformation (courbe droite de la Figure I.2) tel est le cas des solutions d'amidon, des sables mouillés et compactés, et certaines huiles polymériques.

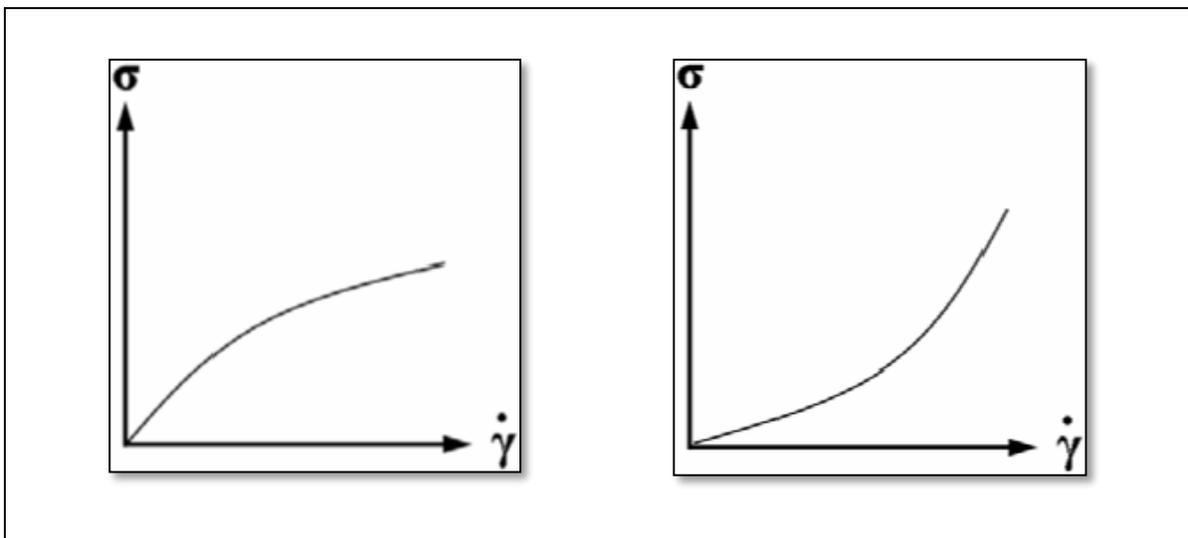
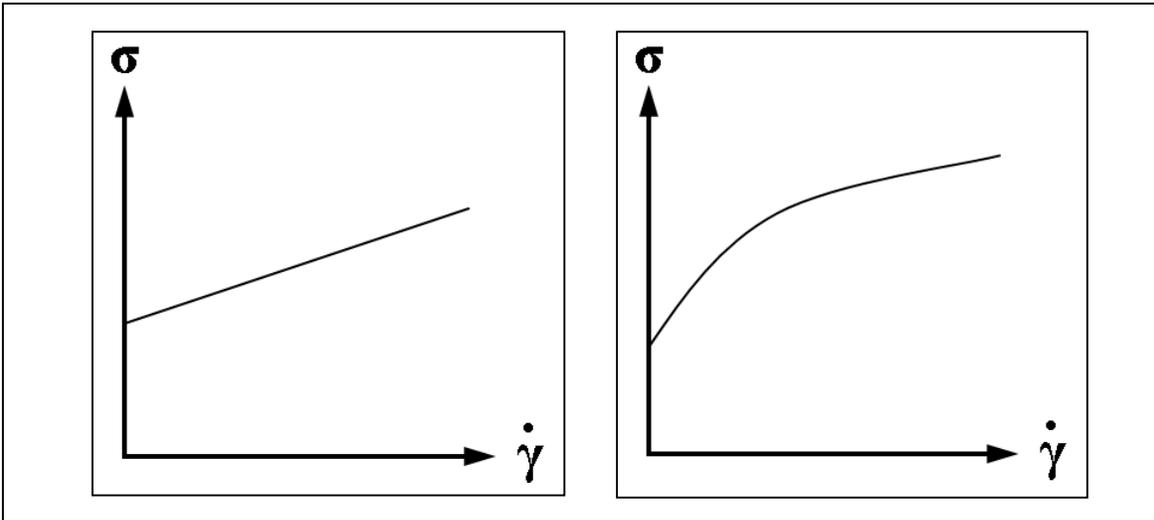


Fig I.2. Rhéogramme et courbe de viscosité dynamique d'un fluide pseudo- plastique (A droite) et d'un fluide dilatant (A gauche).

3.2.3- Fluides plastiques (fluides à seuil de contrainte)

Ce sont des fluides qui ne s'écoulent que lorsque les contraintes qui leur sont appliquées dépassent une certaine valeur dite contrainte seuil (τ_c). Au-delà de cette valeur l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective ($\tau - \tau_c$) (Figure I.3).



FigI.3. Rhéogramme d'un fluide plastique idéal (fluide de Bingham) et d'un fluide plastique fluidifiant.

Lors de l'écoulement, les fluides peuvent manifester un comportement newtonien (fluide de Bingham) ou l'un des comportements suscités. Mais il est plus fréquent de rencontrer des fluides plastiques fluidifiants tels que les boues, la pâte dentifrice, le sulfate de Zinc ou de Baryum en suspension, la pâte à pain, les matières grasses...

3.3- Fluides non-newtoniens dépendants du temps

En raison de la modification non-instantanée de la structure microscopique de ces fluides, leurs comportements rhéologiques dépendent du temps en plus des taux de cisaillements. Leurs équations rhéologiques se mettent alors sous la forme:

$$\tau = f(\dot{\gamma}, t) \dot{\gamma} \quad (I.4)$$

Ces fluides se comportent comme si les contraintes subies dans un passé relativement récent modifiaient leurs comportements à l'écoulement présent. Les rhéogrammes résultants de l'application d'une vitesse de déformation qui croît et décroît régulièrement (charge- décharge) sur ces derniers, présentent des cycles d'hystérésis (Figure I.4).

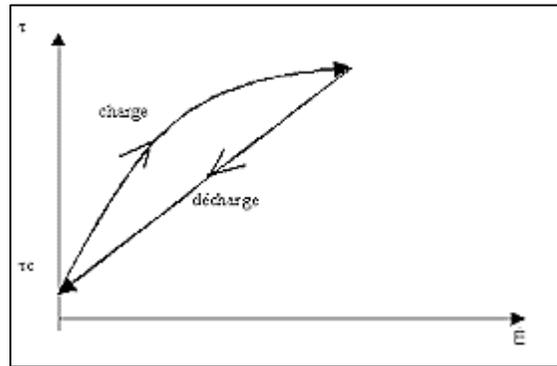


Fig.I.4. Courbe rhéologique résultant fluide dépendant du temps

On distingue pour les fluides non-newtoniens dépendants du temps deux types de fluides qui ont un comportement distinct:

3.3.1- Fluides thixotropes

Un fluide est thixotrope si sa viscosité apparente diminue en fonction du temps lorsqu'il est soumis à un taux de cisaillement constant. Ce comportement doit être réversible.

3.3.2- Fluides rhéopectiques

Un fluide est dit rhéopectiques s'il manifeste un comportement inverse que celui d'un fluide thixotrope.

3.4- Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques manifestent sous l'effet d'une contrainte, un comportement qui dépend à la fois de la déformation, du taux de cisaillement et du temps. Leurs équations rhéologiques sont de la forme:

$$\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}, t) \dot{\gamma} \quad (I.5)$$

Ces fluides possèdent simultanément des propriétés visqueuses et élastiques. Car soumis à un test de fluage (contrainte de cisaillement constante), ces fluides se déforment en trois temps successifs :

- déformation instantané qui résulte de l'élasticité du fluide.
- déformation élastique amortie par la viscosité.
- déformation linéaire purement visqueuse.

4- Interactions boue/formation

L'utilisation du fluide de forage dans un puit provoque systématiquement des interactions entre ce fluide et les formations du puits, que ce soit des interactions contrôlées et

bénéfiques tels que le maintien des parois, le maintien des fluides de formations en exerçant une pression hydrostatique supérieure à ce dernier, ou bien des interactions incontrôlées qui perturbent ainsi la continuité du forage, dans cette partie nous allons exposer les principaux phénomènes qui existent entre la boue de forage et les couches traversées

4.1- Argile et phénomène de gonflement

Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre. Le terme d'argile peut désigner soit le minéral argileux lui-même, soit une roche composée pour l'essentiel de ces minéraux argileux. Les minéraux argileux sont des phyllo-silicates hydratés, se présentant en très petits cristaux. Les argiles se présentent sous deux structures :

- Unité structurale tétraédrique.
- Unité structurale octaédrique.

4.1.1- Les formations argileuses gonflantes

Dénommées 'hydratable shales', 'swelling shales', ou 'heaving shales' : Ces argiles sont caractérisées par une capacité importante de gonflement qui va au cours du forage s'ajouter à celle des minéraux argileux intentionnellement ajoutés à la boue afin de lui conférer un certain nombre de propriétés. Ces argiles gonflantes provoquent une forte augmentation de la viscosité de la boue et le bouchage des tamis vibrants. Les argiles gonflantes sont généralement rencontrées à des profondeurs relativement faibles. Du point de vue minéralogique, elles sont caractérisées par une forte teneur de 20 à 40% en montmorillonite (minéraux gonflants) avec une teneur en élève allant jusqu'à 40%, et de 20 à 30% en illite (minéraux dispersibles). Pour ces argiles qui causent les problèmes de bourrage des outils, la formation de bouchons dans l'annulaire ainsi que les risques de perte et de coincement de la garniture, les boues à l'huile et au KCl apportent une amélioration notable. Différentes classes ont été proposées dans la littérature, avec une minéralogie basée principalement sur les teneurs respectives en montmorillonite et en illite [**Low Anderson, 1958**].

Ces argiles gonflantes sont rencontrées en Algérie à partir du Néocomien et le plus souvent associées à la présence de sable, sel et dolomite.

4.1.2- Phénomène de gonflement des argiles en cours de forage

Le gonflement des argiles a fait l'objet de très nombreuses études qui font apparaître des domaines d'intérêt particuliers, parmi les principales préoccupations des chercheurs dans l'étude des sols expansifs, c'est de comprendre et de déterminer les facteurs responsables de ce phénomène [**Hayes et Kennedy, 1903**].

Le gonflement représente l'extension des doubles couches entourant les particules argileuses. Les principaux facteurs régissant le gonflement des argiles peuvent être classés en deux

catégories, les facteurs mécaniques et les facteurs physico-chimiques [CAILLERE S. Henin S. 1982].

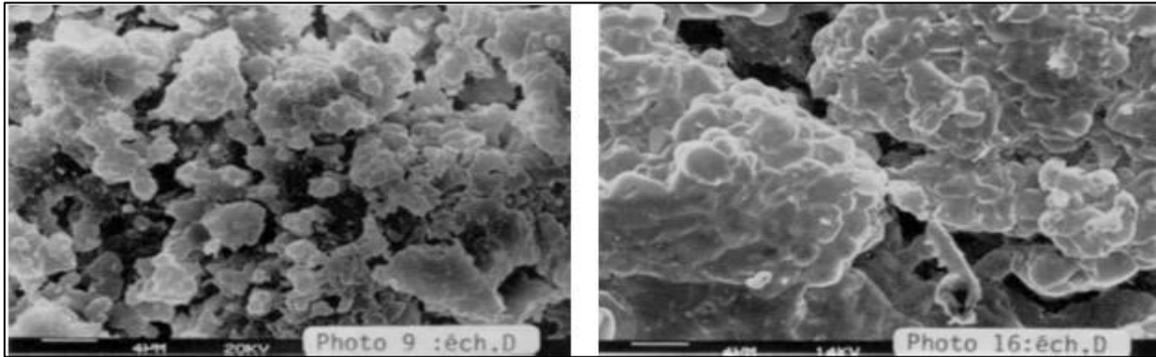


Fig. I.5. L'argil avant et après le gonflement

Le problème posé par le gonflement des argiles lors du forage dans les formations argileuses semble étroitement lié aux phénomènes d'interactions argile -fluide de forage. L'instabilité des formations argileuses varie selon la nature (eau, autre solvant) et l'état physique de ces fluides, Lors du contact argile-eau. Malgré de nombreuses études fondamentales sur l'hydratation des argiles, il reste encore beaucoup à comprendre sur les mécanismes qui en sont à l'origine.

Un fluide de forage idéal donnant une bonne stabilité est obtenu :

- En évitant l'augmentation de la pression de pore due à l'altération du fluide.
- En réduisant l'effet osmotique causé par l'ajout de sel au fluide.
- En utilisant des fluides émulsionnés inverses (Muniz et al, 2004).

Les phénomènes physico-chimio-mécaniques liés à la stabilité des argiles ont été longuement débattus dans la littérature pétrolière, particulièrement sur la capacité des systèmes de type polymère/électrolyte à inhiber l'hydratation et le gonflement des argiles.

En préalable, il est nécessaire d'introduire quelques définitions utilisées par les pétroliers des différents types d'argiles avant une brève synthèse des principaux travaux traitant les problèmes soulevés par les foreurs au sujet des formations argileuses rencontrées au cours du forage

4.1.3- L'hydratation des argiles par l'eau

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes

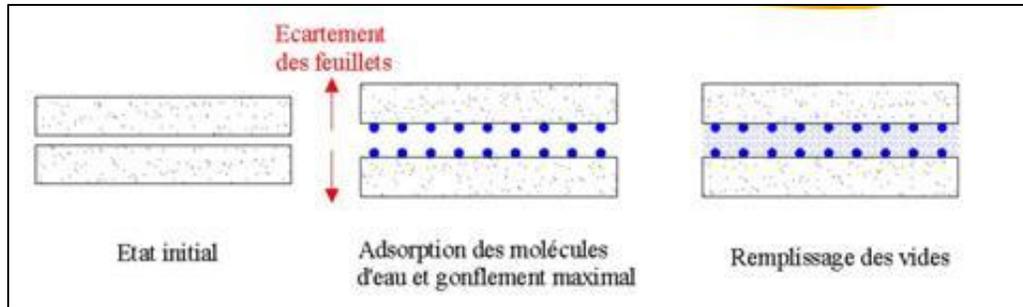


Fig.1.6. Le gonflement et l'hydratation des matériaux argileux

Selon la force des liens unissant les feuillets d'argiles, ceux-ci autorisent ou non l'arrivée d'eau dans l'espace inter foliaire. Chez certaines argiles (kaolinites, illites) l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Ces argiles sont faiblement gonflantes. En revanche, dans les smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace inter feuillet peut s'hydrater ; les smectites font partie des argiles dites « gonflantes ». L'amplitude du gonflement dépend de l'état initial, bien sûr, et des contraintes appliquées, néanmoins la prise d'eau peut être telle que le matériau voit son volume multiplié par vingt.

Le deuxième fait essentiel du gonflement est que l'interaction eau-argile est liée aux ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement, ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cations dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets [Hayes et Kennedy, 1903].

4.2- Contamination

Un contaminant est défini comme tout élément indésirable, composant qui provoque un effet néfaste lorsqu'il est incorporé dans un fluide de forage. Toutes substances à la fois indésirables et nuisibles peuvent être classées en tant que contaminant. La principale source de contamination est la formation exposée; c'est-à-dire des solides, gaz ou eau. La source de contamination secondaire est les matériaux ajoutés à la surface, ciment et spacer, ajouts accidentels d'eau ou d'huile de base et traitement excessif avec des produits fluides.

En récapitulatif on peut classer les contaminants par leur nature de la manière suivante :

- Contaminants physiques.
- Contaminants chimiques ou physico-chimiques.
- Problèmes de formation.

4.2.1- Indications

La principale indication de contamination est une instabilité générale des propriétés du fluide de forage. Cette instabilité peut se manifester par une difficulté en contrôlant:

- Perte de (fluide losses).
- Alcalinité.

- Rhéologie.
- MBT.

La contamination peut être à la fois spécifique et générale. Les contaminants peuvent avoir un effet de "masquage" les uns sur les autres.

Le fluide de forage est contaminé par solides forés dès le début du forage. Tous les solides n'affectent pas le système de fluides de forage au même degré ou de la même manière. Les solides dérivés des schistes représentent le plus haut potentiel pour causer des problèmes.

4.2.2- Principaux contaminants

- Solides forés
 - Solides actifs - fraction d'argile de schistes
 - Solides inactifs - Sables, calcaire, etc.
- Sels d'évaporite:
 - chlorure de sodium, NaCl.
 - Chlorure de potassium KCl.
 - Chlorure de Calcium CaCl.
 - Chlorure de magnésium, MgCl.
- Anhydrites, CaSO₄.
- Gaz acides.
 - Dioxyde de carbone, CO₂.
 - Sulfure d'hydrogène, H₂S.
- Les hydrocarbures.
- Huiles légères ou lourdes.
- Dégradation thermique des produits de boue.

On peut ajouter à cela les Contaminants introduits à la surface (Accidentelle et intentionnelle), ainsi que la contamination engendré durant la cimentation, que ce soit durant le travail préliminaire ou durant le pompage du laitier.

4.3 - Les pertes de boue

La perte de circulation est la situation dans laquelle le fluide de forage pénètre dans les différentes formations géologiques traversées par un forage plutôt que de remonter à travers l'espace annulaire à la surface. Elle est la conséquence logique des déséquilibres de pression, existants ou créés, entre le milieu traversé et le fluide utilisé en forage [AVA Handbook, 2013].

On distingue deux types de pertes :

- **Pertes partielles**

Une perte est dite partielle si la circulation se maintient même à une très faible valeur, le trou restant rempli, il y a donc une diminution de retour de boue.

Les pertes sont importantes lorsque : $Q_{perte} > 5m^3 / h$. Au-dessous de $1.5 m^3/h$, les pertes sont considérées de type filtration.

- **Pertes totales :**

Une perte est dite totale si la circulation ne se maintient plus. Le puits se vide alors jusqu'à une cote telle que la pression hydrostatique exercée par la colonne restante dans le puits est équilibrée par la pression propre de découvert.

Tableau.I.2. Degrés des pertes de circulation.

Types de pertes	Degré
Par filtration (faible)	<1.5 m3/h (10bb l/h)
Partielle (moyenne)	1.5à75 m3/h (10à500 bbl/h)
Totale (sévère)	Totale (impossible de garder le puits plein)

4.3.1- Nature des pertes

- **Perte naturelle**

La boue de forage peut s'écouler naturellement dans les vides de la roche, pores, fissures ou fractures, lorsque $P_{boue} > P_{couche}$.

Les pertes de circulation naturelles se rencontrent dans :

- ✓ Les formations très mal consolidées (sable, gravier, etc.....) ;
- ✓ Les formations à perméabilité excessive : présence des vacuoles dues à la dissolution et lessivage d'une partie de la roche ;
- ✓ Les formations naturellement fissurées ou cavernueuses ;
- ✓ Les formations micro perméables récentes et non cimentées telles que l'élite de graviers de sables très grossiers ;
- ✓ Les zones faillées, broyées, au sein desquelles les mouvements tectoniques ont développé des ressauts de fissures sub-verticales qui sont restées ouvertes.

- **Pertes par craquage**

Elles se produisent dans les vides créés, fissures ou fractures, lorsque la pression exercée par la boue est supérieure à la pression de fracturation de la roche :

- ✓ soit à peu près systématiquement dans n'importe quel type de formation chaque fois que la formation contient des grès, sables, sables argileux ou argiles sableuses ;

- ✓ Soit au niveau du plan de moindre corrosion tel que : surface de contact plan de schistosité.

- **Perte par filtration**

Dans la mesure de prévenir contre la pénétration des fluides de formation dans le puits durant le forage (OBD : Over Balanced Drilling), la pression hydrostatique de la colonne de boue doit être supérieure à celle de la formation. Cette différence de pression entraînera l'invasion des pores des couches poreuses et perméables. La filtration est le mécanisme selon lequel la phase liquide du fluide de forage passe dans la formation, c'est le filtrat. Les particules solides se déposeront sur la paroi du trou en formant un film argileux imperméable, c'est le mud-cake. Ce gâteau de boue empêchera ultérieurement l'invasion de la formation par le fluide de forage. Les boues sont traitées afin de réduire au maximum le filtrat : c'est l'ajout de produits réducteurs du filtrat.

4.3.2- Causes de pertes liées à la boue de forage

Le forage de réservoir est toujours accompagné par une circulation de boue dans l'ordre des raisons reconnues. Cependant, les particules fines et le filtrat de boue pouvant envahir et endommager les zones environnantes.

Pratiquement on utilise des boues types à base d'huile, à base d'eau ou émulsionnée (eau/huile). Usuellement, des fines particules sont à additionner comme agents alourdissant.

a. Pression au sein de la boue trop élevée :

Comme les venues, les pertes de circulation sont la conséquence logique et directe d'un déséquilibre de pression existant ou créé, momentané ou permanent, entre le milieu traversé et les fluides utilisés en forage. Ceci peut être d'une, soit d'une densité trop élevée, soit d'une pression de refoulement (débit, caractéristique rhéologique) trop élevée.

Donc la raison principale des pertes de circulation est que la pression dans le puits dépasse la pression de couche compte tenu de la résistance de milieu poreux au mouvement du fluide dans la couche.

b. Mauvais traitement en surface :

L'augmentation de la densité de la boue en circulation due à un mauvais traitement en surface (mécanique ou chimique).

c. Cause liée aux caractéristiques rhéologiques :

La viscosité plastique et la yield value trop fortes entraînant à grande profondeur des pertes de charge élevées dans l'annulaire.

d. Cause liée à la thixotropie :

Une reprise de circulation ou une manœuvre trop rapide avec une boue à gel élevé provoque une surpression importante au fond. Il faut noter qu'à faible profondeur et dans le cas des pertes par infiltration dans les terrains à perméabilité moyenne, le maintien d'une thixotrope élevée permet souvent l'arrêt des pertes. En effet, d'une part il y a colmatage des terrains en profondeur

par la gelée et d'autre part, les pertes de charge dans l'annulaire sont négligeables pendant les premiers centaines de mètres forés en gros diamètre.

4.4 -Filtration

Parmi les fonctions du fluide de forage on a le colmatage des formations fracturées et le control de filtration (perte de boue).

Les potentiels problèmes liés a la filtration excessive sont ; un cake épais englobant les coincements de la garniture, rétrécissement du diamètre du puits, augmentation du torque, perte de circulation et l'endommagement de la formation.

Une filtration et cake adéquats sont nécessaires pour éviter les problèmes de forage et de production [Al-Riyamy, 2004]

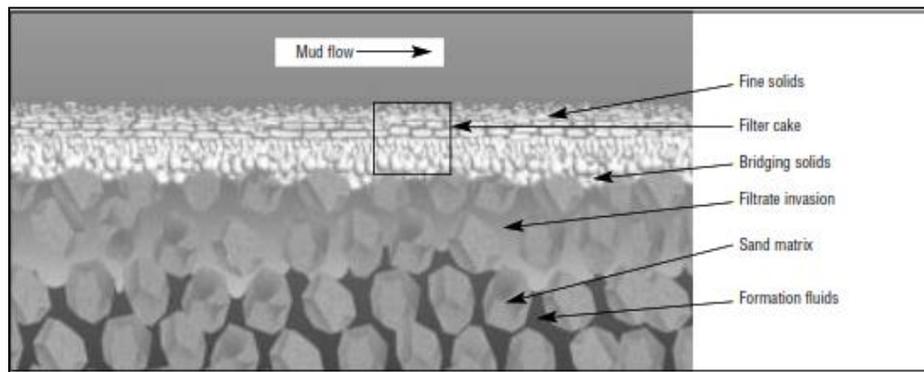


Fig.I.9. caractéristique de la filtration

Potentiels problèmes liés au cake épais

- Des points serrés dans le puits qui cause des tractions élevées.
- Risque de pistonnage vers le haut et vers le bas à cause de la présence des particules solides et du mauvais nettoyage dans l'espace annulaire.
- Coincement par pression différentielle à cause du taux de filtration élevé.
- Cimentation défectueuse due au mauvais déplacement du cake.
- Difficulté de poser le tubage correctement.

Potentiels problèmes liés à la filtration excessive

- Endommagement de la formation et du réservoir (skin) du au filtrat de la boue, ce qui nécessite une fracturation ou acidification.
- Echantillon des fluides de formation invalide, car les tests de débit peuvent donner des résultats pour le filtrat aux lieux les fluides de réservoir.
- Une filtration exagérée rend les mesures de diagraphie difficile, et fausser les résultats car les instruments mesurent les propriétés de filtrat de boue au lieu des fluides de réservoir.
- Les zones à huile et à gaz peuvent être difficilement repérées car le filtrat de boue pousse l'effluent de la paroi du puits, ce qui rend leur détection difficile.

Chapitre II

Etude du programme de boue de la phase 16'' cas du puits HOUA-1

1- Présentation du puits HOUA-1

1.1-Généralités

L'objectif principal du puit Houassine-1 (HOUA-1) est d'explorer les réservoirs Dévoniens, Silurien et Cambro-Ordovicien, il est implanté au sommet d'une structure anticlinale, mise en évidence par l'interprétation sismique du merge KAR-TMN-3D. Cette structure présente un axe de direction nord-ouest/sud-est et se trouve à 05 km au nord de la découverte OELE (Ouine Eslak) de laquelle elle est séparée par une faille. L'objectif principal du puits HOUA-1 est d'explorer le réservoir unité IV de l'Ordovicien ayant produit sous duse 32"64 : 1583 m³/h de gaz à DZO-1 (après fracturation hydraulique en 2015) et 2984 m³/h de gaz à OELE-1. Les réservoirs du Siluro-dévonien F6 et du Dévonien (F2 et F3) sont considérés pour ce puits comme objectifs secondaires. La profondeur finale du forage HOUA-1 est prévue à 3460 m ; soit 24 m dans le socle. Le nom du puits HOUA-1 est donné en hommage à « Salah Houssine », cadre ingénieur forage, décédé en 2017 et qui avait subi un accident de travail le 23 septembre 1991, pendant le forage du puits de développement TFT-258.

1.2-Localisation

Le puits d'exploration HOUA-1 est situé dans le bloc 239e du périmètre de recherche Ohanet II (Fig.01 et Fig.02) à 6.7 km au sud-ouest du puits DZO-1, à 5.1 km au nord du puits OELE-1 et à 4.7 Km au sud du puits TMNE-1. Il est implanté au croisement de l'inline 1314 avec la crossline 652 du merge KARTMN-3D.

Les Altitudes et coordonnées d'implantation du puits HOUA-1 Sont les suivantes :

UTM 32°

- **X** : 538 792 m
- **Y** : 3 174 956 m
- **Z_s** = 666.19 m **Z_t** = 674 m
- Système de projection : Clarke 1880.

Géographiques

- Longitude : 9° 23' 49.6817" E
- Latitude : 28° 42' 12.8067" N

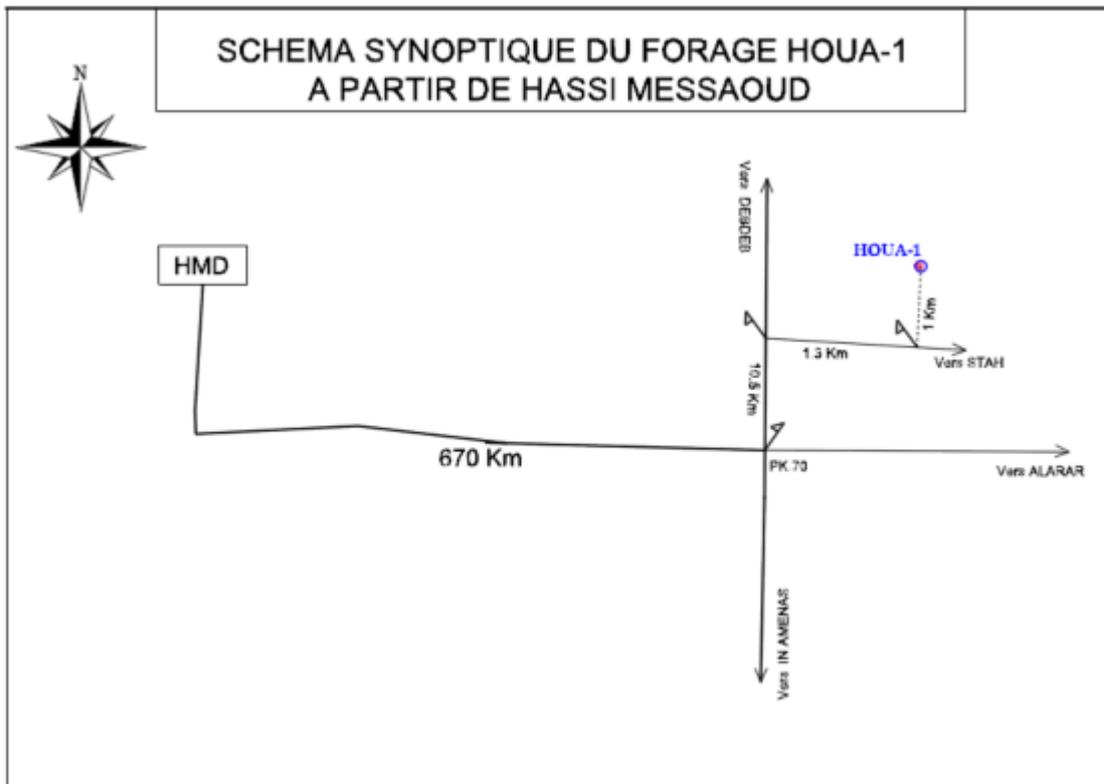


Fig.II.1. Itinéraire et localisation du puits HOUA

1.3-Cadre géologique régional

La structure Houassine est située au centre du périmètre de recherche Ohanet II, et au nord-est du bassin d'Illizi. Différentes phases tectoniques ont affecté le bassin et particulièrement la phase hercynienne qui est à l'origine de la présence des nombreuses structures anticlinales (In Adaoui-Ohanet ; Acheb- Kreb ; Askarene –Timedratine ; Guelta Tamadanet ; etc.) toutes orientées NW-SE. Ces phases, n'ont pas été sans conséquence sur les nombreuses formations ; notamment sur le non- dépôt du Cambrien sur le Môle d'Ahara et celui de la Tihemboka, le non-dépôt du Dévonien F3 à l'ouest et au sud du périmètre de recherche Ohanet II. Par ailleurs, des variations lithologiques sont observées dans les formations dévoniennes, au niveau du périmètre. Elles sont dues aux mouvements tectoniques durant les phases hercayniennes (précoce et tardive). Les mouvements anté-Llanvirn (Arénigiens) sont à l'origine de la répartition des unités ordoviciennes III-1, III-2 et III-3. L'unité III-3 repose parfois en discordance sur l'unité II, sur le socle et quelquefois sur l'unité III-1.

2-Programme prévisionnel du puits HOUA1

2.1- Architecture et coupe lithologique du puits HOUA-1

Le tableau suivant représente l'architecture et la lithologie prévisionnelle du puits

Tableau.II.1. Architecture et stratigraphie du puit HOUA 1

Géologie		Program			Architecture	Mud				
AGE	Age	PROF IZt	PROF Cotes AB	EPAIS			STRAT	Lithologie	Core	DST
Crétacé	Sénonien	0	666	45		Calcaire a dolomie calcaire.Présence de gypse	230m	18 5/8" - 87,5# - K55- BTC	26" OH x 18,58" casing	
	Turonien	53	621	63		Calcaire, dolomie, marne. Trace de gypse				
	Cénomanién	116	558	85		Argile, gypse. Trace de dolomie				
	Série d'In Akamil	201	473	75		Argile rouge a passées de dolomie calcaire et gypse blanc				
	Taouratine Sup.	276	398	52		Sable blanc, rosâtre, argile rougeâtre				
Taouratine Moy.	328	346	36		Sable, argile.Présence de dolomie calcaire	1030m		600m of 13 3/8" - 54,5# - K55- BTC and 430m of 13 3/8" - 68# - N80- BTC	16" OH x 13 3/8" casing	
Taouratine Inf.	364	310	172		Grès blanc, fin à moyen, argile brun rouge beige					
Zarzaïtine Sup	536	138	209		Intercalation d'Argile, sable et grès.					
Zarzaïtine Moy.	745	-71	115		Argile versicolore, avec fines passées de grès	2365m		9 5/8" - 47# - P110 -BTC	12 1/4" OH x 9 5/8" casing	
Trias	Zarzaïtine Inf.	860	-186	146						Argile brun rouge avec intercalations de Grès et d'Anhydrite
Carbonifère	Tiguentourine	1006	-332	113			Argile brun rouge, dolomitique, fines passées de marne calcaireuse.			
	Westphalien F	1119	-445	197			Alternance d'Argile brun rouge et calcaire dolomitique beige			
	Westphalien-Namurien E	1316	-642	168			Argile, marne, calcaire et anhydrite			
	Namurien D	1484	-810	154			Alternance de grès et argile. Présence de calcaire			
	Viséen C	1638	-964	228			Argile gris noir, grès blanc, rares passées de calcaire blanc beige. Trace de pyrite			
Viséen B	1866	-1192	237		Alternances grès blanc, fin à moyen, et d'argile gris noir					
Tournaisien A	2103	-1429	272		Argile gris noir, silteuse avec passées grès très fin à fin	7" - 32# - P110 - NVAM	8 1/2" OH x 7" casing			
Dévotien	Strunien Réservoir F2	2375	-1701	42				Grès gris, très fin à fin, argile gris noir		
	Argiles Frasniennees	2417	-1743	204				Argile gris noir, indurée, silteuse, micacée, pyriteuse		
	F3	2621	-1947	27				Grès blanc, fin à très fin, sable, argile fin à moyen, passées d'argile		
	Argiles F3	2648	-1974	4				Argiles gris foncé, indurée, silteuse, fines passées de grès		
	Emsien Réservoir F4	2652	-1978	31				Grès fin à très fin, passées d'argile		
Argiles F4	2683	-2009	19		Argiles gris foncé, indurée, silteuse, micacée. Traces de pyrite	9m	DST (TCP)			
Silurien	Unité C	2702	-2028	12				Grès très fin à fin avec passées argile		
	Unité B	2714	-2040	5				Grès gris blanc, ferrugineux, fines passées d'argile		
	Unité A	2719	-2045	36				Intercalation de silte et Grès, avec fines passées d'argile		
	Unité M2	2755	-2081	32				Grès fin à moyen, intercalés d'argile		
	Unité M1	2787	-2113	89		Grès fin à moyen, passées d'argile grise. Traces de grains de quartz				
Silurien Argileux	2876	-2202	240		Argiles gris- foncée et gris noir, avec fines passées de grès gris très fin	18m	phase 01: DST (Barefoot)			
Ordovicien	Unité IV	3116	-2442	142				Grès gris blanc, fin à moyen, passées d'argile gris noir à noir. Inclusion de grains de quartz		
	Unité III	3258	-2584	161				Grès gris blanc, fin à très fin, passées d'argile gris noir à noir		
Cambrien	Unité II	3419	-2745	17		Grès gris blanc, fin à moyen, compact fines passées d'argile noir	9m	phase 02: DST (Barefoot)		
Précamb	Socle	3436	-2762	>24		Roches métamorphiques multicolores				
	TD	3460	-2786	-				4 1/2" - 13,5# - P110 - NVAM	3460m	6" OH x 4 1/2" liner

2.2- BHA et Programme des outils

Phase 26 ''

Tableau. II.2. Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 26''

No	type	OD	ID	Description		
1	Bit	26	-	TOTCO Ring		
1	Bit sub	9 ^{1/2}	3	7 ^{5/8} REG B*B		
1	Schok sub	11	3	7 ^{5/8} REG P*B		
1	D.C	9 ^{1/2}	3	7 ^{5/8} REG P*B		
1	Stabiliseur	25 15/16	3	7 ^{5/8} REG P*B		
1	D.C	9 ^{1/2}	3	SPIRAL		
1	XO	-	3	7 ^{5/8} REG P*6 ^{5/8} IF B		
12	D.C	8	2.812	SPIRAL		
1	XO	-	2.812	6 ^{5/8} REG P 4 ^{4/2} IF B		
6	HW DP	5	3	50 -D-- 4 ^{4/2} IF		
TYPE	NOZZLES	DEPTH IN	DEPTH OUT	WOB	RPM	FLOW RATE
SB 115C	3*20/32''	00	230	5-25	80-100	1000-3000

Phase 16''

Tableau. II.3. Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 16''

	type	OD in	ID in	DESCRIPTION		
1	16'' Bit	16	0.00	TOTCO Ring		
1	Near bit stabilisateur	15 15/16	3.00	7 ^{5/8} REGB*B		
1	Short drill collar	9.50	3.00	Spiral		
1	stabilisateur	15 15/16	3.00	7 ^{5/8} REGB*B		
1	Drill collar	9.50	3.00	Spiral		
1	String stabilisateur	15 15/16	3.00	7 ^{5/8} REGB*B		
1	Drill collar	9.50	3.00	Spiral		
1	XO	9.50	3.00	7 ^{5/8} REGB*P6 ^{5/8} REG B		
12	Drill collar	8.00	2.81	Spiral		
1	Jar de battage	8.00	2.75	Hydra jar		
2	DC	8.00	2.81	Spiral		
1	XO	8.00	2.81	6 ^{5/8} REG P 4 ^{1/2} IF B		
	HWDP	5	3.63			
TYPE	NOZZLES	DEPTH IN	DEPTH OUT	WOB	RPM	FLOW RATE
TFF9135 (ENSP)	9*12/32	230	1030	5-15	60-110	1000*3000

Phase 12^{1/4}

Tableau. II.4. Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 12^{1/4}

	type	OD	ID	OBSERVATION		
1	Bit	12 ^{1/4}	-	+TOTCO		
1	Near bit stabilisateur	12 ^{3/16}	3	7 ^{5/8} REG P*B float valve		
1	Short DC	9 ^{1/2}	3	7 ^{5/8} REG P*B		
11	Stabilisateur	12 ^{3/16}	3	7 ^{5/8} REG P*B		
1	D.C	9 ^{1/2}	3	Spiral		
1	Stabilisateur	12 ^{3/16}	3	7 ^{5/8} REG P*B		
1	D.C	9 ^{1/2}	3	Spiral		
1	X-O	-	3	7 ^{5/8} REG P*6 ^{5/8} REG B		
12	D.C	8	2.812	Spiral		
1	Jar de battage	8	2.75	Hydra Jar		
3	D.C	8	2.812	Spiral		
1	X-O	-	2.812	6 ^{5/8} REG P * 4 ^{1/2} IF B		
12	HW DP	5	3	50#-D-4 ^{1/2} IF		
TYPE	NOZZLES	DEPTH IN	DEPTH OUT	WOB	RPM	FLOW RATE
DSF813B (new)	8*12/32	1030	2365	5-20	70-160	2500-2800

Phase 8^{1/2}

Tableau. II.5. Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 8^{1/2}

Type	OD	ID	OBSERVATION				
Bit	8 ^{1/2}	-	4 ^{1/2} API REG PIN				
Near bit stabilisateur	8 ^{7/16}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
Short DC	6 ^{1/2}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
Stabilizer	8 ^{7/16}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
DC	6 ^{1/2}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
Stabilisateur	8 ^{7/16}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
DC	6 ^{1/2}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
D-Jar	6 ^{1/2}	2.25	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
DC	6 ^{1/2}	2.81	4 ^{1/2} IF Pin*BOX				
HW DP	5	3	50#-D-4 ^{1/2} IF				
TYPE	NOZZLES	DEPTH IN	DEPTH OUT	WOB	RPM	FLOW RATE	
TK73 (new)	7*12/32	2365	3106	5-15	90-110	1800-2000	

Phase 6''**Tableau. II.6.** Garniture et caractéristiques de l'outil de la phase 6''

No	type	OD	ID	OBSERVATION		
1	Bit	6	-	3 ^{1/2} API REG PIN		
1	Near bit stabilisateur	5 ^{15/16}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
1	Short DC	4 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
1	Stabilizer	5 ^{15/16}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
1	DC	4 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
1	Stabilisateur	5 ^{15/16}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
18	DC	4 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
1	D-Jar	4 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
3	DC	4 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
12	HW DP	3 ^{1/2}	2.25	3 ^{1/2} IF Pin*Box		
	DP	3 ^{1/2}	2.25	13.3#G105-IEU Class P Tj 4 ^{1/2} *3 ^{1/2} -3 ^{1/2} IF		
TYPE	NOZZLES	DEPTH IN	DEPTH OUT	WOB	RPM	FLOW RATE
VTD909DGX (RR)	7*12/32	3106	---	5-15	100-150	900
IR212E (New)	TFA 1.25in ²	---	3460	3-8	120-180	900

2.3- Programme de boue

Le tableau suivant résume le programme prévisionnel de boue ainsi que ses propriétés pour chaque phase :

Tableau. II.7. Programme de boue

Intrvalle	26''	16''	12 ^{1/4}	8 ^{1/2}	6''
propriété					
Type de boue	Spud mud	Kacl polymer	OBM INVERMUL	OBM INVERMUL	OBM INVERMUL
Densité sg	1.05-1.08	1.22-1.27	1.02-1.05	1.05-1.07	0.91-0.94
Yield value Lb/100ft ²	45-55	20-24	16-18	12-14	10-12
Filtrat API cc/30min	<10	<4	-	-	-
HPHT 200F 500psi	-	<10	<4	-	-
HPHT 250F 500psi	-	-	-	<4	<4

Pom	-	-	2.5-3.0	2.5-3.0	2.5-3.0
MBT kg/m³	80-100	30	-	-	-
PH	11-12	9.5-10.5	-	-	-
LGS%	<5	<5	<5	<4	<4
Huile/eau	-	-	75/25 85/15	90/10	90/10
Stabilité électrique	-	-	>600	>1000	>1000
Kcl%	-	5	-	-	-

3-Etude technologique de la boue utilisée dans la phase 16''

La boue utilisée dans cette phase est une boue à base d'eau, c'est la boue KCl POLYMER. Ce système de fluide de forage et les procédures sont conçus pour atteindre les objectifs suivants au niveau de la phase de 16'' :

- Minimiser les ECD en contrôlant la quantité de matière solide de faible gravité (LGS) accumulée dans le fluide et en optimisant les débits.
- Assurez un nettoyage efficace des trous afin de minimiser le chargement annulaire des déblais lors du forage de la section de trou de 16 po.
- Fournir un niveau d'inhibition et de stabilisant à la formation argileuse forée grâce à l'utilisation d'un polymère KCl système de boue.

Cette section sera forée à travers la formation CRETACE et le tubage de 13^{3/8}'' sera placé dans le NUMERIEN.

3.1- Risques de forage et précautions à prendre pour la phase 16''

Des produits chimiques de boue et du matériel de LCM suffisants et de doivent être conservés sur le site de forage pendant le forage de cet intervalle pour faire face aux pertes de formation anticipées pertes inattendues.

Il faut faire attention aux risques de forage qui peuvent survenir dans cet intervalle tels que :

- Bit et BHA Ballin par formation plastique.
- Possibilité de pertes partielles à totales dans les formations faibles.
- Possibilité d'Overpull lors du déclenchement ou lors de l'ajout d'une connexion.
- Maintenir le pH entre 9,5 et 10,5.
- Maintenir au début la concentration de KCl à 5% ; il devrait être augmenté à 5,5% selon les aspects des déblais dans les tamis.
- Utiliser BARO LUB GOLD SEAL comme lubrifiant (3 - 5 l / m³) selon le ROP.

En raison de vitesse de rotation élevée (RPM) pendant le forage de cette section, il est recommandé d'optimiser la rhéologie et d'assurer un écoulement laminaire pour éviter les trous de cavage (wash out).

Le poids de la boue doit être ajusté en fonction de la condition du trou afin de minimiser les overpull, la plage optimale pour cette section est comprise entre 1,23 sg et 1,40sg.

3.2- Formulation de la boue utilisée

La phase 16'' sera forée par une boue à base d'eau salée à 5% avec du KCL (KCL POLYMER), les tableaux suivants indiquent sa composition avec la concentration de chaque additif, ainsi que ses propriétés rhéologiques :

Tableau. II.8. Composition de la boue pour la phase 16''

Produit	Quantité Kg /m ³
Eau	0.901
Bentonite	4.5
Soude caustique (control Ph)	1.5
Soude Ash	1
Kcl	50
PAC L Algeria (réducteur filtrat)	5
Dextrid LTE	12
BARAZAN D (viscosifiant)	2
BARITE (alourdissant)	294.88
EZ MUD (inhibiteur de gonflement d'argile)	4-5(si c'est nécessaire)
GEM GP (inhibiteur de gonflement d'argile)	2-5(si c'est nécessaire)

Tableau. II.9. Propriétés de la boue 16''

Propriétés	Recommandation
Densité sg	1.22-1.27
Viscosité sec/qt	55-60
Yield point lb/100ft ²	18-24
Low shearbratre lb/100ft ²	8-12
PV (cp)	La plus basse possible
Kcl %	5
Gels (10sec./10mn)	12-16
FL cc/30min .	<4
Ph	9.5-10.5
WaterHardness (mg/l)	<400
MBT Eq.Bent.	30

3.3- Recommandations

Pour le bon déroulement de l'opération de forage de la phase 16'', nous suggérons les recommandations suivantes :

- Maintenir le poids de la boue de 1,27 sg - 1,29sg conformément au programme.
- Les propriétés de la boue (poids de la boue, rhéologie, concentration du filtrat et du KCl) seront ajustées avant le début du forage.
- La concentration de KCl doit être surveillée régulièrement et maintenue à 5% en poids.
- Un traitement continu avec un pré mélange contenant du KCl sera nécessaire pour compenser son épuisement pendant le forage.
- Maintenez le pH entre 9,5 et 10,5 afin de minimiser le gonflement des argiles.
- Le pf doit être maintenu dans la plage de 0,2 à 0,4. Toute indication de contamination par les carbonates devrait être traitée en augmentant le pH du système à 10,5 et en ajoutant du carbonate de sodium et du bicarbonate de sodium.
- Ajoutez l'agent anti-mousse BARA-DEFOAM W300 directement dans le système à boue.
- Lorsque vous atteignez la côte de tubage de 9 5/8 '' à ± 625 m, balayez le trou avec des bouchons à haute viscosité
- Pour les tamis, utilisez les mèches les plus fines possibles et filtrez autant que le permettent les débits.
- Une centrifugeuse à haute vitesse pourrait être utilisée pour contrôler la densité de la boue et le LGS.

3.4- Testes physiques et chimiques

Nous avons procédé aux tests physiques et chimiques sur la boue KCL POLYMER utilisée dans la phase 16'', nous avons pris nos échantillons dans les bacs à boue présents sur le chantier et effectuer ces tests dans le laboratoire de boue sur place, comme suit :

3.4.1- Les caractéristiques physiques de la boue

A- La densité

La boue exerce une pression sur les parois du puits donnée par l'expression suivante

$$P = 0.981 \cdot \frac{h \cdot d}{10} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

P : La pression hydrostatique en bar.

h : la profondeur en mètre (m)

d : la densité (kgf/cm³).

- **Matériel de contrôle**

Pour le matériel de control, nous utiliserons le densimètre du chantier :

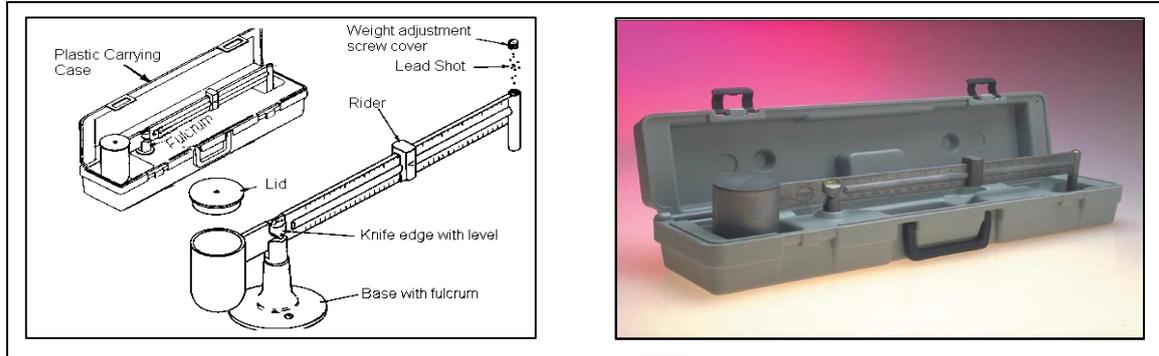


Figure II.2. Densimètre

- **Mode d'emploi**

- Remplir le godet de la boue à mesurer après une agitation
- Mettre le couvercle et évacuer l'excès de boue qui sort par le trou central du couvercle prévu à cet effet.
- Nettoyer à l'eau et sécher en prenant soin de maintenir le trou central du couvercle obstrué en permanence.
- Placer les couteaux de fléau dans le porte-couteau du socle.
- Déplacer le curseur jusqu'à obtenir l'horizontalité du fléau. Cette horizontalité doit être contrôlée à l'aide du niveau à bulle situé au-dessus des couteaux.
- Lire la densité ou le poids volumique directement sur le bras du fléau, au droit de la position du curseur.

B-La rhéologie (viscosité)

- **Matériel de contrôle**

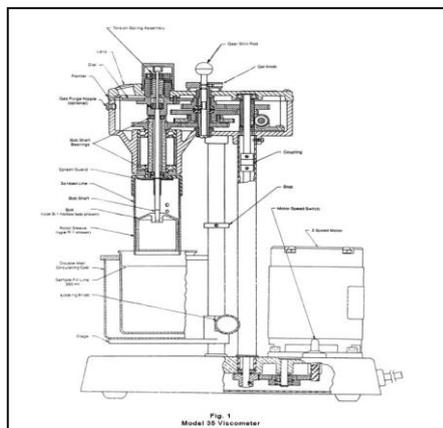


Fig. II. 3. Viscosimètre Fann

- **Principe**

C'est un appareil à cylindres coaxiaux, les modèles les plus couramment commercialisés comportent :

- Soit deux vitesses de rotation (600 – 300 tr/min).
- Soit six vitesses de rotation (600 – 300 – 200 – 100 – 6 – 3 tr/min)..

Ces appareils sont normalisés par l'A.P.I

- **Mode d'emploi**

- Prendre de la boue et agiter 5 min à l'aide d'un agitateur, puis remplir le godet du viscosimètre.
- Immerger les cylindres coaxiaux jusqu'à ce que le trait repère du rotor affleure la surface de la boue.
- Faire tourner le rotor à 600 tr/min choisissant la position convenable du bouton de changement de vitesse et l'interrupteur. Lire la déviation sur la calandre.
- Sans arrêter l'entraînement du rotor, régler la vitesse de rotation à 300 tr/min. Lire la déviation de la graduation.
- Faire de même pour les autres vitesses.

- **Les caractéristiques à déterminer :**

Les caractéristiques à déterminer sont la thixotropie, la viscosité plastique et la valeur de la 'yield value'.

- **Détermination de la thixotropie :**

La Thixotropie peut être estimée par l'évolution du gel en fonction du temps, selon la norme A.P.I, nous déterminons le gel 10 secondes (gel 0) et le gel 10 minutes (gel 10) avec le viscosimètre Fann. Le processus opératoire est le suivant :

- Faire tourner le rotor à 600 tr/min pendant 10 secondes puis stopper le moteur en plaçant le bouton en position 'stop'. Après 10 secondes de l'arrêt complet du rotor tourner le rotor avec une vitesse de 3 tr/min.
- Lire la déviation maximum sur le cadran : le nombre lu constitue le gel initial en livres par 100 pieds carrés 'Livres/100 Pieds²'.
- Faire à nouveau tourner le rotor en grande vitesse pendant 10 secondes puis attendre 10 minutes sans toucher la boue et effectuer la même opération : le nombre maximum lu sur le cadran consiste le gel 10 minutes en 'Livres/100 Pieds²'.

- **La viscosité plastique et la yield value :**

Ces déterminations se font à l'aide du viscosimètre Fann selon la norme A.P.I qui considère les valeurs des lectures en 600 et 300 tr/min.

$$v_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

V_p : viscosité plastique en (cP).

θ_{600} : lecture Fann 600 tr/min.

θ_{300} : lecture Fann 300 tr/min.

$$\gamma_v = \theta_{600} - 2(\theta_{600} - \theta_{300})$$

$$\gamma_p = \theta_{600} - 2(\theta_{600} - \theta_{300}) \quad (II.3)$$

Avec:

γ_p : yield value

θ_{600} : lecture Fann 600 tr/min

θ_{300} : lecture Fann 300 tr/min

➤ **La filtration :**

• **Matériel de contrôle**

Deux types d'appareils sont normalisés, un filtre-presse dit A.P.I avec lequel la filtration s'opère à basse pression et à la température ambiante Filtre presse A.P.I.

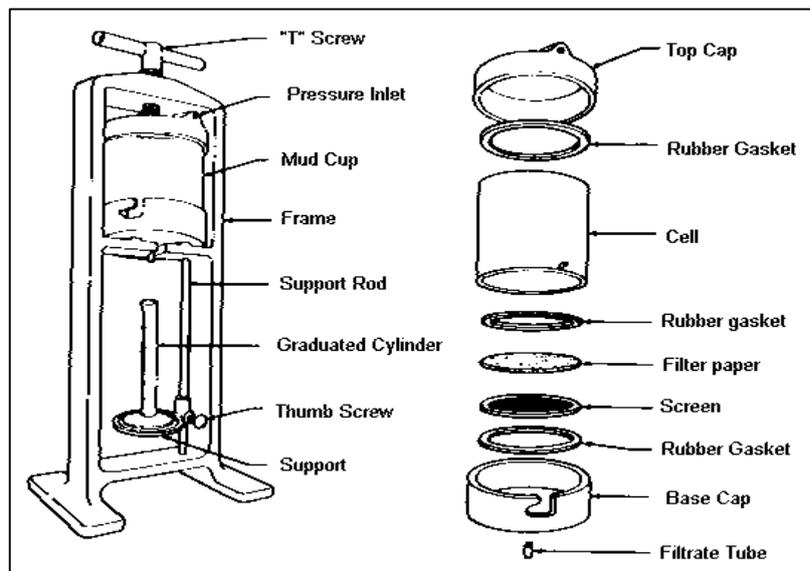


Fig. II.4. Filtre presse API

• **Principe**

On soumet de la boue à une pression de 100 Psi (7 bar) dans un cylindre normalisé doté d'une surface perméable, de section de perméabilité normalisée. On note la quantité de liquide qui filtre en 30 minutes, à température ambiante, c'est le filtrat A.P.I.

Les solides déposés pendant la filtration constituent ce que l'on appelle le *Cake*. L'épaisseur du cake est notée.

La filtration s'effectue donc en statique, à température ambiante ce qui ne reflète qu'imparfaitement les conditions de filtration dans le sondage.

• **mode d'emploi**

Pour utiliser le filtre-presse A.P.I :

- Poser le joint sur l'embase

- Poser le tamis sur le joint
- Poser le papier filtre sur le tamis
- Poser le second joint sur le papier filtre
- Emboîter le cylindre sur l'embase et verrouiller le système à baïonnette
- Remplir la boue jusqu'à environ de 1 cm du haut du cylindre
- Poser le couvercle sur le cylindre en intercalant un joint
- Placer l'ensemble dans l'étrier et bloquer à l'aide de la vis de serrage
- Disposer une éprouvette graduée sous l'ajutage
- Appliquer une pression de 100 psi (7 bar) et simultanément déclencher le chronomètre.
- Après 30 minutes lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en cm^3 (cc) c'est la valeur de filtrat A.P.I
- Purger le circuit de gaz comprimé, démonter l'appareil et recueillir le papier filtre qui est recouvert d'une couche de solides, c'est le cake. Après un lavage superficiel mesurer l'épaisseur de cake, exprimer la valeur en millimètre
- **Sources d'erreur**
 - Pression instable durant la mesure
 - Papier filtre non normalisé
 - Utilisation des cartouches de CO_2 qui modifient les alcalinités et faussent certains dosages sur le filtrat.

C- Teneur en solide et teneur en eau

La connaissance de la concentration en solides et en eau d'une boue est d'une importance considérable, tout particulièrement dans les boues alourdies et dans les boues émulsionnées.

- **Matériel de contrôle**

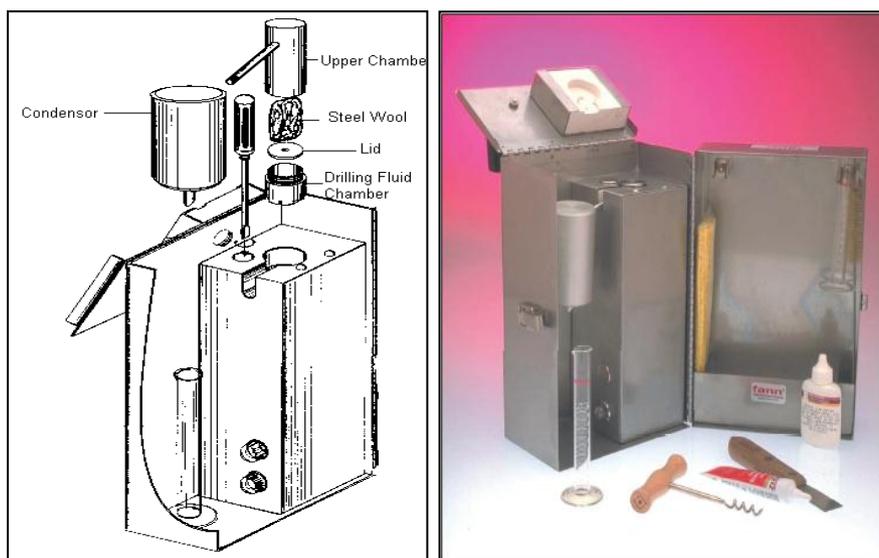


Fig. II.5. Distillateur

- **Principe**

Pour déterminer les pourcentages en volume des différents constituants, on emploie un distillateur à boue dont le principe est le suivant :

On chauffe un certain volume de boue, la vapeur passe dans un condenseur et l'on récupère l'eau dans une éprouvette graduée. On effectue directement la lecture et on détermine la teneur en solides par différence, soit :

$$\text{Volume Solides} = 100 - \text{Volume Eau} \quad (\text{II.4})$$

On connaîtra ainsi les deux constituants de la boue (en volume)

- L'eau pure
- Les solides

- **Mode d'emploi**

- Désaccoupler la cellule.
- Remplir le godet de boue.
- Mettre doucement le couvercle du godet et essuyer la boue qui sort par le trou central (même principe que pour le densimètre)
- Remplir la cellule avec la laine d'acier.
- Visser le godet sur la cellule.
- Placer le condenseur sur la cellule.
- Mettre la cellule dans la chambre de chauffage.
- Placer une éprouvette graduée sous le tube de la sortie du condenseur.
- Relier à une source de courant appropriée.
- Lorsqu'il ne sort plus de liquide du condenseur (après 30 à 60 minutes environ couper le courant).
- Lire le % en volume d'eau
- Pour connaître le % en solides en volume, appliquer :

$$\% \text{Solides} = 100 - \% \text{Eau} \quad (\text{II.5})$$

Nettoyer la cellule après usage en grattant (à l'aide du grattoir prévu à cet usage) les solides collés aux parois.

3.4.2- Les caractéristiques chimiques de la boue

Les caractéristiques physiques de la boue (densité, rhéologie, filtration,...) sont directement liées à la présence de corps solubles ou insolubles dans la boue. Il en découle la nécessité de contrôler chimiquement la présence et la concentration de ces corps. Ils peuvent provenir de la formation forée (chlorures, sulfates, ...), dans ce cas ils joueront le rôle de contaminants. Ils peuvent être additionnés volontairement dans le cadre d'un type de boue donné (boue salée saturée, boue au gypse,...).

Dans tous les cas le technicien des boues doit effectuer les mesures chimiques permettant de préciser les ions présents dans la boue et d'en connaître la concentration.

Ceci permet de déceler la nature des contaminations, de définir le traitement et / ou de contrôler l'équilibre chimique des boues.

Toutes les méthodes d'analyses qu'on va voir sont des méthodes normalisées par l'A.P.I (American Petroleum Institute) (API 13B – Mars 2005).

A- Détermination du 'pH'

• Les indicateurs

Pour déterminer le pH, la première méthode mise à notre disposition est celle des indicateurs colorés, basée sur la décoloration de certaines substances organiques. Elle est peu précise mais souvent suffisante sur chantier.

Cette méthode consiste à mettre au contact de la boue ou du filtrat une bande de papier qui prend rapidement une certaine teinte qu'il faut comparer avec une gamme colorimétrique étalon pour obtenir la valeur de pH.

• pH mètre électronique

Le principe général consiste à immerger une ou deux électrodes dans la solution à mesurer.

B- Mesure d'alcalinité

L'alcalinité ou pH des filtrats ou des boues est due à la présence des ions hydroxyle (OH^-), carbonate (CO_3^{2-}) ou bicarbonate (CO_3H^-). Les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques peuvent y contribuer mais à un degré moindre.

La présence de ces ions est due :

- A la soude (NaOH) et au carbonate de sodium (Na_2CO_3) seuls ou associés.
- Au carbonate et au bicarbonate de sodium (NaHCO_3).
- A la chaux éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Pratiquement on mesure trois alcalinités :

Pf et Mf sur le filtrat et Pb sur la boue. P signifie phénolphtaléine, M signifie méthylorange, f filtrat et b boue, le virage de phénolphtaléine ce fait à $\text{pH} = 8.3$, le virage de méthylorange ce fait à $\text{pH} = 4.3$.

Le méthylorange est fréquemment remplacé par le bleu de bromophénol dont le point de virage est très voisin de celui du méthylorange mais apparaît avec plus de netteté surtout si le filtrat est coloré.

Remarque

Dans les boues à base d'huile nous avons seulement la mesure de Pb, mais dans les boues à base d'eau on a les trois : Pb, Pf, Mf

○ Alcalinité Pf

C'est la quantité d'acide sulfurique ' H_2SO_4 ' de normalité N/50 nécessaire pour amener 1 cm^3 de filtrat à $\text{pH} = 8.3$

a. Réactifs nécessaires

- Eau distillé privée de CO₂ par ébullition
- Solution de phénolphtaléine
- Solution titrée de H₂SO₄

b. Mode opératoire

- Pipeter 1 cm³ de filtrat et verser dans un erlenmeyer propre.
- Ajouter environ 20 cm³ d'eau distillée.
- Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine.
- Si l'échantillon se colore en rose, faire couler goutte à goutte à la burette la solution de H₂SO₄ 0.02 N, en maintenant l'erlenmeyer en agitation jusqu'à la décoloration

c. Expression des résultats

- Si après l'addition de la solution de phénolphtaléine la couleur de filtrat ne se modifie pas le Pf = 0
- Si après addition de la solution de phénolphtaléine le filtrat devient rose, le Pf est égale au nombre de cm³ d'acide sulfurique 0.02 N nécessaire à la décoloration.

○ **Alcalinité Mf**

C'est la quantité d'acide sulfurique H₂SO₄ N/50 nécessaire pour amener 1 cm³ de filtrat à pH = 4.3

a. Réactifs nécessaires

- Eau distillé privée de CO₂ par ébullition
- Solution de méthylorange (ou bleu de bromophénol)
- Solution titrée de H₂SO₄ N/50

b. Mode opératoire

Utiliser l'échantillon de filtrat ayant servi à déterminer l'alcalinité Pf.

- Ajouter 2 à 3 goutte de méthylorange
- L'échantillon s'est coloré en jaune, faire couler goutte à goutte à la burette la solution de H₂SO₄ N/50, en maintenant l'erlenmeyer en agitation, jusqu'à virage du jaune à l'orange (sans aller jusqu'au rouge)
- Si on utilise le bleu de bromophénol, le mode opératoire reste le même mais nous aurons un virage du violacé au jaune.

c. Expression des résultats

- Si après addition de la solution de méthylorange (ou bleu de bromophénol) la couleur de l'échantillon ne se modifie pas Mf = Pf
- Si parés addition du méthylorange (ou bleu de bromophénol) le filtrat se colore, le Mf est égale au nombre de cm³ d'acide sulfurique H₂SO₄ N/50 total (cm³ pour Pf + cm³ pour virage Mf) nécessaire au virage de l'échantillon.

○ **Alcalinité Pb**

C'est la quantité d'acide sulfurique H₂SO₄ N/50 nécessaire pour amener 1 cm³ de boue à pH = 8.3 pour une Boue à base d'eau :

- **Réactifs nécessaires**
 - Eau distillée privée de CO₂
 - Solution de phénolphtaléine
 - Solution titrée de H₂SO₄ N/50 (0.02 N)
- **Mode opératoire**
 - Verser dans un erlenmeyer 1cm³ de boue
 - Ajouter de 25 à 50 cm³ d'eau distillée
 - Ajouter 2 à 3 gouttes de solution de phénolphtaléine
 - Si l'échantillon se colore en rose ou mauve, faire couler goutte à goutte rapidement à la burette la solution de H₂SO₄ N/50, en maintenant l'erlenmeyer sous agitation jusqu'à la décoloration.
- **Expression des résultats**
 - Si après l'addition de la solution de phénolphtaléine la couleur de la boue ne se modifie pas donc Pb = 0
 - Si après l'addition de phénolphtaléine la boue se teinte en rose, le Pb est égale au nombre de cm³ d'acide H₂SO₄ N/50 nécessaire à la décoloration.
- **Interprétation des résultats de Pf et Mf**

Le tableau suivant illustre les interprétations des différentes valeurs d'alcalinité Pf et Pm :

Tableau.II.10. Les calculs des concentrations en ions à partir des résultats de Pf et Mf

Alcalinité du filtrat	NaOH OH ⁻	Na ₂ CO ₃ CO ₃ ⁻²	NaHCO ₃ HCO ₃ ⁻	Concentration en g/L
Pf = 0 Mf <> 0	0	0	+	NaHCO₃ = 1.68 Mf HCO₃⁻ = 1.22 Mf
Pf = Mf	+	0	0	NaOH = 0.8 Pf OH⁻ = 0.34 Pf
2Pf = Mf	0	+	0	Na₂CO₃ = 2.12 Pf CO₃⁻² = 1.20 Pf
2Pf > Mf	+	+	0	NaOH = 0.8 (2Pf - Mf) OH⁻ = 0.34 (2Pf - Mf)
				Na₂CO₃ = 2.12 (Mf - Pf) CO₃⁻² = 1.20 (Mf - Pf)
2Pf < Mf	0	+	+	Na₂CO₃ = 2.12 Pf CO₃⁻² = 1.20 Pf
				NaHCO₃ = 1.68 (Mf - 2Pf) HCO₃⁻ = 1.22 (Mf - 2Pf)

C- La teneur en ions chlorure Cl⁻

Cette méthode normalisée consiste à doser l'ensemble des chlorures présents dans le filtrat ou la boue elle-même et à exprimer les résultats en chlorure de sodium. Ceci explique que dans certains cas, en présence de chlorure de calcium et / ou magnésium par

exemple le résultat obtenu, exprimé en NaCl, atteint des valeurs supérieures à la solubilité du NaCl.

- **Principe**

On précipite les chlorures sous forme de chlorure d'argent, en présence d'un indicateur, le chromate de potassium.

Lorsque tous les chlorures sont précipités les chromates de potassium jaune sont transformés en chromates d'argent rouge.

L'apparition de coloration rouge sera l'indication de l'approche de la fin de dosage.

- **Remarque**

Ce dosage doit être effectué en milieu neutre car en milieu acide il y a dissolution du chromate d'argent et, en milieu alcalin il y a précipitation d'oxyde d'argent ou de carbonate d'argent.

- **Réactifs nécessaires**

- Eau distillée privée de CO₂ par ébullition
- Acide nitrique (HNO₃) N/50 ou acide sulfurique N/50
- Carbonate de calcium
- Solution de chromate de potassium
- Solution de phénolphtaléine
- Solution titrée de nitrate d'argent (AgNO₃) : 4.791 g/L (0.282 N)

- **Dosage**

- Pipeter 1 cm³ de filtrat et verser dans un erlenmeyer propre.
- Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine
- S'il y a apparition de la couleur rose. Ajouter gouttes à gouttes de l'acide jusqu'à la disparition de la couleur rose, si non ajouter 2 cm³ d'acide puis ajouter 1 g de carbonate de calcium
- Ajouter de 25 à 50 cm³ d'eau distillée
- Ajouter de 2 à 3 gouttes de chromate de potassium
- Faire couler le nitrate d'argent contenu dans la burette en maintenant le récipient sous agitation, jusqu'à le virage du jaune au rouge orangé et que la couleur reste stable pendant 30 secondes.

- **Expression des résultats**

$$[\text{Cl}^-] \text{ (g/L)} = 10 V_{\text{NA}}/V_{\text{F}} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

V_{NA} : volume de nitrate d'argent.

V_F : volume de filtrat.

D- La teneur en ions chlorure Ca²⁺

• **Principe**

La méthode à l'EDTA est basée sur la formation de complexes stables avec les ions Ca²⁺

• **Réactifs nécessaires**

- Eau distillée
- Noir bleu au chrome
- Solution tampon de soude 5N
- Solution titrée d'EDTA N/100

• **Dosage**

- Pipeter 1 cm³ de filtrat et le verser dans un erlenmeyer propre.
- Ajouter 30 à 40 cm³ d'eau distillée
- Ajouter une pincée de noir bleu de chrome
- Ajouter goutte à goutte la solution tampon de soude jusqu'au virage au rouge.
- Faire couler l'EDTA N/100 contenu dans la burette jusqu'au virage au bleu.

• **Expression des résultats**

$$[Ca^{2+}] \text{ (g/L)} = 0.4 V_{EDTA}/V_F \tag{II.7}$$

V_{EDTA} : volume de nitrate d'argent.

V_F : volume de filtrat.

3.4.3- Résultats des tests

Nous avons effectué trois essais pour chaque paramètre cité ci-dessus, dans une période d'une semaine soit un prélèvement chaque deux jour les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau.II.11. resultats des testes

Paramètre	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Moyenne	Valeur prévisionnelle	
Densité	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22-1.27	
Rhéologie	Yeld p	18	19	20	19	18-24
	Viscosité P	17	19	18	18	Min
	Gel 0	10	9	11	10	12
	Gel 10	12	13	12	12.33	16
	Filtration	4.6	4.5	4.8	4.63	
Teneur en solide(%)	W=89 S=11	W=88 S=12	W=90 S=10	W=89 S=11	-	
pH	10.3	10	10.5	10.26	9.5-10.5	

Teneur calcium (g/l)	en	0.20	0.16	0.16	0.173	-
Alcalinité	Pf	0.3	0.3	0.3	0.3	-
	Mf	0.5	0.5	0.5	0.5	-

3.5- Simulation avec DFG (Drilling Fluids Graphics)

Le DFG (Drilling Fluids Graphics) est un logiciel simulateur très évolué de la société BAROID (HALLIBURTON), qui permet aux utilisateurs de simuler l'efficacité de nettoyage, les pertes de charge, l'ECD (Equivalent circulation density=densité équivalente de forage), en utilisant les données des circuits hydraulique, les donnée de la BHA, les paramètres de forage. Etc

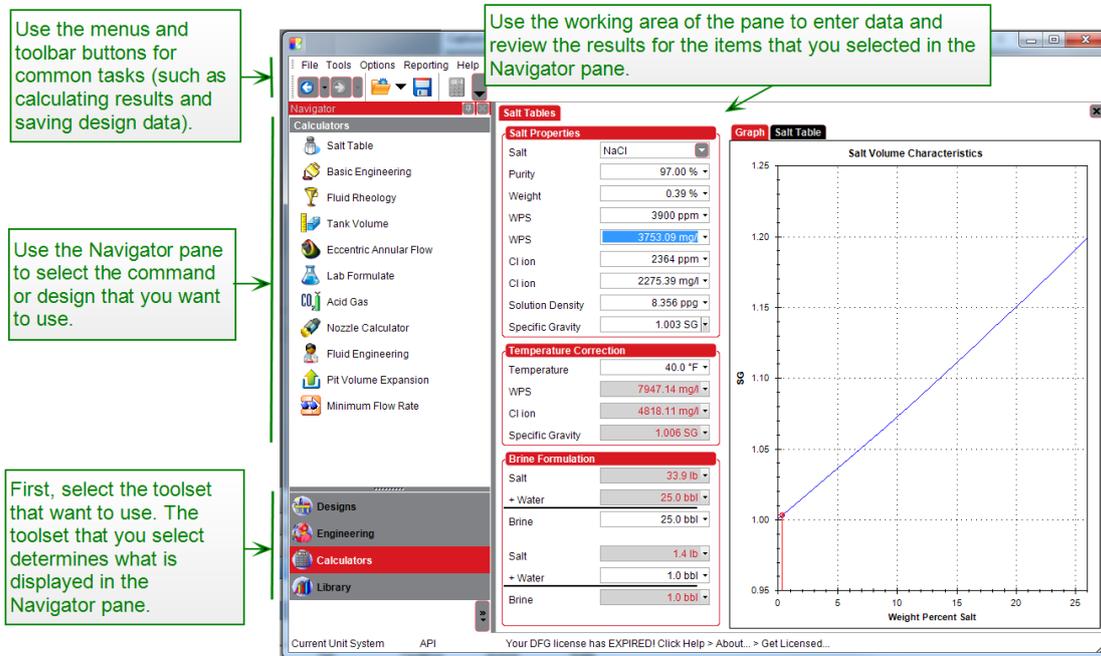


Fig.II.6. Interface du logiciel DFG

Cependant dans notre travail il nous a permis de simuler le modèle rhéologique de notre boue, l'efficacité de nettoyage du puits et de calculer les pertes de charges à travers tout le puits (garniture, outils, espacer annulaire). cela a permis de comparaître les résultats avec ceux calculer par l'équipe de forage et confirmer ces derniers. Et cela après avoir introduits tous les paramètres nécessaires à cela à savoir la garniture avec toutes ses caractéristiques (OD, ID, Grade, longueur...etc.) ainsi que les paramètres de forage et les paramètres hydrauliques.

3.5.1- Données nécessaires aux calculs (input)

Les tableaux suivants résument tous les paramètres introduits au logiciel DFG :

- **Open Hole (Découvert)**

Tableau II.12. Cotes des phases 26'' et 16''

Hole Size (in)	Top MD (m)	End MD (m)
26.000	0.00	226.00
16.000	226.00	1046.00

- **Casing**

Tableau II.13. Caractéristiques des casings 185/8 et 13^{3/8}

Name	OD (in)	ID (in)	Top MD (m)	End MD (m)
J-55 87.5	18.625	17.755	0.00	225.00
K-55 HC 54.5	13.375	12.615	0.00	1045.00

- **Garniture(BHA)**

Tableau II.14. BHA de la phase 16''

Componen t Type	Description	OD (in)	ID (in)	Length (m)	MD (m)
Drill Pipe	5 in DP	5.000	2.81 3	832.60	832.60
Drill Pipe	5 in C50 49.3	5.000	3.00 0	57.00	889.60
Drill Pipe	D JAR	8.000	3.00 0	9.70	899.30
Drill Collar	8 in	8.000	3.00 0	146.30	1045.6 0
Bit	16 in Bit	16.00 0	0.99 4	0.40	1046.0 0

- **Duse de l'outil (Bit jets)**

Tableau II.15. Diamètres des duses de l'outil 16''

Count	Diamètre (in)
0	16/32
9	12/32

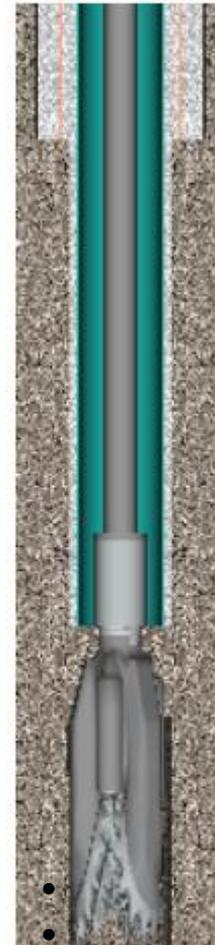


Fig.II.7. Schéma du trou 16''

3.5.2- Simulation du modèle rhéologique

Après avoir introduit les lectures sur le viscosimètre Fann déjà calculées auparavant le DFG nous a permis de générer le modèle rhéologique qui exprime le comportement de notre boue à savoir la boue KCl-POLYMER.

Tableau II.16. Caractéristiques rhéologiques de la boue 16''

Propriétés du fluide	Valeur
HB-N	0.765
HB-K	0.323
Tau0	10.90
PV	24
YP	25
PL-n	0.575
PL-k	1.446
10 sec	15
10 min	19
30 min	22
600	73
300	49
200	36
100	27
6	14
3	10

Nous obtiendrons la courbe du comportement rhéologique représentée dans la figure ci-dessous :

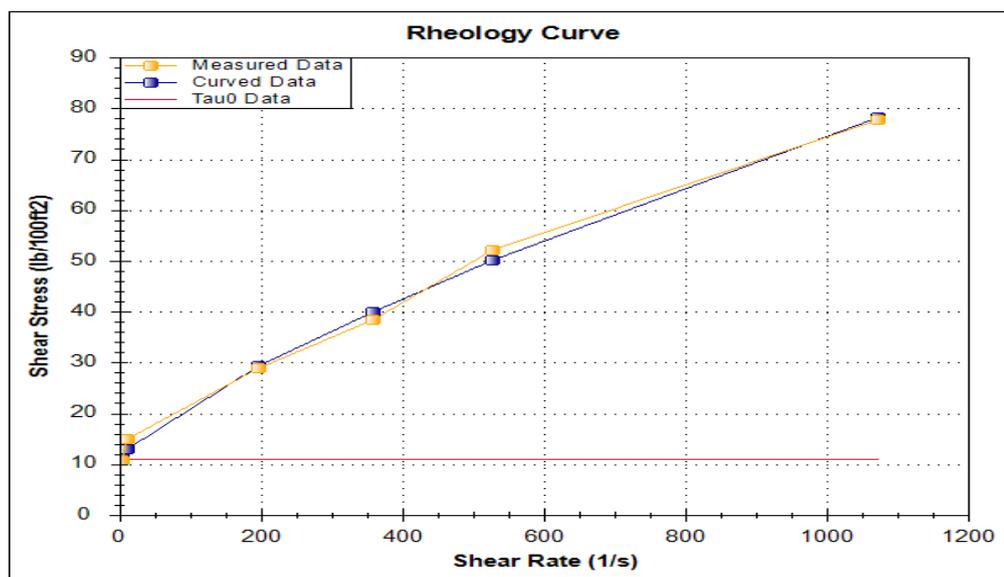


Figure II. 7. Rhéogrammes des modèles rhéologiques

Discussion

La figure ci-dessus représente les courbes du rhéogramme de la boue de forage utilisée. Nous remarquons que pour toutes les vitesses de déformation, le fluide se comporte comme un fluide rhéofluidifiant à seuil, c'est le modèle de Heschell-buckley.

Nous avons opté pour le modèle de Heschell-buckley que nous considérons le mieux adapter car c'est le modèle le plus complet, les deux courbes celle du modèle et celle des valeurs mesurées sont confondues.

La simplification du modèle Heschell-buckley peut nous amener aux autres modèles tels que le modèle de Bingham, le modèle en puissance ...etc.

3.5.3- Simulation des pertes de charges

Le calcul des pertes de charge est important pour estimer la pression de refoulement du fluide de forage. Le circuit de forage est formé de plusieurs composants et intervalles, chacun induit des pertes de charges spécifiques.

La somme de ces pertes de charge égale à la pression de refoulement (SPP) mesuré au niveau de la colonne montante, le tableau ci-dessous résume le calcul des pertes de charge partielles et totale.

Tableau.II.17. Résultats de la simulation des pertes charges

Résultats hydrauliques					
Outil		Pertes de charges		Volumes	
Puissance hydraulique	168.8 hp	Surface	315 psi	garniture	4.3 m ³
Force	785.77 lbf	garniture	2726 psi	Annulaire	68.0 m ³
HSI	0.84 hp/in ²	Outil	438 psi	découvert	84.4 m ³
		Annulaire	39 psi	Circulation	72.3 m ³
		Total	3518 psi	Temps de Bottum Up	27.19 min

Discussion

Nous remarquons que la majorité des pertes de charge (77.5%) dans le circuit sont à l'intérieur de la garniture tandis que au niveau de l'espace annulaire, surface et l'outil représentent respectivement (1.1%), (8.90%) et (12%).

Les pertes de charge au niveau de l'outil qui représente que 12% des pertes de charges totales, sont loin de la valeur conseillée qui est 50%, donc ceci peut provoquer un reforage des déblais donc un faible ROP.

3.5.4-Simulation de l'efficacité de nettoyage

Afin de prédire tout problème lié à l'espace annulaire, nous procédons à la simulation de l'efficacité de nettoyage de ce dernier, sur toute la phase 16''

Discussion

Nous constatons que le nettoyage est bon le long de la phase, les taux donnée par la simulation reste au-dessous de la valeur maximale tolérée qui 3%.

La densité du fluide varie le long du chemin suivit par les déblais, une diminution de la densité entraîne une diminution de la viscosité et un faible débit, ce qui favorise la vitesse de chute des particules solides sur le drain vertical. ce qui affecte transport des déblais.

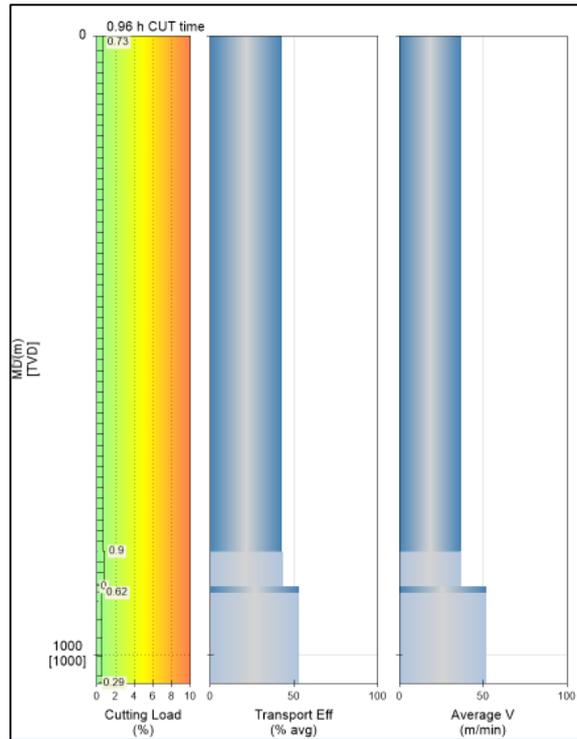


Fig.II.8. Graphe du taux de nettoyage de la boue KCl Polymer

Chapitre III

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

La phase 16'' du champ d'In Amena dans la région d'Illizi se caractérise par un faible taux d'avancement ROP, et des temps improductifs (NPT) importants, qu'on peut définir comme étant le temps pris pour résoudre les problèmes ayant entraînés l'arrêt des opérations normales de forage. Il contient toutes les opérations nécessaires à un retour à la situation précédente avant l'apparition du problème. Cette perte de temps augmente la durée d'exécution du puits ce qui fait une augmentation de son coût de revient.

Notre étude est une contribution statistique d'un côté, pour mettre en évidence l'influence des paramètres rhéologiques sur le taux d'avancement ROP.

D'un autre côté, pour réduire le temps non productif dans la phase 16'' d'In Amena, nous essayons d'analyser les problèmes majeurs qui comportent des grands obstacles pour la poursuite normale du forage

Cette étude est appuyée par l'utilisation de logiciels : IBM SPSS, MATLAB et Excel.

1- Synthèse bibliographique

Le fluide de forage est un élément clé pour la réussite de l'opération de forage, les compagnies pétrolières recherchent toujours de nouvelles techniques pour augmenter les performances du forage. De nouvelles technologies de forage sont développées et mises en service pour réaliser un forage plus sûr et plus rentable, ces technologies ont été largement discutées dans plusieurs articles, ci-dessous quelques auteurs qui ont travaillé sur cet axe.

1.1- Taux d'avancement ROP

Parmi les premiers chercheurs qui ont travaillé sur l'optimisation de forage Graham et Muench, ils ont introduit la notion de forage optimale par le choix de la meilleure combinaison de la vitesse de rotation RPM et le poids sur l'outil qui donne le coût de forage le plus bas, pour cela, ils ont développé une formule tel que :

$$\text{ROP} = C_{\text{for}} D^K N^{0.584} \text{WOB} \quad (\text{III.1})$$

Ils ont aussi essayé de résoudre le problème de l'usure de l'outil à grande vitesse. Le ROP est affecté par plusieurs paramètres qu'on peut classer en deux catégories : contrôlables et incontrôlables. Les paramètres contrôlables incluent les paramètres de forage : WOB, RPM, Q, T et la pression de refoulement SP, ces paramètres sont indépendants entre eux [Graham and Muench, 1959]. Par contre les paramètres incontrôlables incluent le diamètre de l'outil, la densité du fluide de forage, son type, sa densité et sa rhéologie, il est difficile de modifier ces paramètres car ils sont interdépendants [Hossain and Al-Madjud, 2015].

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

En revanche, Eckel établie que le ROP diminue en augmentant la densité du fluide de forage et l'effet de lubrification du fluide de forage fait augmenter le ROP [ECKEL, 1954]. Eckel conclue que il n'ya pas de relation direct entre les propriétés du fluide de forage et le ROP. Piaiman et al illustrent à leur tour, que en augmentant la densité, viscosité plastique Pv et le pourcentage des solide le ROP diminue [Piaiman et al, 2009]. L'effet des propriétés du fluide de forage telles que les Gel et la viscosité plastique PV ont un effet minime sur le ROP, par contre la relation entre les pertes de pression annulaire et le ROP est importante (Alum and Egbon,2011). Pour cela, Moraveji and Naderie ont construit un modèle de ROP qui inclue le WOB, les Gel-10s et Gel-10min, le rapport YP/PV et le ROP. Ils affirment que ces paramètres ont un grand rôle sur le ROP [Moraveji and Naderie, 2016].

Les premiers modèle de ROP développés tiennent compte du RPM, le WOB, la résistance à la compression non confinée UCS et le diamètre de l'outil d [Maurer, 1962].

$$ROP = k \frac{RPM * WOB^2}{d^2 * ucs^2} \quad (III.2)$$

Dans l'équation du ROP figure une constante $k=29434783.7$ qui sera déterminée par la méthode de régression. Ce model présente une faible relation entre le ROP prédit et les données du puits, avec un facteur de corrélation $R=0.03$ et une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage $AAPE=46\%$.

Un autre modèle qu'on peut citer, c'est le modèle de **Bingham**. Il a développé son model en utilisant les paramètres suivants : RPM, WOB et le diamètre de l'outil d, sans tenir compte de la résistance à la compression non confinée UCS et les propriétés du fluide de forage [Bingham, 1965].

$$ROP = k * \left(\frac{w}{d}\right)^a * RPM^b \quad (III.3)$$

Bingham a utilisé la méthode de régression pour déterminer ces constantes :

$k=3.025$; $a=0.020$; $b=0.475$, ce modèle est très faible car le facteur de corrélation R égale à 0.06 et une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage $AAPE=10\%$.

Le model de Bingham est faible car il n'a pas tenu compte de la résistance à la compression non confinée UCS et les propriétés du fluide de forage. En raison de ce faible facteur corrélation R et l'écart de l'erreur absolue, Bourgoyne et Youngs propose une méthode qui est considérée parmi les plus importantes méthodes d'optimisation en forage, car elle est basée sur l'analyse statistique des paramètres de forage passés [Bourgoyne et Youngs, 1975]. Le modèle proposé par ces auteurs tient compte de plusieurs variables, mais il a négligé de la résistance à la compression non confinée UCS et les propriétés du fluide de forage.

$$\frac{d}{dt}(ROP) = e^{(a1 + \sum_i^8 ai * xi)} \quad (III.4)$$

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

Elkatatny explique les détails des constantes a_1, a_i, x_i [Elkatatny, 2017]. Ce model donne un facteur de corrélation $R= 0.15$ et une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage $AAPE=10\%$. Elkatatny conclue que ce modèle est très faible, car il néglige la résistance à la compression non confinée UCS et les propriétés du fluide de forage.

Elkatatny a beaucoup critiqué les modèles de ROP proposés par les autres auteurs, il dit que en se basant sur les revues littéraire il n'ya aucun model de ROP solide qui compile les paramètres hydrauliques et mécaniques [Elkatatny, 2017]. Par conséquent, il développe un modèle puissant du ROP qui tient compte de ces paramètres : WOB, RPM, T, Q, SPP, UCS et les propriétés du fluide de forage en se basant sur les données réelles du forage. Il a utilisé le réseau de neurone artificiel pour construire son modèle qui est :

$$ROP_n = \sum_{i=2}^N w_i \left(\frac{2}{e^{-2(w_{1i,1}RPM + w_{1i,2}\frac{WOB}{Dn} + w_{1i,3}\frac{T}{UCS} + w_{1i,3} + w_{1i,3}\frac{D}{PVn} + w_{1i,3}HP_n + b_{1i})}} \right) + b_2 \quad (III.5)$$

Avec

W: le poids, b: bias

$ROP = 58.6ROP_n + 62.4$ avec ROP_n : ROP normalisé

Les constantes et les fonctions de ce modèle de ROP à partir de l'utilisation de l'ANN sont bien expliquées dans l'article publié par Elkatatny. Ce model donne de très bons résultats tel que le facteur de corrélation $R=0,90$ et une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage $AAPE=4\%$.

Les modèles précédant sont résumées dans le tableau suivant :

Résumé des modèles de ROP

Tableau III.1. Différents modèles du ROP

Auteur	Model de ROP
Graham and Muench	$ROP = C_{for} D^k N^{0.584} WOB$
Maurer	$ROP = k \frac{RPM * WOB^2}{d^2 * ucs^2}$
Bingham	$ROP = k * \left(\frac{W}{d}\right)^a * RPM^b$
Bourgoyne et Youngs	$\frac{d}{dt} (ROP) = e^{(a_1 + \sum_i^8 a_i * x_i)}$
Elkatatny	$ROP_n = \sum_{i=2}^N w_i \left(\frac{2}{e^{-2(w_{1i,1}RPM + w_{1i,2}\frac{WOB}{Dn} + w_{1i,3}\frac{T}{UCS} + w_{1i,3} + w_{1i,3}\frac{D}{PVn} + w_{1i,3}HP_n + b_{1i})}} \right) + b_2$ $ROP = 58.6ROP_n + 62.4$

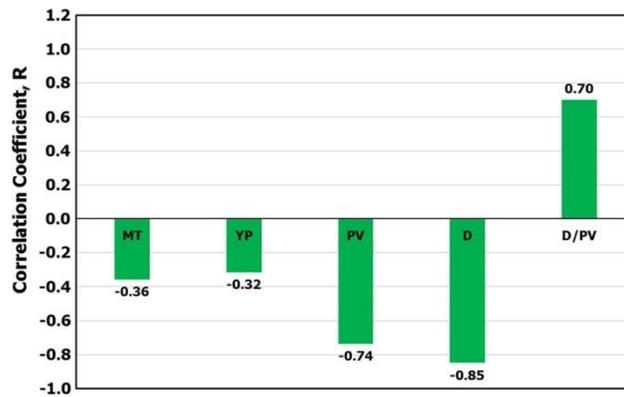


Fig.III.1. influence de différents paramètres sur ROP

1.2- Réseau de neurones artificiels (Artificial Neural Network)

L'une des technologies artificielles (AI) les plus efficaces est le réseau de neurones artificiels ANN (Artificial Neural Network). Ali, J.K. définit l'ANN comme étant un simple système d'éléments qu'on appelle « neurone » connecté en réseau par une architecture de réseau [Ali, J.K. *et al.*, 2009]. Le concept du réseau de neurones artificiels est introduit dans l'Engineering [McCulloch and Pitts, 1943]. Le réseau de neurone artificiel est un outil statistique robuste ANN, il peut être utilisé dans différents domaines de l'industrie. Alvarez Del Casetello affirme que l'ANN n'a besoin d'aucun phénomène physique afin de caractériser un système pour l'étudier [Alvarez Del Casetello *et al.*, 2012].

En consultant les revues de littérature, nous avons constaté que Elkatatny est l'un des auteurs qui ont largement travaillé avec l'intelligence artificielle dans le domaine pétrolier, Elkatatny *et al.*, ont développé une nouvelle corrélation pour la détermination de la perméabilité et le point d'ébullition en utilisant l'ANN [Elkatatny *et al.*, 2016, 2017]. Ils ont aussi appliqué le réseau de neurones artificiels ANN pour déterminer avec une grande précision les propriétés rhéologiques d'une boue KCL- polymère ainsi que les boues à émulsion inverse [Elkatatny *et al.*, 2017, 2017a]. Pour la vitesse d'avancement en forage, Elkatatny a développé un modèle mathématique du ROP, il a utilisé plusieurs paramètres comme données d'entrée : poids sur l'outil WOB, la vitesse de rotation RPM, le débit de refoulement Q, la pression de refoulement SP, le torque T et les propriétés du fluide de forage telles que la densité et la viscosité plastique [Elkatatny, 2017].

Il met en évidence la relation de chaque paramètre avec le ROP en utilisant 1000 points à partir des données des puits déjà forés.

En utilisant la méthode de SaDE-ANN (self-adaptive differential evolution-artificial neural network), il a optimisé le choix de nombre de neurones pour la couche cachée et recommande l'utilisation de 20 neurones, et l'utilisation de la fonction Tan-sigmoïde comme fonction de transfert.

Enfin, il conclut qu'en utilisant les paramètres de forage, les mesures mécaniques de la formation et rhéologiques du fluide de forage pour 3333 points avec la notion de l'ANN que le modèle ANN-ROP peut estimer un ROP avec grande précision, un facteur de corrélation $R=0,90$ et une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage AAPE=4%, et que l'équation empirique de l'ROP est plus performante que les modèles de ROP publiés par

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

(Bingham model, Bourgoyne and Young's model et Maurer). L'équation présente une moyenne de l'erreur absolue en pourcentage de 4% comparant à celle de Bingham model, Bourgoyne and avec 10%.

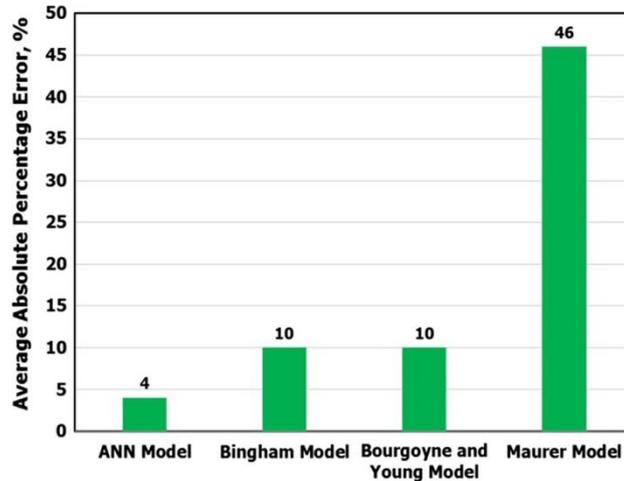


Fig.III.2. Comparaison des modèles de ROP en terme AAPE

2- But du travail

Les performances de forage en terme de ROP dans le champ d'In Amenas sont très modérées, voir faibles, à partir de la cote 300m (Touartine moyen) appartenant au jurassique l'avancement de l'outil de forage deviens très faible, atteignant les 90 min/m (0.011m/min) .suivi par des tirages de dizaines de tonnes ainsi que des backreaming.

L'objectif de l'étude que nous menons est de comprendre l'influence de différents paramètres de forage, hydraulique et rhéologique sur l'avancement du forage ROP.

Ensuite nous modélisons le ROP en fonction de ces paramètres et faire sortir une équation mathématique en l'a programmant sur MATLAB, ce qui nous permettrait de prédire les valeurs du ROP.

Par conséquent, nous pourrions définir les paramètres optimaux à appliquer pour obtenir un meilleur avancement afin de réduire les temps non productifs NPT, ce qui implique la réduction du prix de revient du mètre foré.

3- Méthodologie du travail

Nous avons collecté les données de 27 puits du champ d'In Amenas y compris notre puits candidat HOUA-1, ensuite nous avons sélectionné les paramètres mécaniques de forage (**WOB, RPM, TRQ**), hydraulique (**SPP, FLW**) ainsi que les paramètres rhéologiques (**MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10, FLTR**) de la boue. Afin d'analyser leur influence sur l'avancement de l'opération de forage ROP nous avons utilisé le logiciel IBM SPSS pour faire sortir la matrice de corrélation. Nous programmerons l'algorithme de la méthode de réseau de neurones ANN sur MATLAB, mais il est difficile de l'optimiser donc nous essayons de trouver une meilleure combinaison entre le nombre de couches

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

cachées (hidden layer) et nombre de nœud à utiliser, nous mettrons 70% des données des 27 puits pour l'apprentissage de la machine.

Puis, nous avons utilisé le Réseau de Neurones Artificielle et les statistiques multivariées comme méthodes d'analyse et modélisation.

Une fois le ROP est modélisé, nous le testerons sur 30% des données des 27 puits. Lorsque nous trouvons une erreur quadratique moyenne (mean square error mse), une erreur absolue et un facteur de corrélation R optimaux, nous arrêtons le test.

Après que le model soit testé, en supposant que la formation est homogène, nous extrayons une nouvelle fonction pour la prédiction de ROP basée sur les paramètres suivants : WOB, RPM, TRQ, SPP, FLW MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10, FLTR.

La figure ci-dessous montre les étapes à suivre dans cette analyse :

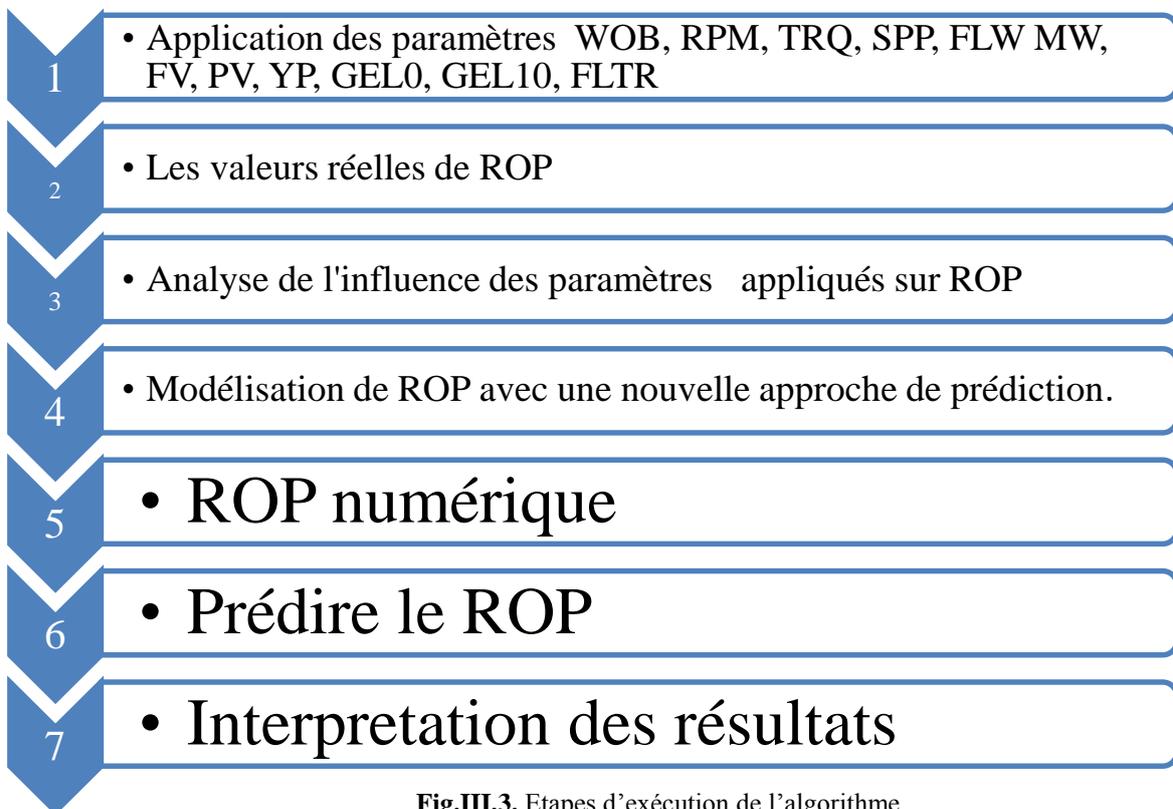


Fig.III.3. Etapes d'exécution de l'algorithme

4- Présentation des logiciels utilisés

Pour appuyer notre étude nous avons utilisé les logiciels suivants : IBM SPSS, MATLAB et Excel.

4.1- IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) version 26.0.0.0

Les logiciels IBM SPSS® offrent des fonctions avancées d'analyse statistique et prévisionnelle, une vaste bibliothèque d'algorithmes d'apprentissage automatique, l'analyse descriptive, l'extensibilité open source, l'intégration au Big Data et un déploiement transparent dans les applications. Sa facilité d'utilisation, sa souplesse et son évolutivité

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

font d'IBM SPSS une solution accessible aux utilisateurs quel que soit leur niveau de compétences. Nous l'avons utilisé pour l'établissement de la matrice de corrélation et l'analyse statistique des données de différents paramètres influant sur le ROP.

4.2- MATLAB 2015

Nous avons utilisé MATLAB pour programmer l'algorithme de la méthode neuronal (ANN), et établir un modèle numérique de ROP.

4.3-Excel 2007

Nous l'avons utilisé pour l'analyse statistique des données de différents paramètres influant sur le ROP.

5-Traitement et analyse des données

Nous allons collecter et traiter les données de 27 puits, ensuite nous faisons des analyses pour arriver la conclusion et déductions.

5.1- Collecte des données

Nous avons collecté les données de 27 puits de la phase verticale 16'' du champ d'ILLIZI y compris notre puits pilot HOUA-1, ensuite nous avons sélectionné dans un fichier Excel les paramètres mécaniques de forage (**WOB, RPM, TRQ**), hydraulique (**SPP, FLW**) ainsi que les paramètres rhéologiques (**MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10, FLTR**) de la boue.

Le tableau suivant donne l'ensemble des paramètres mécaniques et hydrauliques du forage :

Tableau III.2. Paramètres mécaniques et hydrauliques

Puits	ROP	WOB(T)	RPM	TRQ	FLW	SPP
AMA69	32,2	5	115	4000	2450	825
AMA73	15,71	6	85	3450	2375	750
AMA74	29,4	5,5	80	5050	2470	780
AMA75	24,45	6	84	5555	2515	850
AMA76	25,97	7,5	76	4500	3550	575
AMA77	34,29	4,5	100	1450	2450	817
ODN-6	22,89	4,3	90	1600	2410	905
TFN-6	17,9	6,5	95	2185	2560	1235
TFN-20	30,08	4,5	85	440	2225	800
TFNW-20	34,36	8,5	100	4935	2010	930
TFNW-28	47,09	6	85	3580	2670	1125
TFT-117	30	7	90	600	2200	950
AMA-72	26	6,5	89	1105	2150	830
AMA 67	19	5,15	110	800	2800	1500

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

AMA 70	11,25	3,5	105	1200	2700	1100
AMA 78	7,31	10,5	40	3000	2800	1300
ORTN01	12	2,7	90	2300	2600	400
TFN 19	1,05	8,5	85	4520	2600	1150
TFN 20	13,77	8,5	100	2130	2600	1350
TFNW 24	18,4	55,5	95	1456	2200	1025
TFNW 17	9,66	9	125	2225	2600	1350
TFNW 25	16	12	105	950	2850	1750
TFT 118	18,66	11	80	1230	2600	1200
TFNW 23	17,91	10	100	500	2000	850
TFT 469	16,8	10	65	1222	2800	1400
TFT 471	14,91	8,5	80	856	2600	1600
TFT 475	18	9	75	900	2500	1700

Les paramètres rhéologiques sont

Tableau III.3. Paramètres rhéologiques

	MW	FV	PV	YP	GEL	GEL	FILTR
AMA73	1,05	50	15	15	12	16	6
AMA74	1,05	51	16	14	11,5	13,5	5
AMA75	1,05	54	18	18	15	18	6
AMA76	1,06	35	17	16	11	16	4
AMA77	1,06	52	18	14	11	14	5
ODN-6	1,06	52	16	14	10,5	5	6,5
TFN-6	1,06	51	16	14	13	16	6
TFN-20	1,06	52	24	14	12	14	8
TFNW-20	1,05	70	17	19	13	16	4,8
TFNW-28	1,05	48	17	14	13	14	8
TFT-117	1,02	51	23	14	11	16	5
AMA-72	1,05	66	17	17	12	15	3
AMA 67	1,05	51	17	17	11	13	5
AMA 70	1,07	50	14	14	14	16	6
AMA 78	1,05	59	15	15	12	16	5
ORTN01	1,05	80	10	42	2	29	14
TFN 19	1,05	53	7	47	25	32	9
TFN 20	1,05	47	17	14	12	14	8
TFNW 24	1,05	50	16	14	13	15	8
TFNW 17	1,07	52	16	16	14	18	8
TFNW 25	1,05	47	12	14	9	12	7
TFT 118	1,2	63	23	21	12	16	2,8
TFNW 23	1,05	50	16	14	11	13	8
TFT 469	1,05	55	18	16	9	11	2,8

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

TFT 471	1,05	50	18	14	5	6	3,4
TFT 475	1,06	55	20	15	11	27	4

5.2- Influence de différents paramètres sur ROP

Nous allons calculer le facteur de corrélation R entre ROP et chaque paramètre afin d'analyser son degré d'influence sur ROP.

5.2.1- Facteur de corrélation R

La littérature mentionne que le coefficient de corrélation R de Bravais-Pearson est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Ce coefficient varie entre -1 et +1 ; l'intensité de la relation linéaire sera donc d'autant plus forte que la valeur du coefficient est proche de +1 ou de - 1, et d'autant plus faible qu'elle est proche de 0.

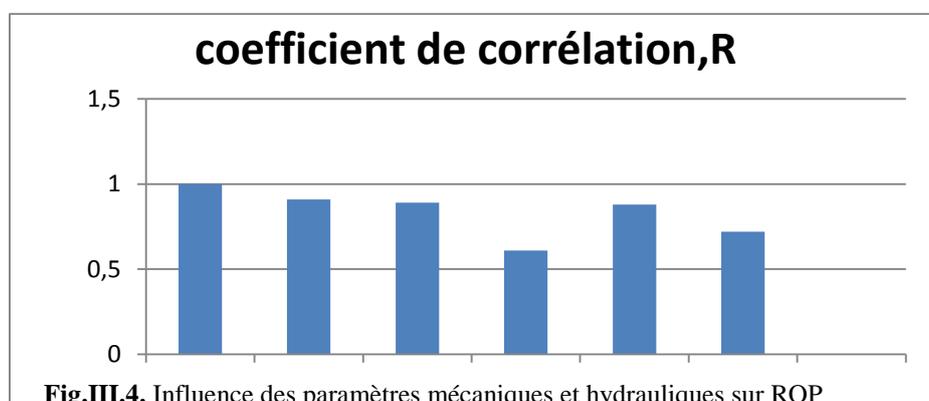
5.2.2- Influence des paramètres mécaniques et hydrauliques sur ROP

En utilisant le logiciel IBM SPSS, nous allons déterminer les facteurs de corrélation R, entre ROP et les paramètres WOB, RPM, TRQ, SPP, FLW. Nous avons Déterminé des facteurs de corrélation, R. Les résultats obtenus sont représentés dans le Tableau-2 ci-dessous :

Tableau III.4. Facteurs de corrélation R avec le ROP

	ROP	WOB	RPM	TRQ	FLW	SPP
ROP	1	0.91	0.89	0.61	0.88	0.72

Nous traçons l'histogramme des coefficients de corrélation pour mettre en évidence l'Influence des paramètres mécaniques et hydrauliques sur ROP.



- **Discussion des résultats**

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

En consultant les revues de littérature, [Moraveji and Naderi 2016] affirme que la relation entre le WOB, RPM et le ROP est une relation directe.

Les facteurs de corrélation (ROP-paramètre) calculés par [Elkatatny 2017] sur son échantillon sont : ROP-WOB=0.95, ROP-RPM=0.91, ROP-TRQ=0.86, ROP-FLW=0.92, ROP-SPP=0.85. donc il appuie le résultat de Moraveji and Naderi.

Cela nous ramène a confirmer nos résultats - facteurs de corrélation (ROP-paramètre) - ROP-WOB=0.91, ROP-RPM=0.89, ROP-TRQ=0.61, ROP-FLW=0.88, ROP-SPP=0.72.

Nous pouvons conclure que la relation entre ROP et les paramètres WOB, RPM, TRQ, SPP, FLW, est une relation linéaire et croissante, c'est-à-dire que les variables varient dans le même sens.

5.2.3- Influence des paramètres rhéologiques sur ROP

Nous allons étudier l'influence des paramètres rhéologiques sur ROP, en utilisant le logiciel IBM SPSS, nous déterminerons les facteurs de corrélation R, entre ROP et les paramètres MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.5. Facteurs de corrélation des paramètres rhéologiques

	ROP	MW	FV	PV	YP	GEL0	GEL10	FLTR
ROP	1	-0.80	-0.42	-0.71	-0.33	0.08	-0.32	-0.33

Nous traçons l'histogramme des coefficients de corrélation pour mettre en évidence l'influence des paramètres rhéologiques sur ROP.

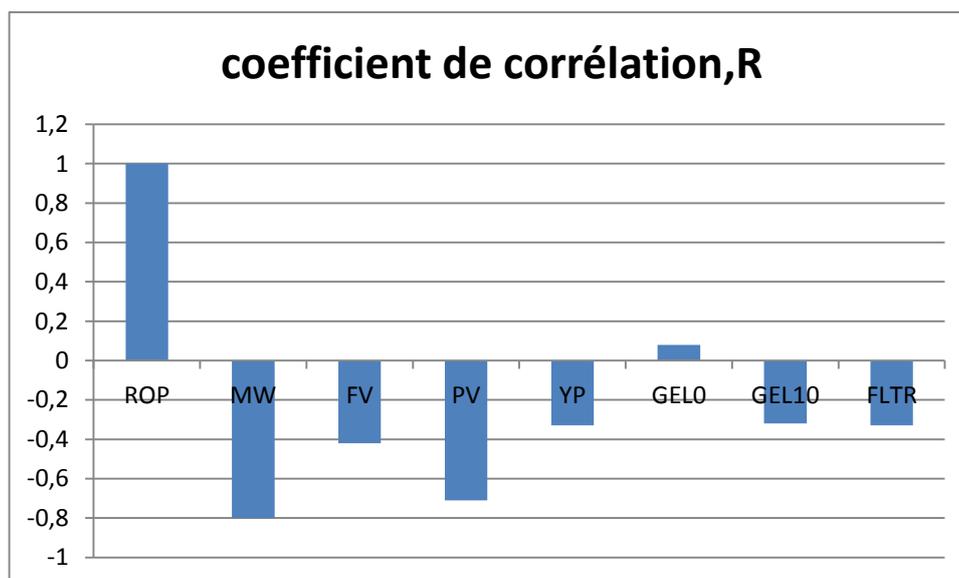


Fig.III.5. Influence des paramètres rhéologiques sur ROP

- **Discussion des résultats**

Pour mieux comprendre l'influence des paramètres rhéologique sur ROP, avons consulté les revues de littérature. [Paiaman et al. 2009] n'illustrent que l'augmentation de la densité et de la présence des solides dans le fluide de forage fait diminuer ROP. Moraveji and Naderi construisent leur modèle de ROP en incluant la MW, PV et YP qu'ils estiment important. Les facteurs de corrélation (ROP-paramètre) calculés par Elkatatny sur son échantillon sont : ROP-MW=-0.85, ROP-FV=-0.36, ROP-PV=-0.74, ROP-YP=-0.32.

En revanche, Alum et Egbon indiquent que les propriétés rhéologiques ont une influence minime sur ROP [Alum et Egbon, 2011].

Cela nous ramène à confirmer nos résultats - facteurs de corrélation (ROP-paramètre) - ROP-MW=-0.80, ROP-FV=-0.42, ROP-PV=-0.71, ROP-YP=-0.33 ROP-GEL0=0.08, ROP-GEL10=-0.32, ROP-FLTR=-0.33, qu'ils sont proche aux résultats trouvés par les auteurs précédents.

Nous pouvons distinguer des coefficients de corrélation négatifs (ROP-MW, ROP-FV, ROP-PV, ROP-YP, ROP-FLTR ROP,-GEL10), et un coefficient positif (ROP-GEL0).

Nous pouvons distinguer aussi qu'il y a des coefficients de corrélation de faibles valeurs (ROP-GEL10=-0.32, ROP-FLTR=-0.33), un coefficient medium ROP-FV=-0.42 et un coefficient proche de 0 qui est ROP-GEL0=0.08.

- **Conclusion**

Nous pouvons conclure que la relation entre (ROP) et les différents paramètres rhéologiques est plus au moins forte.

- La relation entre la densité MW, la viscosité plastique (PV) et (ROP) est une forte liaison, la relation linéaire entre les deux caractères est décroissante, les variables varient dans le sens contraire.
- La relation entre la gel10 (GEL10), la viscosité (FV), le filtrat (FLTR) et (ROP) est une liaison modérée, la relation linéaire entre les deux caractères est décroissante, les variables varient dans le sens contraire.
- Le gel0 (GEL0) a un effet minime sur l'ROP, la relation linéaire entre les deux caractères est croissante

6- Matrice de corrélation

La matrice de corrélation est un outil statistique puissant pour l'analyse statistique, nous allons la déterminer afin analyser l'influence de différents paramètres entre eux et sur ROP.

6.1- Définition

Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

C'est une mesure de la liaison linéaire, c'est à dire de la capacité de prédire une variable x par une autre y à l'aide d'un modèle linéaire. Il permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux caractères quantitatifs. C'est donc un paramètre important dans l'analyse des régressions linéaires (simples ou multiples). En revanche, ce coefficient est nul ($r = 0$) lorsqu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables (ce qui n'exclut pas l'existence d'une relation autre que linéaire). Par ailleurs, le coefficient est de signe positif si la relation est positive (directe) et de signe négatif si la relation est négative (inverse). Ce coefficient varie entre -1 et +1 ; l'intensité de la relation linéaire sera donc d'autant plus forte que la valeur du coefficient est proche de +1 ou de -1, et d'autant plus faible qu'elle est proche de 0.

- Une valeur proche de +1 montre une forte liaison entre les deux caractères. La relation linéaire est ici croissante (c'est-à-dire que les variables varient dans le même sens).
- Une valeur proche de -1 montre également une forte liaison mais la relation linéaire entre les deux caractères est décroissante (les variables varient dans le sens contraire).
- Une valeur proche de 0 montre une absence de relation linéaire entre les deux caractères.

6.2- Etablissement de la matrice de corrélation

En utilisant le logiciel IBM SPSS, nous déterminerons la matrice de corrélation :

Tableau III.6. Matrice de corrélation des différents paramètres

	ROP	WOB	RPM	TRQ	FLW	SPP	M W	FV	PV	YP	G E L 0	GE L10	F L T R
ROP	1,00												
WOB	0,91	1,00											
RPM	0,89	-0,01	1,00										
TRQ	0,61	-0,13	-0,16	1,00									
FLW	0,88	-0,17	-0,25	0,18	1,00								
SPP	0,72	0,13	0,06	-0,35	0,23	1,00							
MW	-0,80	0,17	0,21	-0,23	0,22	0,44	1,00						
FV	-0,42	0,00	-0,39	-0,41	0,02	0,14	0,18	1,0					
PV	-0,71	0,03	0,04	-0,01	0,02	0,33	0,29	-0,1	1,0				
YP	-0,33	-0,06	-0,40	0,00	0,10	-0,21	0,06	0,5	-0,6	1,0			
GEL0	0,08	-0,03	0,39	0,05	-0,14	-0,43	0,05	-0,3	-0,2	0,2	1,0		
GEL10	-0,32	0,04	-0,32	0,08	0,12	-0,03	0,01	0,4	-0,4	0,8	0,4	1,0	
FLTR	-0,33	0,16	-0,29	0,25	0,08	-0,02	-0,2	0,2	-0,5	0,5	0,0	0,4	1

6.3- Analyse et interprétation de la matrice de corrélation

Pour l'interprétation de la matrice, nous s'intéressons aux combinaisons facteurs de corrélation (ROP-paramètre).le tableau suivant

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

Tableau.III.7. Analyse et interprétation de la matrice de corrélation

Combinaison	R	Interprétation
ROP-WOB	0.91	Lien fort direct, le WOB favorise la pénétration de l'outil dans la roche.
ROP-RPM	0.89	Lien fort direct, la rotation contribue à la destruction de la roche.
ROP-TRQ	0.61	Lien fort direct, le torque contribue à la destruction de la roche.
ROP-FLW	0.88	Lien fort direct, le débit contribue au nettoyage des déblais donc il contribue à l'avancement.
ROP-SPP	0.72	Lien fort direct, le débit contribue au nettoyage des déblais donc il contribue à l'avancement.
ROP-MW	-0.80	Lien fort inverse, la diminution de la densité aide l'arrachement des déblais donc l'outil avance plus rapidement.
ROP-FV	-0.42	Une viscosité élevée s'oppose à la rotation de la garniture donc à l'outil, ce qui fait ralentir l'avancement.
ROP-PV	-0.71	Lien fort inverse, la viscosité plastique indique la présence des solides dans la boue, ces derniers ralentissent l'avancement de l'outil.
ROP-YP	-0.33	Lien modéré inverse, le yield point est nécessaire pour remonter les déblais en surface mais fait diminuer le ROP.
ROP-GEL0	0.08	Lien très faible direct,
ROP-GEL10	-0.32	Lien modéré inverse, l'outil fournit une énergie de plus pour casser le gel, donc ce dernier ralentit l'avancement.
ROP-FLTR	-0.33	Lien modéré inverse, la filtration mouille la roche argileuse en la transformant à une roche pâteuse, cette dernière ralentit l'avancement.

Nous pouvons dire à partir de la matrice de corrélation, qu'il existe des interactions plus au moins fortes entre les paramètres de forage. En effet, nous pouvons remarquer que le facteur de corrélation R indique une relation entre les paramètres de forage des 27 puits.

7- Intelligence artificielle en forage

L'intelligence artificielle est largement utilisée dans le domaine pétrolier [Elkatatny, 2017] notamment pour traiter les problèmes de forage tels que : l'avancement de l'opération de forage ROP, problèmes de vibration, coincements, etc.

Pour l'étude de notre cas qui est la modélisation et la prédiction de la vitesse d'avancement, nous avons eu recours à son utilisation.

7.1- Définition

La littérature définit l'intelligence artificielle (IA, ou AI en anglais pour Artificial Intelligence) comme étant la mise en œuvre de certains nombres de techniques visant à permettre aux machines d'imiter une forme d'intelligence réelle.

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

La notion voit le jour dans les 1950 grâce au mathématicien Alain Turing. Dans son livre Computing Machinery and intelligence, ce dernier soulève d'adopter aux machines une forme d'intelligence.

L'intelligence artificielle vise à mimer le fonctionnement du cerveau humain, ou de moins sa logique lorsqu'il s'agit de prendre des décisions.

7.2- Réseau de neurones artificiels RNA

Pour notre étude nous avons opté pour utiliser la méthode neuronale qui est une forme d'intelligences artificielle.

7.2.1- Définition

Les réseaux de neurones artificiels (ou ANN en anglais pour Artificial Neural Network) est une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes. [R. Hecht Nielsen, 1990] définit le réseau de neurones comme étant un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe.

Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain [McCulloch et Pitts, 1943] en se basant principalement sur le concept des neurones. Il s'agit d'un modèle numérique non linéaire. Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique.

7.2.2- Architecture du réseau de neurones artificiels

L'architecture du réseau de neurones artificiels est inspirée du réseau des neurones du cerveau humain, il est organisé en couches, chacune de ces couches comporte plusieurs neurones. L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Chacun de ces neurones qui se présente comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

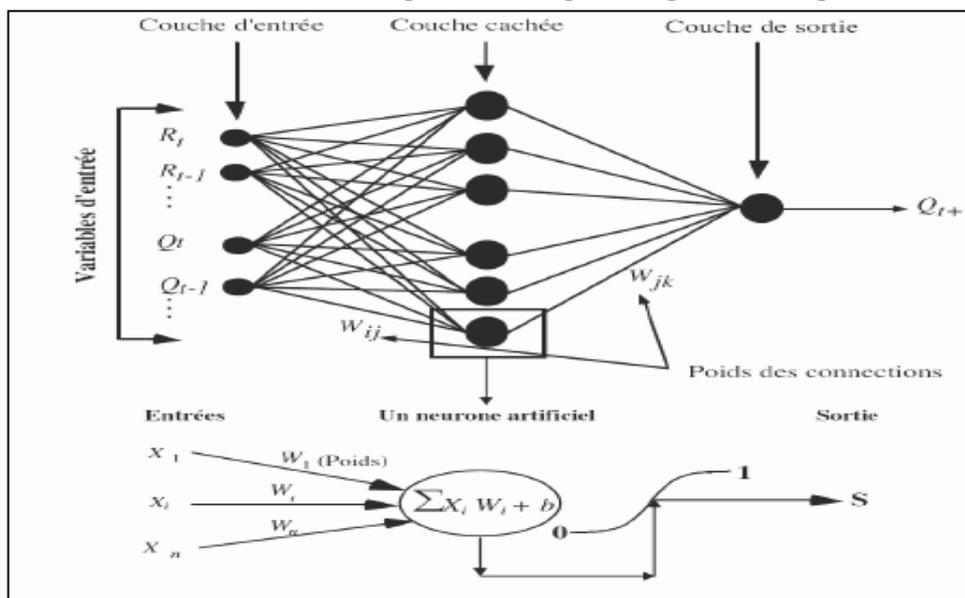


Fig.III.6. Architecture du réseau de neurones artificiels

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

Le réseau de neurones utilisé dans notre étude est un réseau à trois parties : une couche d'entrée qui recevra les données sources que l'on veut utiliser pour l'analyse, une (deux ou trois) couche cachée constituée par l'ensemble de neurones des sorties de la couche d'entrée et une couche de sortie qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données d'entrée dans la première couche.

7.2.3- Perceptron multicouche PMC

Nous pouvons distinguer plusieurs types d'agencements possibles de neurones artificiels [Lippmann, 1987] mais le type de réseau le plus utilisé pour la prédiction de phénomènes technique est le perceptron multicouche (PMC). Ce réseau comporte une couche de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle. Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}).

A chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie. L'avantage du perceptron multicouche (PMC), c'est qu'on peut contenir autant de couches cachées que l'on désire.

7.3- Nouvelle approche pour la prédiction du ROP

Pour étudier et modéliser le ROP, nous allons utiliser la méthode neuronale pour développer une équation mathématique afin de prédire les valeurs de ROP des prochains forages.

L'analyse de la matrice de corrélation nous a permis de déterminer le degré d'importance de différents paramètres sur l'avancement de l'opération de forage. Pour optimiser ces paramètres afin d'obtenir un meilleur ROP. Nous allons construire un modèle multicouche (MLP) avec comme entrées les paramètres mécaniques, hydrauliques et rhéologiques, et comme sortie est la vitesse d'avancement (ROP).

7.3.1- Construction du réseau de neurone

Pour la construction de notre réseau de neurone, nous allons utiliser les données des 27 puits. Les paramètres utilisés sont les suivants : le poids sur l'outil(WOB), la vitesse de rotation(RPM) , le torque (TRQ) , la pression de refoulement (SPP), le débit d'injection (FLW), la densité de la boue (MW),la viscosité (FV), la viscosité plastique (PV), la yeild point(YP),le gel0 (GEL0), le gel10 (GEL10),le filtrat de boue (FLTR).

Les données seront réparties en trois pourcentage : 70% pour l'apprentissage, 30% pour le teste, 0% pour la validation. Les données d'entrées et de sortie doivent être normalisées pour être utilisées dans la construction du modèle.

7.3.2- Développement du modèle mathématique du ROP

L'équation mathématique est extraite du réseau de neurones, sachant que ces derniers sont des cellules de calcul, transforment toutes les données dans un intervalle de -1 à +1, ce sont des valeurs normalisées à travers une fonction de transfert.

Le neurone de la couche cachée lui-même capte l'information et la transforme en valeurs normalisées via les poids (w_{jk}).

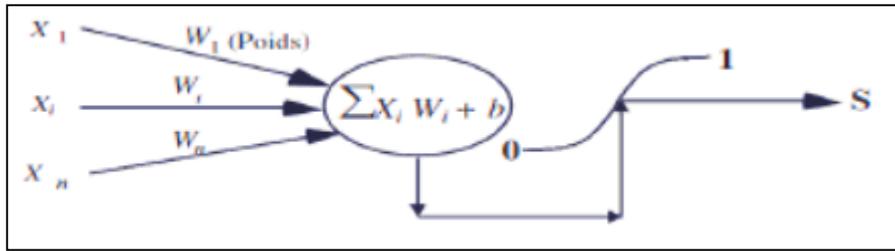


Fig.III.7. Fonctionnement d'un neurone, x_n : Paramètres d'entrée, W_n : Le poids, b : Biais, S : Sortie

Pour bien expliquer la démarche de la construction de l'équation du modèle, nous allons suivre les étapes ci-dessous :

7.3.3- Fonction de transfert utilisée

La fonction de transfert utilisée dans notre réseau est Log-sigmoid, l'expression mathématique est : $f(x) = \frac{e^x}{1+e^x}$ qui donne des valeurs dans l'intervalle $[0,1]$. Sa syntaxe en MATLAB est `f=logsig(x)`

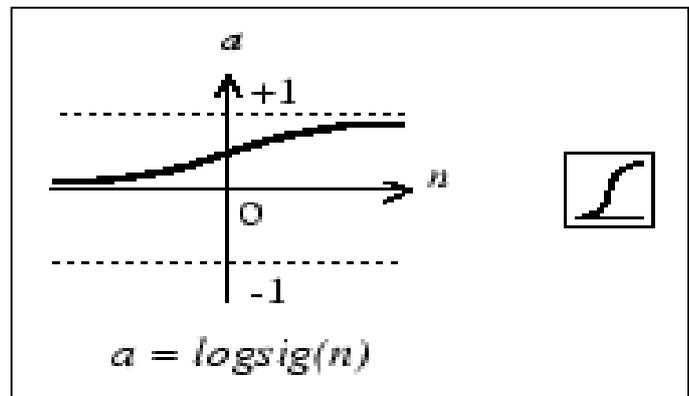


Fig.III.8. Fonction de transfert Log-sigmoid

7.3.4- Fonction de ROP normalisé

La fonction de ROP normalisée est une linéarisation de tout le système, c'est la somme de toutes les fonctions de transfert des douze (12) paramétrés étudiés, plus une constante pour la linéarisation. Toutes les valeurs d'entrée et de sortie sont normalisées, elles sont comprises dans l'intervalle $[-1 ; +1]$.

$$ROP_n = [\sum_{i=1}^{12} (f(\sum_{j=1}^m x_i w_{1ij} + b_{1i})) w_{2i}] + b_2 \quad (III.6)$$

Avec : ROP_n = ROP normalisé, x_n : Paramètres d'entrée, W_n : Le poids, b : Biais.

- **Fonction de ROP non normalisée**

Nous avons l'expression suivante de ROP normalisé :

$$ROP_n = \frac{ROP - ROP_{min}}{ROP_{max} - ROP_{min}}, \text{ ce qui nous donne le terme ROP}$$

$$ROP = ROP_n (ROP_{max} - ROP_{min}) + ROP_{min}$$

Avec :

ROP_n : ROP normalisé

ROP_{min}(m/h): ROP minimal = 1.05

ROP_{max}(m/h): ROP maximal = 47.09

Donc notre fonction linéaire de ROP est : **ROP = 46.04 ROP_n + 1.05** (III.7)

7.5- Elaboration d'un algorithme pour le modèle mathématique développé du ROP

Afin de faciliter les calculs des ROP_n, nous avons élaboré un algorithme que nous appliquerons sur le logiciel MATLAB, et déduire la matrices des poids et biais.

7.5.1- Import des données et déclaration des entrées

Les valeurs des paramètres mécaniques de forage (WOB, RPM, TRQ), hydraulique (SPP, FLW) ainsi que les paramètres rhéologiques (MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10, FLTR) sont organisées dans un fichier Excel, nous les appellerons par suite au programme MATLAB.

```
clear all
clc
% Importer les données du fichier EXCEL
input=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','C2:N27');
target=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','B2:B27');
depth=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','O2:O27');
ROPPUITS=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','P2:P27');
input = transpose(input);
target = transpose(target);
depth = transpose(depth);
```

7.5.2- Création du réseau de neurones

Après la déclaration des variables d'entrées, nous procédons à la création du réseau.

7.5.2.1- Choisir le nombre de couches cachées

En général, pour limiter le temps de calcul et surtout lorsque les résultats sont en général satisfaisants, c'est un réseau à une seule couche cachée qui est utilisé. L'addition d'une couche cachée ne diminue pas forcément l'erreur mais peut déclinier la performance et la convergence du modèle, donc pour notre cas nous choisissons une seule (01) couche cachée.

```
% creation du réseaux de neurone
%donner une condition d'arret s
%compteur cp
s=2019;
cp=0;
while s==2019
    %choisir le nombre de couches
    v1=randi([7 30],1,1);
    %v2=randi([7 30],1,1);
    %v3=randi([7 30],1,1);
```

Pour le nombre de neurone à utiliser dans la couche cachée, [Elkatatny. 2019] déclare que le nombre optimal égale à vingt (20) neurones, pour notre cas nous choisissons un intervalle [7 ; 30].

7.5.2.2- Critère de convergence

Nous choisissons l'erreur quadratique (mean sequare error mse) comme condition d'arrêt,

$$mse < 0.9, \text{ sachant que l'erreur quadratique } mse = \frac{\sum (ROP_{preel} - ROP_{modele})^2}{\text{nombre de puits}} \quad (\text{III.8})$$

```
%choisir l'erreur
if mse < 0.9
    s = 1;
```

7.5.2.3- Calage du modèle

Nous avons choisi trois partitions différentes de la base de données qui seront pour la simulation. La base de données a été divisée en trois phases afin d'éviter le sur-apprentissage : une phase d'apprentissage (Training) (70% de données), une phase de validation (Vérification) (00% de données) et une phase de test (Testing) (30%).

```
trainFcn = 'trainlm';
net = fitnet([v1], trainFcn);
net = configure(net, input, target);
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 0/100;
net.divideParam.testRatio = 30/100;
net.trainparam.epochs = 100;
net.trainparam.max_fail = 100;
net.trainparam.goal = 0.000002;
net.trainparam.lr = 0.5;
```

Et pour la fonction de transfert, nous choisissons la fonction Log-sigmoid.

```
%choisir la fonction de transfert,
net.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
%net.layers{2}.transferFcn = 'logsig';
%net.layers{3}.transferFcn = 'logsig';
```

7.5.2.4- Génération de la fonction ROP

Enfin, nous obtiendrons la fonction de ROP que nous pouvons exécuter sur l'espace de travail de MATLAB.

```
% obtenir la fonction
genFunction(net, 'ROP', 'MatrixOnly', 'yes')
```

7.6- Simulation du modèle mathématique

Nous allons simuler le modèle en appliquant l'algorithme de la fonction sur MATLAB.

7.6.1- Apprentissage du simulateur

Nous avons le nombre des entrées égale à douze (12), et la sortie égale à un (1) qui est le ROP. Le simulateur a trouvé une meilleure combinaison pour la couche cachée qui est une combinaison de 28 neurones.

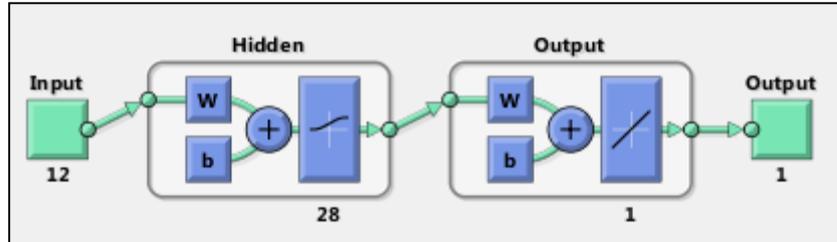


Fig.III.9. Combinaison de neurones

Nous avons choisi 70% des données d'entrées comme base d'apprentissage, le simulateur nous a donné un facteur de corrélation égale à un (01) $R=1$.



Fig.III.10. Test d'apprentissage

7.6.2- Performance de la simulation

Pour le test du modèle, nous avons choisi 30% des valeurs de ROP réel sur lesquelles le simulateur effectuera son test. Le simulateur a donné un facteur de corrélation $R=0.9583$.

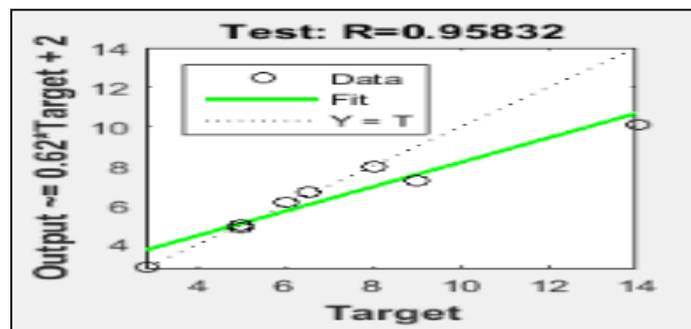


Fig.III.11. Facteur de corrélation du test

Sur vingt(20) neurones, le simulateur nous a tracé un histogramme d'erreur entre le ROP réel et simulé pour l'apprentissage et le test du modèle. La meilleure performance pour l'apprentissage, nous l'avons enregistré au niveau de la cinquième (5ème) période.

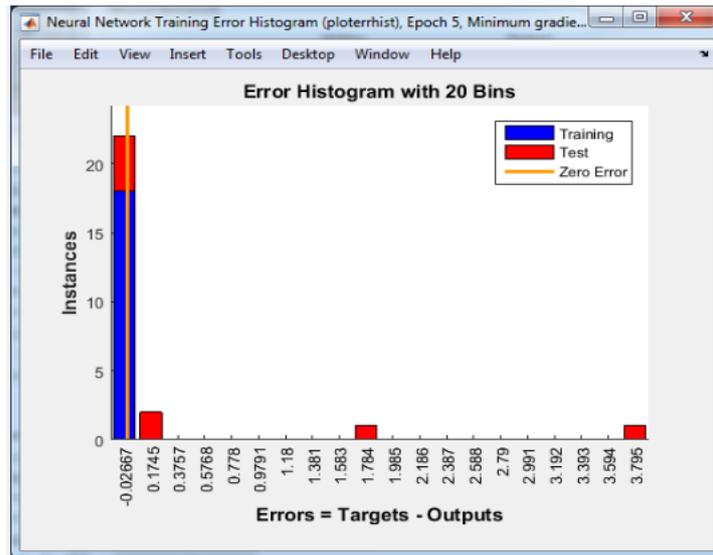


Fig.III.12. Histogrammes de l'erreur

7.7.3-Résultats de la simulation

Nous avons trouvé un facteur de corrélation R du modèle égale à 0.9542, qui est très acceptable. Nous avons trouvé aussi une erreur quadratique (mse) égale à 0.7041, et une erreur absolue(AARD) égale à 6.6%.

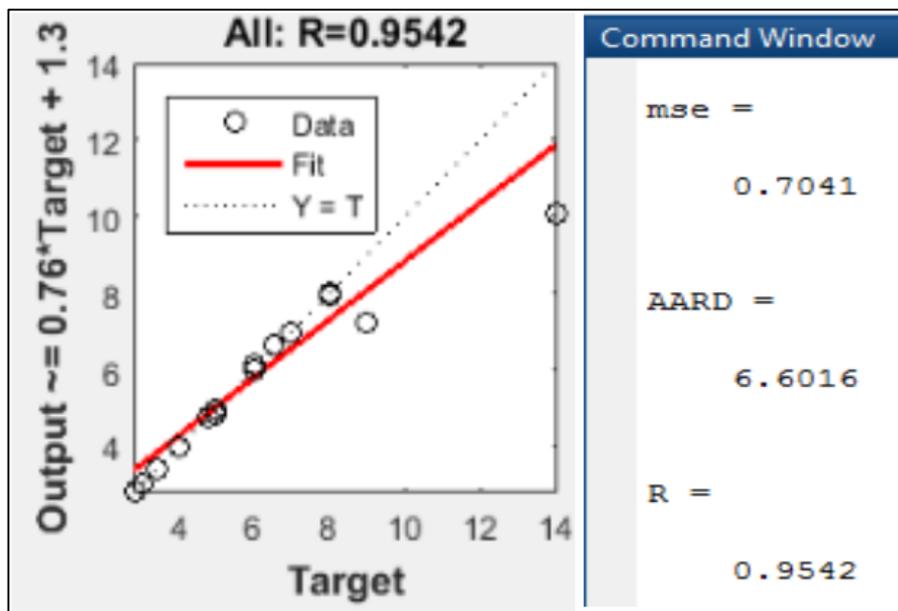


Fig.III.13. Résultats de la simulation

7.7-4 Numérisation de la fonction ROP

Nous avons trouvé auparavant l'équation mathématique de ROP normalisé (III.6) qui est :

$$ROP_n = [\sum_{i=1}^{12} (f(\sum_{j=1}^{28} x_i w_{1ij} + b_{1i}))w_{2i}] + b_2 \quad (III.10)$$

Développement d'une nouvelle approche en utilisant l'intelligence artificielle pour la prédiction du ROP de la phase 16'' dans le champ d'ILLIZI

Ainsi que ROP non normalisé (III.2) qui est $ROP = 46.04 ROP_n + 1.05$ et pour plus de précision, nous utiliserons l'expression suivante : $ROP = \frac{ROP_n + Y_{min}}{gain} + Offset$ (III.11)

Avec les valeurs de Y_{min} , gain et offset sont calculées par le simulateur :

```
% Output 1
y1_step1_ymin = -1;
y1_step1_gain = 0.178571428571429;
y1_step1_xoffset = 2.8;
```

$$\text{Donc : } ROP = \frac{ROP_n + 1}{0.178} + 2.8 \quad (III.12)$$

Donc, nous allons organiser les poids entre les entrées et la couche cachée (w_1), poids entre la couche cachée et les sorties (w_2), ainsi que les bias d'entrée (b_1) et de sortie (b_2). (Voir annexe)

En résumé ce modèle n'est applicable que si les valeurs des paramètres respectent les intervalles suivants.

Tableau III.8. Intervalles des valeurs

	ROP	WO B	RP M	TRQ	FLW	SPP	MW	FV	PV	YP	GEL 0	GEL 10	FILT R
min	1,05	2,7	40	440	2000	400	1,02	35	7	14	2	5	2,8
max	47,1	55,5	125	5555	3550	1750	1,2	80	24	47	25	32	14

7.8- Comparaison de ROP réel et ROP prédit pour le Puits HOUA-01

Nous allons comparer le ROP réel et ROP prédit pour le Puits HOUA-01, en appliquant le modèle mathématique.

7.8.1- Analyse et interprétation

Nous allons tracer les deux allures celle de ROP réel et celle de ROP prédit par le modèle mathématique, les valeurs trouvées sont classées dans un tableau (voir annexe):

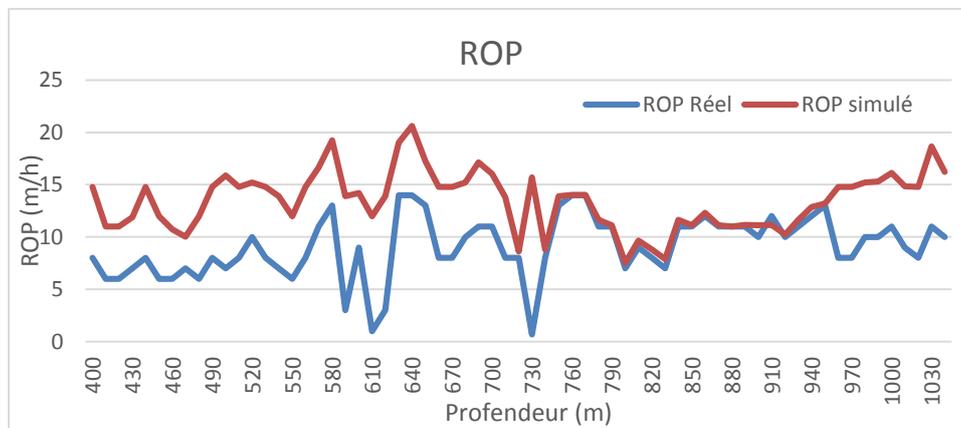


Fig.III.14. Comparaison entre ROP réel et prédit

Nous remarquons que les deux allures sont similaires, avec un décalage significatif.

Nous allons aussi tracer la droite de régression et déterminer le facteur de corrélation entre ROP réel et prédit :

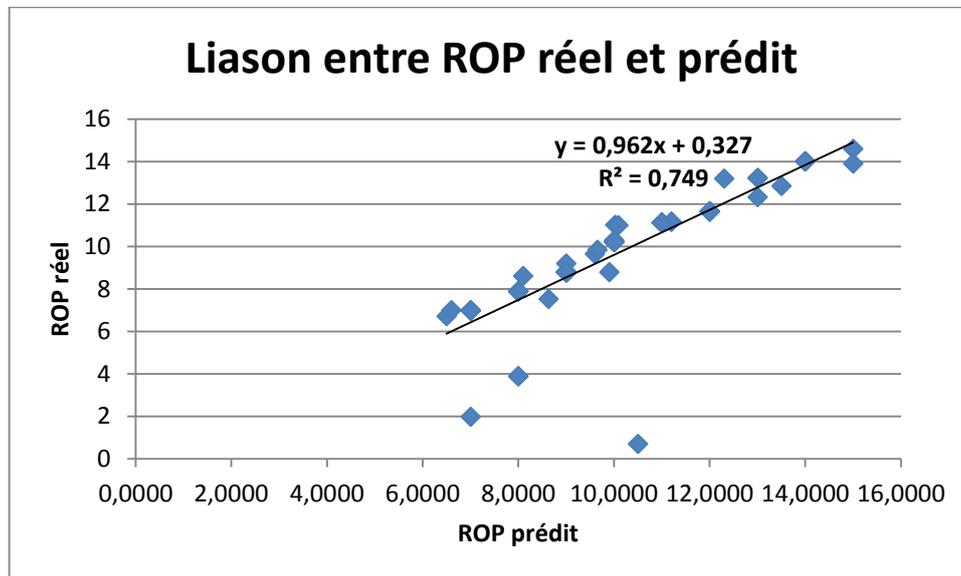


Fig.III.15. Droite de la régression linéaire entre ROP réel et prédit

A partir des résultats représentés dans la figure ci-dessus, nous avons trouvé un facteur de corrélation $R^2=0.749$ qui proche de l'unité et une équation linéaire entre les deux ROP qui $y = 0,962x + 0,327$.

7.8.2- Discussion

Au regard des résultats obtenus dans l'application du modèle sur les 27 puits d'apprentissage et de validation nous avons confirmé que notre modèle été précis avec un coefficient $R= 0.954$, cependant le décalage observé entre le ROP réel et le ROP prédit prouve que avec paramètres de forage appliquer on pourrait générer un ROP qui pourrait dépasser les 20 m/h, hors dans la réalité c'est tout à fait le contraire avec des ROP assez médiocre, cela pourrait prouver que le problème de la chute du ROP n'était pas dans les paramètres appliqués mais lié directement à la nature de la boue car comme on l'a constaté dans le chapitre précédent les caractéristiques rhéologiques, physiques et chimiques étaient conforme au programme prévisionnel.

Chapitre IV

Alternatives pour remédier au gonflement des argiles cas du puits HOUA-1

1- Etude et exposition du problème d'avancement du forage pour la phase 16''

1.1- Introduction

Lors du forage de la phase 16'' du puits HOUA-1, et plus précisément après le forage des 200 premiers mètres, nous remarquons des difficultés de l'avancement de l'outil exprimé par une chute du ROP, ainsi que des tirages (over pull) lors des manœuvres de remontée, dans cette partie nous allons essayer de diagnostiquer ce problème afin de reconnaître ses signes et ses causes. Comme nous allons essayer de proposer des solutions pour remédier à cette difficulté de forage.

La problématique de la chute d'avancement n'est pas un cas isolé pour notre puits, mais concerne toutes la région de Ain-amenas, ce qui nous mène à prendre ce problème au sérieux et établir de nouvelles stratégies pour y remédier.

1.2- Avancement de l'opération de forage

Pour étudier le problème de la chute d'avancement pour la phase 16'', nous allons analyser le taux d'avancement ROP pour le puits HOUA-1.

1.2-1- Tracé de la courbe de ROP pour le puits HOUA-1

A partir des données recueillies sur chantier nous tracerons la courbe de ROP.

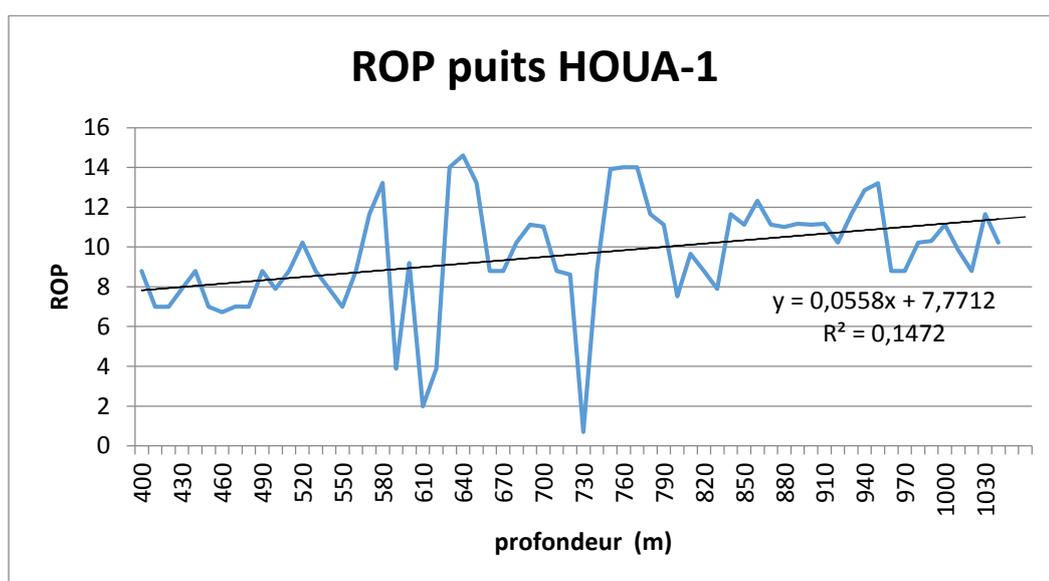


Fig.IV.1. ROP du puits HOUA-1

1.2-2- Discussion

Nous remarquons que l'avancement du forage dans le drain foré n'est pas stable et change sa valeur continuellement et ceci est essentiellement dû aux différents facteurs que nous identifierons par la suite, la valeur maximale de ROP est de 14.60 [m/hr] enregistrée à 640 mètres et la valeur minimale est de 0.670 m/hr enregistrée à 730 mètres.

L'avancement moyen, en calculant la moyenne arithmétique, nous aurons ROP moyen égale à 9.80m/h. Donc nous pouvons dire que l'avancement dans cette phase 16'' reste très modéré.

1.3- Identification du problème

A partir de la côte 300m (Touartine moyen) appartenant au jurassique l'avancement de l'outil de forage devient très faible, atteignant les 90 min/m (0.011m/min), suivi par des tirages de dizaines de tonnes ainsi que des backreaming.

1.3.1- Interprétation du masterlog

Voici ci-dessous les masters log de la Phase 16'' du puits

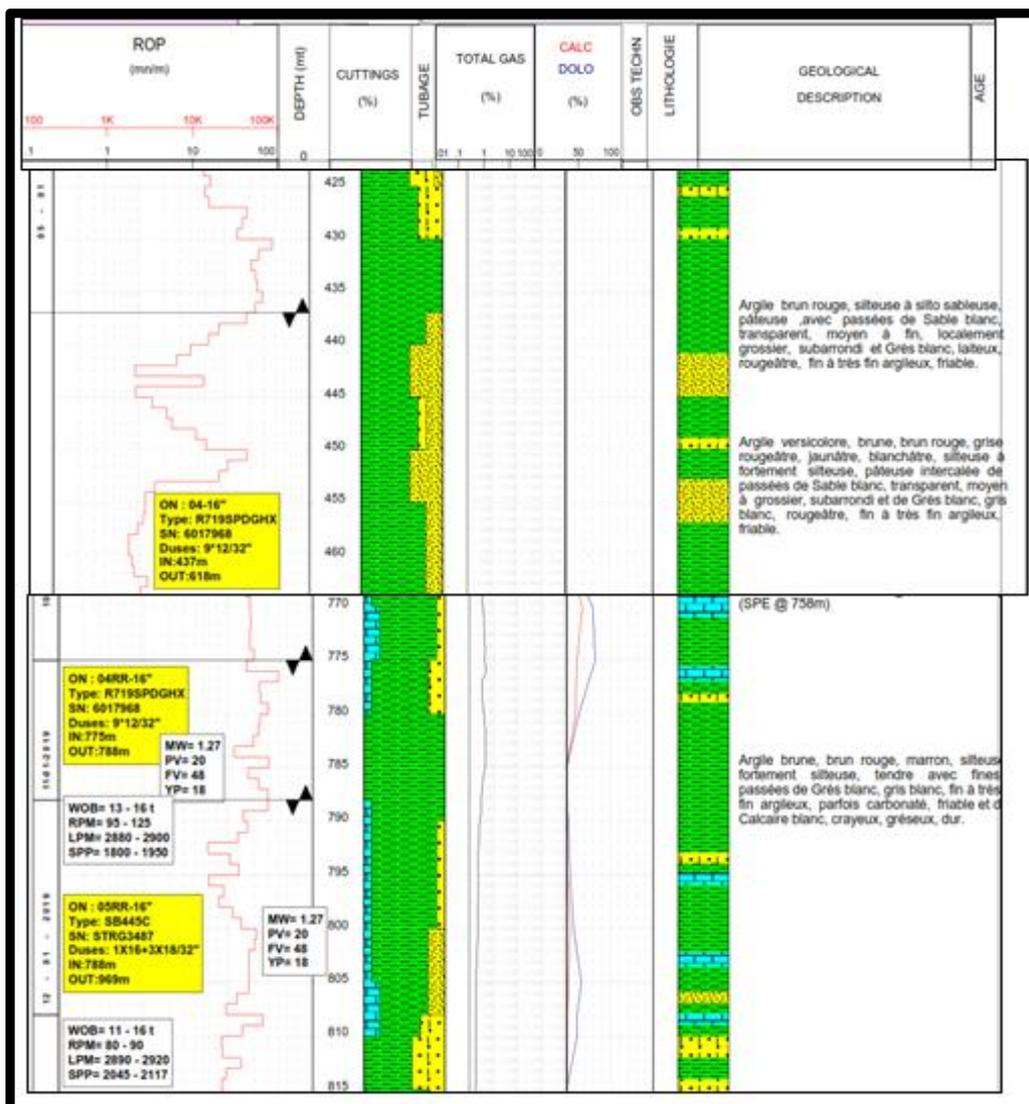


Fig.IV.2. Master log de la phase 16''

Les masterlog présentés, nous permettent de lire la valeur du ROP à n'importe quel point du puits et dans toute la phase 16'' entre la cote 400m jusqu'à 1000m. À la fin de cette phase, nous remarquons que la valeur du ROP est médiocre avec quelques pics de valeurs moyennes

Le Masterlog nous a permis aussi d'identifier la nature des formations correspondant à cette phase, rappelons que le masterlog est rempli à partir des cutting prélevés au cours du forage ce qui nous permet de savoir avec précision et à n'importe quel point la nature et la composition de la roche.

A partir de ce dernier, nous constatons que la composition principale de la formation dans cette phase est l'argile (argile marron, rouge, versicolore...etc.), avec quelque intercalation de sable et de gré.

1.3.2- Interprétation de diagraphie Gamma-ray

L'interprétation en quick look de la diagraphie de gamma-ray, nous confirme aussi que les formations traversées dans la phase 16'' sont principalement des formations argileuses (Gamma -ray élevé).

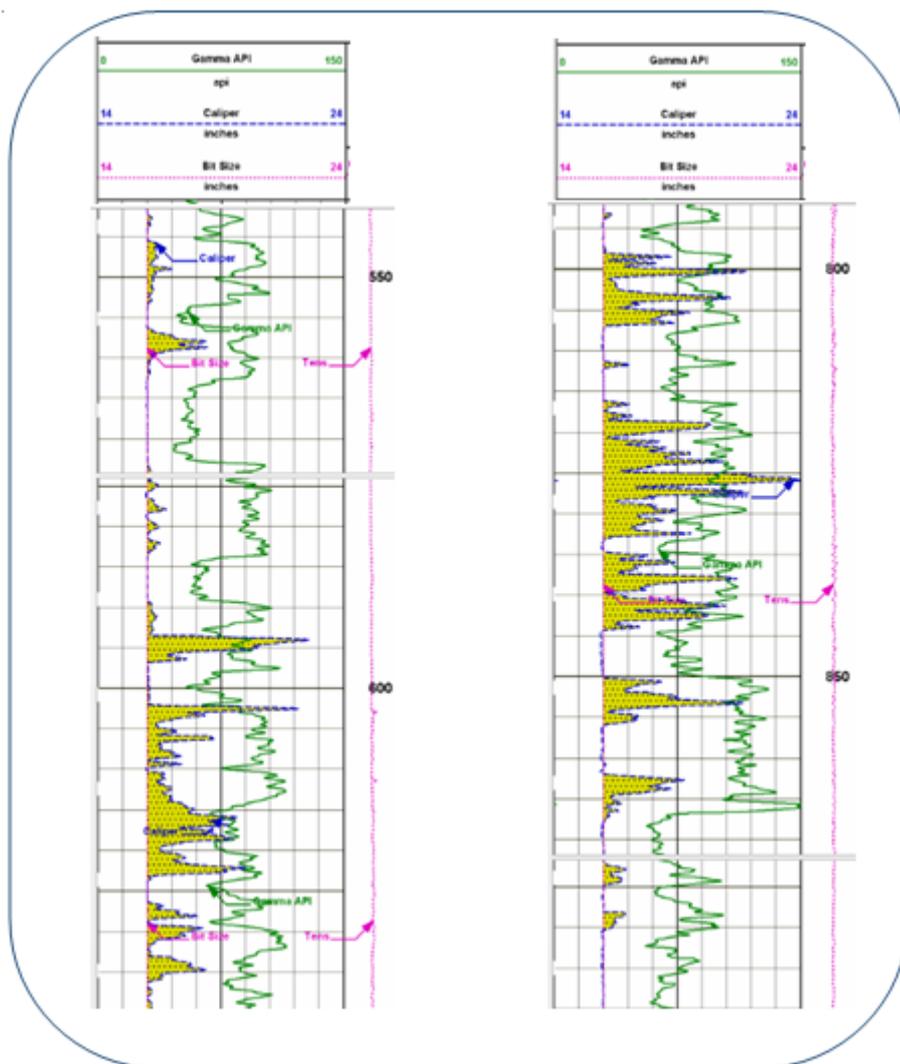


Fig.IV.3. Diagraphie GR de la phase 16''

1.3.3- Analyse des déblais des formations

L'analyse des déblais nous a donné les résultats suivant :

De 300 à 400 m : Argile jaune, rougeâtre, marron parfois grise gris foncée silteuse à fortement silteuse, avec fines passées de Grès blanc, jaunâtre, rougeâtre, très fin à fin argileux et sable blanc, transparent, moyen à fin subarrondi, bien classé.

De 400m à 450 m : Argile brun-rouge, silteuse à silto-sableuse, pâteuse ,avec passées de Sable blanc, transparent, moyen à fin, localement grossier, subarrondi et Grès blanc, laiteux, rougeâtre, fin à très fin argileux, friable.

De 450 a530 m : Argile versicolore, brune, brun rouge, grise rougeâtre, jaunâtre, blanchâtre, silteuse à fortement silteuse, pâteuse intercalée de passées de Sable blanc, transparent, moyen à grossier, subarrondi et de grès blanc, gris blanc, rougeâtre, fin à très fin argileux.

De 530a 700 m : Argile marron, grise, blanchâtre, silteuse à fortement silteuse, avec rares fines passées de sable blanc, transparent, moyen à grossier, subarrondi et de grès blanc, gris blanc, fin à très fin argileux, friable.

800 m : Argile brun -rouge, marron, grise, gris verdâtre, parfois grise foncée silteuse à fortement silteuse, carbonatée, tendre intercalée de passées de sable blanc, transparent, fin à moyen parfois grossier, subarrondi et de calcaire blanc, gris blanc, crayeux, gréseux, dur devient localement de Dolomie grise avec rares fines passées de Grès blanc, gris blanc, fin à très fin argileux, parfois carbonaté, friable. Traces d'anhydrite.

1.3.4- Analyse géologique

Les données géologiques locales montrent que la formation principale rencontrée dans la région appartient à la série des argiles triasiques du Zarzaitine, une région qui renferme les plus importants gisements pétroliers du Sahara.

Des sondages pétroliers ont montré que cette formation d'argile a une épaisseur de plusieurs centaines de mètres et surmonte une formation carbonifère très épaisse. Les multiples études de sols réalisées dans la région ont révélé la présence d'un sol composé essentiellement d'argile rouge bariolée (de mauve, de jaune, de vert et de bleu), très compacte, couverte en surface par une couche d'altération. Cette couche d'altération est le produit de l'action conjuguée du soleil, de la pluie et des vents de sable. Ces phénomènes thermoclastiques sont à la base des fractures subverticales remplies de sable existant dans le sous-sol. Le vent apporte du sable qui est entraîné par les faibles pluies dans les fissures qu'il colmate [Geotech, 1999].

1.3.5- Analyse stratigraphique

De nombreuses études de sol ont été effectuées sur les sols d'Ain-Aménas pour le compte de compagnies nationales implantées dans la région. Ces études ont été réalisées par des laboratoires nationaux et étrangers dans le cadre de conception d'ouvrages ou dans le cadre d'expertises. La synthèse de ces études montre que les argiles de la région se

présentent suivant une stratigraphie assez régulière et globalement homogène selon la succession de quatre couches :

- une couverture sableuse ou couche d'altération de quelques centimètres à quelques décimètres par endroits.
- un horizon supérieur constitué de matériau limono-argileux de couleur rougeâtre. Cet horizon épais de 1,5 mètre en moyenne. Par endroits, ce matériau présente une couleur violette. L'homogénéité de cet horizon en plan est interrompue seulement par de légères variations latérales. Il se présente par endroits plus riche en altérations jaunâtres et en argile.
- un horizon argileux compact presque dépourvu de fractions sableuses. Cet horizon de couleur rougeâtre est légèrement plus sombre que la couche supérieure. Dans les tranchées, ce matériau se présente en petits blocs compacts séparés les uns des autres par de nombreuses fractures dont les faces sont ondulées et polies, ce qui témoigne de la grande surconsolidation de l'argile. On trouve dans cet horizon des lithotypes bariolés de vert clair parfois argileux parfois sableux se présentant sous forme de lentilles éparpillées ou en noyaux concentrés ou en étages discontinus [Geotech, 1999].
- un horizon inférieur constitué d'argile limono-sableuse rougeâtre identique à l'horizon argileux compact mais visiblement moins compact et plus fracturé [Geotech, 1999].

1.3.6- Analyse minéralogique

Les analyses par diffraction aux rayons X de trois échantillons ont révélé que ces argiles sont à prédominance de kaolinite avec présence, en moindre importance, d'interstratifiés « illicite vermiculite » et de silice cristallisée en minéraux associés apparaît dans les tranchées à une profondeur de 3 à 4 mètres pas toujours bien délimité aux bords.

1.3.7- Forage de la formation argileuse

Les formations argileuses sont connues pour leurs difficultés de forage (voir le premier chapitre, I.4), car elles présentent des caractéristiques pâteuses et des caractéristiques de gonflement.

Lors de la filtration de la boue de forage (Boue à base d'eau), l'argile absorbe le filtrat ce qui provoque son hydratation et par conséquent son gonflement. Leur caractère pâteux engendre principalement la difficulté de pénétration de l'outil qui est exprimée, par la chute du ROP, atteignant des valeurs très faibles voir nulles.

Le gonflement de cette argile provoque le rétrécissement du trou qui à son tour provoque le coincement de la garniture ainsi que le raclage des stabilisateurs au cours des manœuvres de remontées et de descentes. Ainsi que des overpull et des backreaming.



Fig.IV.4. Outil 16'' bourné



FigIV.5. Argile raclée par la garniture de forage



Fig.IV.6. Argile raclée par un stabilisateur

1.4- Conclusion

Nous pouvons conclure que le coincement est dû à la présence des argiles réactives. Ces argiles sont caractérisées par une capacité importante d'absorption d'eau et de gonflement. Lorsqu'une formation argileuse sensible à l'eau qui est forée avec une boue à base d'eau, l'argile absorbe l'eau et gonfle dans les abords des parois du puits, qui provoque par la suite la diminution de la vitesse d'avancement suivie par des coincements dits 'par gonflement des argiles' ce qui a engendré l'augmentation de la durée de forage, donc l'augmentation du coût de forage, mais nous pouvons dire que dans notre cas le problème est mineur car la phase a pu être réalisée, par ailleurs dans beaucoup de puits voisins ce problème s'est manifesté avec une ampleur plus importante, et ces derniers ont dû être déviés par side-track.

A partir de toutes les informations exposées dans cette partie, nous pouvons dire que le problème de gonflement des argiles n'est pas un cas isolé pour notre puits, mais concerne toute la région de Ai-amenas, ce qui nous mène à prendre ce problème au sérieux et établir de nouvelles stratégies pour y remédier.

1.5- Recommandations pour intervention immédiate

Pour remédier partiellement aux problèmes survenus dans notre puit HOUA-1, et pour éviter un coincement irréversible qui pourrait engendrer un sidetrack voir son abondent nous recommandons d'appliquer les instructions suivantes :

Il faut élever progressivement la densité du fluide (de 1.22 jusqu' 1.35 voir plus) et s'assurer de ne pas fracturer la formations la plus fragile pour la quelle la pression de fracturation est estimée à 1.42, cela permettra le maintien mécanique des parois du puits ce qui limitera le rétrécissement de son diamètre et minimiser le coincement et le raclage de l'outil et des stabilisateurs.

Nous devons aussi diminuer le filtrat, et essayer d'avoir un cake mince et imperméable afin de minimiser la quantité du fluide infiltré.

Pour réduire le phénomène de gonflement des argiles, ajouter quelques inhibiteurs d'hydratation à des concentrations adéquates tels que Glydril.

2- Evaluation économique de la phase 16''

Nous allons résumer les coûts journaliers engendrés durant la phase 16'' dans le tableau ci-dessous [SONATRACH DMR ET DDR, HOUA-1, 2019], ensuite nous analysons les coûts journaliers de la boue ainsi que les coûts journaliers totaux :

Tableau.IV.1. Coûts journaliers de la boue et totaux

Jours	Côtes de forage	Profondeur forée (m)	Temps non productif (NPT) heure	Coût journalier de la boue (KDA)	Coût total journalier (KDA)
Jour 01	226-387	161	0	1776,7	3843
Jour 02	387-437	50	11,50	2502,787	4278
Jour 03	437-512	75	2	2016,638	6622
Jour 04	512-618	106	3	696,309	6310
Jour 05	618-634	16	16	1065,632	4950
Jour 06	634-740	106	0	1078,743	5325
Jour 07	740-775	35	15	388,093	5331
Jour 08	775-788	13	17,5	575,603	4421
Jour 09	788-808	20	18,25	769,436	4105
Jour 10	808-867	59	3,25	495,867	4842
Jour 11	867-944	77	4,50	531,357	4601
Jour 12	944-969	25	15,5	702,572	4637
Jour 13	969-1002	33	18	577,883	4989
Jour 14	1002-1046	44	6,5	1017,043	5273
Jour 15	1046	-	3,5	496,867	5273
Jour 16	1046	-	6,5	532,357	4831
Jour 17	1046	-	0	702,572	4373
Jour 18	1046	-	2	525,187	4061
TOTALE	-	-	143	16451,644	88065

2.1- Temps non productif

Le temps improductif (ou Not Productive Time NPT en anglais) est le temps pris pour résoudre les problèmes ayant entraînés l'arrêt des opérations normales de forage. Il contient toutes les opérations nécessaires à un retour à la situation précédente avant l'apparition du problème.

Nous représentons l'histogramme des temps improductif de la phase 16'' pour le puits HOUA-1, réalisée en dix-huit (18) jours.

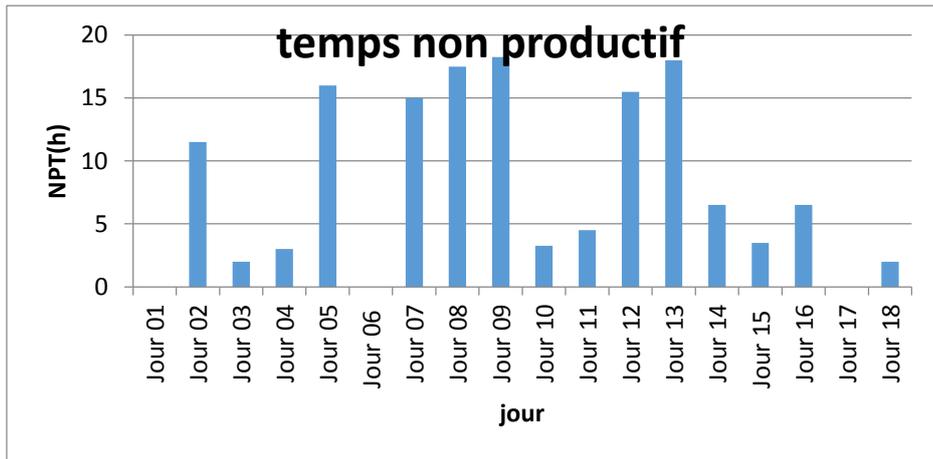


Fig.IV.7. temps non productif

- **Discussion**

Nous avons observé des temps improductif importants pour la phase 16'' avec une accumulation de 143 heures.

Par conséquent l'exécution de cette phase a duré 18 jours, ce qui va augmenter les charges et coût de forage.

2.2- Coûts journaliers

Dans cette partie, nous s'intéressons à l'étude des coûts journaliers de la boue et les coûts journaliers totaux.

2.2.1- Coûts journaliers de la boue

Le suivi du coût journalier de la boue a une importance majeure pour la détermination du coût journalier du forage, nous traçons l'histogramme des coûts.

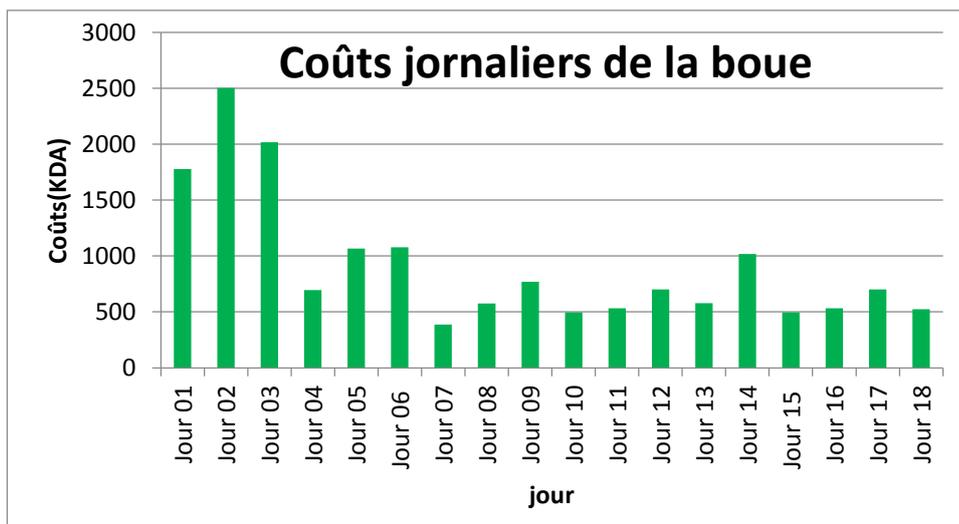


Fig.IV.8. Coûts journaliers de la boue

2.2.2- Coûts journaliers totaux

Coût journalier total est défini comme étant la somme de toutes les charges par jour pour la réalisation du puits.

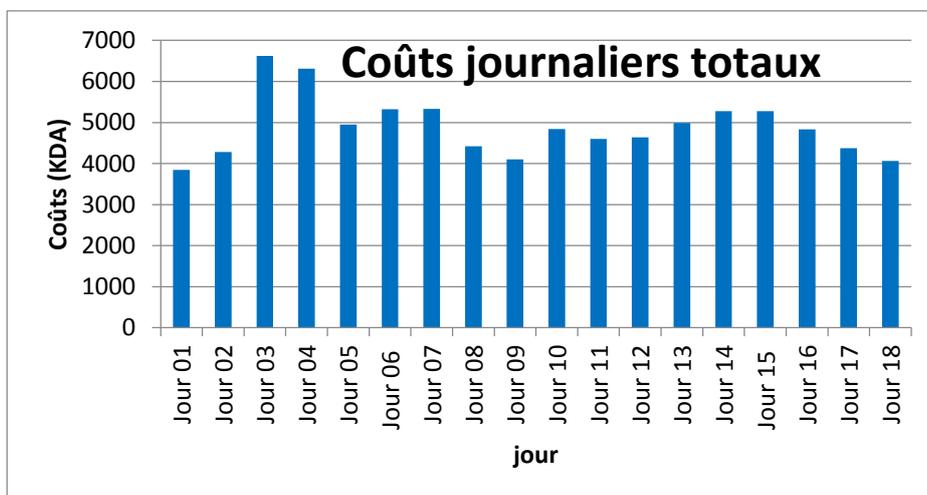


Fig.IV.9. Coûts journaliers totaux

2.2.3 – Discussion

Nous remarquons une déférence entre les consommations journalières de la boue, les coûts importants sont enregistrés dans les premier jours, ce est dû au changement de la phase qui nécessite un traitement spécifique de la boue pour l’adapter à la formation à forer. La consommation moyenne de la phase 16’’ pour la boue est de 913.98 (KDA) par jours, et le coût total de la boue pour la phase est égal à 16451.644 (KDA).

Par contre la consommation journalière totale moyenne est égale à 4892.5(KDA), et le coût total pour la phase est égal 88065 (KDA).

Nous remarquons à partir du tableau précédent (IV.1) que totale du service boue durant la phase 16’’ est de 16451.644 KDA (soit 1 milliard six cents quarante-cinq millions de centimes), qui représente 16% du coup totale de la phase 16’’ a couté 88065 KDA (soit 8 milliard huit cents millions de centimes).

2.3- Contribution de la boue dans le coût journalier total

Afin de mettre en évidence l’importance des charges de la boue, nous étudierons la contribution de cette dernière dans les coûts journaliers totaux.

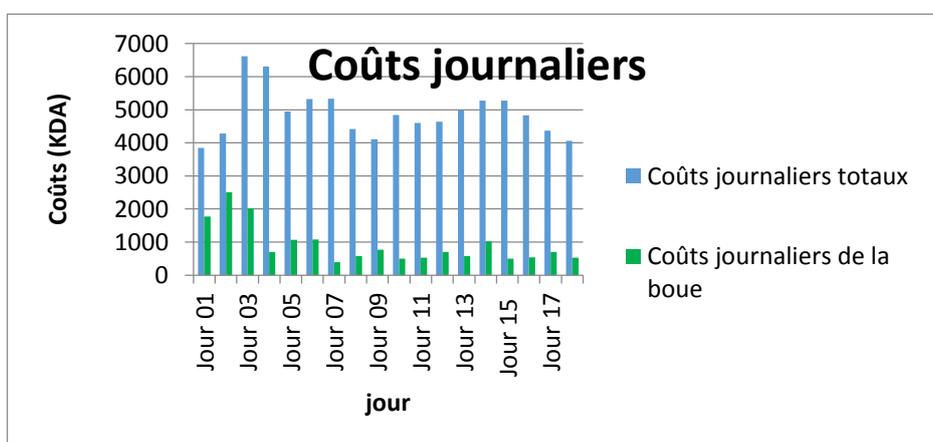


Fig.IV.10. contribution de la boue dans le coût journalier total

L'accumulation des coûts journaliers de la boue représente 16% du total des coûts journaliers.

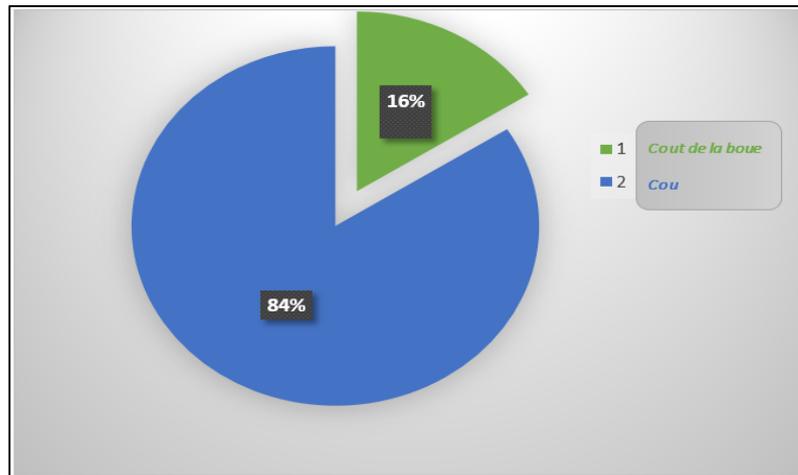


Fig.IV.11. Pourcentage des coûts journaliers de la boue par rapport au coût total

Les détails des charges engendrées par le service boue sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Charges engendrées par la boue

Produit	Prix unitaire	Quantité utilisée	Coûts KDA
Bariteimported	23,063	111,000 T	2 560,030
Barite Local	29,459	78,000 T	2 297,803
BENTONITE	21,240	4,000 T	84,960
Soda Ash	79,078	1,125 T	88,962
CausticSodda	211,886	1,725 T	365,503
BARO-LUBE GOLD SEAL	542,584	3,040 T	1 649,454
BARAZAN D	414,763	1,225 T	508,085
EZ MUD	318,333	0,475 T	151,208
Potassium Chloride (KCl)	59,597	52,000 T	3 099,044
GEM GP	263,094	3,300 T	868,212
PAC L Algeria	322,226	5,875 T	1 893,077
DEXTRIDE LTE	177,295	7,650 T	1 356,305
BARA-DEFOAM HP	1260,111	0,180 T	226,820
Service et équipements	73.343	18 jours	1302,174
		TOTALE	16451,644

2.4- Analyse du temps de réalisation de la phase 16''

La phase 16'' s'étale sur une profondeur de 386.94m qui a été exécutée dans dix-huit (18) jours sans compter le temps de l'inter phase, le temps de réalisation de cette phase

est élevé, estimé à 432 heures, marquée par une accumulation de temps improductif important estimé à 143 heure.

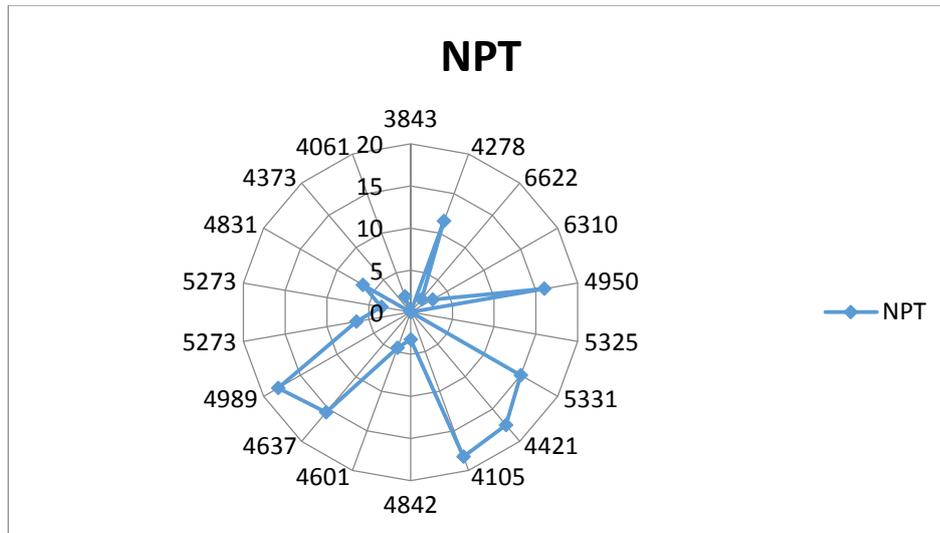


Fig.IV.12. coûts journaliers totaux en fonction des NPT

La figure ci-dessus illustre les temps improductifs et les coûts journaliers, nous pouvons dire que les journées se caractérisent par des NPT élevés, donc le rendement du forage reste modéré.

Le temps improductif de cette phase représente 33% du temps global, en forage il est considéré trop élevé.

Le problème de gonflement des argiles a causé une chute de ROP, ce qui a engendré des temps improductifs(NPT) important, donc des charges et des coûts supplémentaires pour la réalisation de la phase.

3-Proposition de programmes de boue alternatifs

Dans cette partie nous allons exposer des programmes alternatifs afin de remédier aux problèmes rencontrés lors du forage de la phase 16'', c'est-à-dire le problème de gonflement des argiles. Donc nous allons présenter les types de boue adéquats à cela, à savoir les boues à émulsion inverse (Inverted emulsion oil mud), les boues à émulsion inverses non toxiques (diesel minérale basse toxicité) et les boues à base d'huile issues d'esters. Comme nous allons exposer les avantages et les inconvénients de chaque système.

3.1-Boue à émulsion inverse (OBM)

Nous classons dans cette catégorie les fluides de forage ou de complétion constituées d'une phase continue huile et d'une phase dispersée aqueuse. Une boue à l'huile cause le minimum de dommages aux formations productrices. Elle possède des caractéristiques rhéologiques permettant l'élimination correcte des déblais et le maintien en suspension des alourdisants.

Les caractéristiques peuvent être contrôlées, à la suite d'apports accidentels d'eau dus aux conditions atmosphériques, aux opérations de forage, à de faibles venues dans les puits etc... en ajoutant les additifs adéquats (voir le tableau I.I).

La filtration A.P.I. à haute pression et haute température est faible, le filtrat est exclusivement composé d'huile [Jean Paul Nguyen, 1993].

3.1.1-Propriétés

Une boue à émulsion Eau/Huile satisfait aux conditions suivantes :

- Cause le minimum de dommages aux formations productrices.
- Possède des caractéristiques rhéologiques telles que les alourdissants sont maintenus en suspension dans les conditions d'utilisation sur chantier.
- Les déblais de forage sont correctement remontés.
- Les caractéristiques peuvent être contrôlées même à la suite d'apports assez importants d'eau dus aux conditions atmosphériques, aux opérations de forage, à des venues dans le puits, etc...
- La filtration API à haute pression et haute température est faible. Le filtrat est exclusivement composé d'huile.
- L'entretien et le traitement de la boue sont aussi souples que ceux des boues à base d'eau.

3.1.2-Utilisation

Les boues à émulsion Eau/Huile sont principalement utilisées :

- Pour le forage et le carottage des niveaux producteurs dans les sondages de développement ou d'extension.
- Pour les reprises et entretiens de puits productifs.
- D'une manière générale pour tous les travaux au droit des horizons productifs. Pour résoudre des problèmes de forage :
 - Argiles gonflantes et/ou à fort pouvoir dispersant.
 - Grandes épaisseurs de sels et/ou d'anhydrite.
 - Puits profonds posant des problèmes de hautes températures.
 - Puits profonds posant des problèmes de déviation.
 - Forages dirigés.
 - Instrumentations (collage, surforages, etc...)
 - Pour des forages avec de très faibles températures atmosphériques.

3.1.3-Avantages et inconvénients des boues à émulsion Eau/Huile

Les principaux avantages des boues à émulsion inverse sont les suivantes :

- Contrôle aisé des caractéristiques.
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (Na Cl, CaSO₄, ciment. etc...),
- Excellentes caractéristiques de filtration statique, cake mince insoluble dans l'eau et soluble dans le brut,
- Stabilité des caractéristiques de filtration en température,
- Meilleur calibrage du trou.
- Réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits, d'où diminution du couple de torsion et de l'usure de la garniture,

- Augmentation de la durée de vie des outils à molettes.
- Réduction des risques de bourrage d'outils et d'accumulation de déblais sur les drill-collars d'où diminution du "pistonnage" lors des manœuvres:
- Réduction des risques de collage par pression différentielle.
- Récupération plus importante en carottage.
- Carottes sur lesquelles il est plus aisé de déterminer la teneur en eau interstitielle.
- Augmentation, par rapport au forage avec une boue à base d'eau de la productivité et de la production totale.
- Facilité de mise en production.

Les principaux inconvénients des boues à émulsion inverse sont :

- Manipulation salissante.
- Risque d'incendie au cours de son utilisation.
- Détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures,
- Difficultés pour déceler la présence d'huile de formation dans les déblais,
- Certaines méthodes de diagraphies instantanées et différées ne sont pas applicables,
- Prix de revient au m³ plus élevé que les boues à l'eau rendant souhaitable une récupération de la boue de puits à puits.

3.1.4-Elaboration du programme

Nous allons proposer un programme de boue à émulsion inverse que nous jugeons adéquat au forage de la phase 16'' de la région d'Ain-amenas.

3.1.4.1-Formulation et propriétés rhéologiques

Les tableaux suivants représentent respectivement la composition de la boue ainsi que les propriétés rhéologiques obtenues avec cette composition.

Tableau.IV.6. Formulation de la boue OBM

Produit	Rôle	Quantité Kg /m ³
Diesel	Phase continue	0.650
Eau	Phase dispersée	0.193
Liquitone	viscosifiant/réducteur de filtrat	11.4
BARAMUL	inhibiteur de corrosion	14.3
Lime	Chaux, activateur d'émulsion	25
Invermul	émulsifiant	23
Geltone	viscosifiant	12
Chlorure de sodium NaCl	salinité	90.35
Carbonate de calcium	alourdissant	105

Tableau.IV.7. Rhéologie de la boue OBM

Propriété	Valeur
HB-N	0.881
HB-K	0.13
Tau0	11.31
PV	25
YP	16
PL-n	0.637
PL-k	0.901

3.1.4.2-Simulation avec le logiciel DFG

Pour simuler ce nouveau programme de boue, nous avons gardé les mêmes composants du train de sonde ainsi que la BHA. En utilisant les propriétés rhéologiques obtenues, nous avons simulé cette boue à l'aide du logiciel DFG, qui nous a permis de tracer son rhéogramme, les pertes de charges à différents endroits du puits ainsi que le taux de nettoyage de ce dernier le long de la phase 16''.

Pour le choix des paramètres mécaniques de forage (WOB, RPM, TRQ), hydraulique (SPP, FLW) ainsi que les paramètres rhéologiques (MW, FV, PV, YP, GEL0, GEL10, FLTR) de la boue comme entrées (input) pour le modèle de prédiction, nous avons sélectionné les mêmes paramètres qui ont donné la valeur optimale de ROP qui est 20.6m/h enregistré à la côte 640m.

Tableau.IV.8. Paramètres Optimaux

	RO P	W OB	RP M	TR Q	FL W	SPP	MW	FV	PV	Y P	GE L 0	GE L	FIL TR
Valeur	20.6	13	120	1600	2806	2380	1,25	46	25	16	15	19	12

- **Simulation du modèle rhéologique**

Après avoir introduit les différents paramètres rhéologiques le DFG nous a permis de générer le modèle rhéologique qui exprime le comportement de notre boue à savoir la boue à émulsion inverse (OBM).

Le graphe ci-dessous représente le rhéogramme obtenu, nous remarquons que les modèle obtenue est celui de Heschell-buckley, en comparant le tracé réel avec le tracé théorique, on déduit que le comportement de cette boue est très proche du modèle théorique ce qui reflète le bon comportement rhéologique de celle-ci.

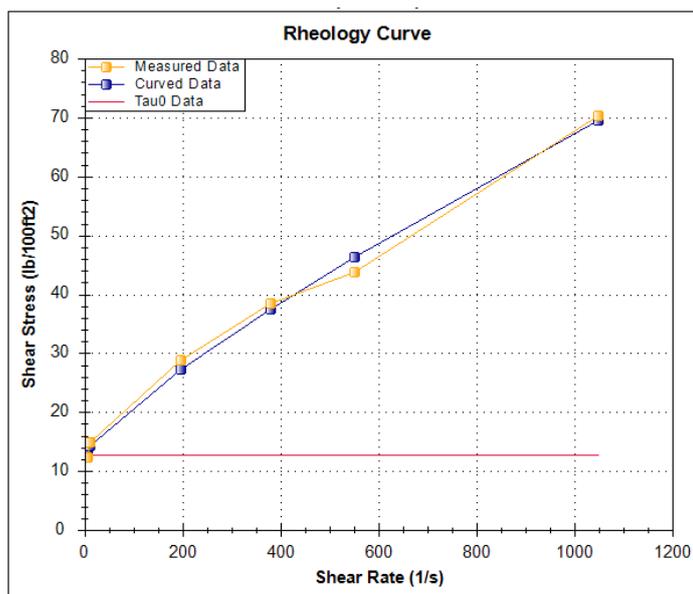


Fig.IV.13. Rhéogramme de la boue OBM

- **Simulation des pertes de charges**

A présent nous allons calculer les pertes de charges engendrées par l'écoulement de cette boue le long du puits. Le circuit de forage est formé de plusieurs composants et intervalles, chacun induit des pertes de charges spécifiques, la somme de ces pertes de charge égale à la pression de refoulement(SPP) mesurée au niveau de la colonne montante.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau.IV.9. Pertes de charges engendrées

Outil		Pertes de charges		Volumes	
Puissance hydraulique	163.4hp	Surface	311psi	garniture	4.3 m ³
Force	760.75lbf	garniture	1534psi	Annulaire	68.0 m ³
HSI	0.81 hp/in ²	Outil	924psi	découvert	84.4 m ³
		Annulaire	35 psi	Circulation	72.3 m ³
		Total	2380 psi	Temps de Bottum Up	27.19 min

A partir des résultats obtenus, nous remarquons que la majorité des pertes de charge (64.42%) dans le circuit sont à l'intérieur de la garniture tandis que au niveau de l'espace annulaire, surface et l'outil représentent respectivement (1.47%), (13.06%) et (38%).

Les pertes de charge au niveau de l'outil qui représente 38% des pertes de charges totales, sont proches de la valeur conseillée qui est 50%, contrairement à la boue KCL-

POLYMER qui ne représente que (12%), donc ceci reflète un nettoyage efficace des déblais donc un bon ROP.

- **Simulation de l'efficacité de nettoyage**

Afin d'analyser l'efficacité de nettoyage à partir des paramètres rhéologiques proposés et de prédire tout problème lié à l'espace annulaire, nous procédons à la simulation du nettoyage sur toute la phase 16''.

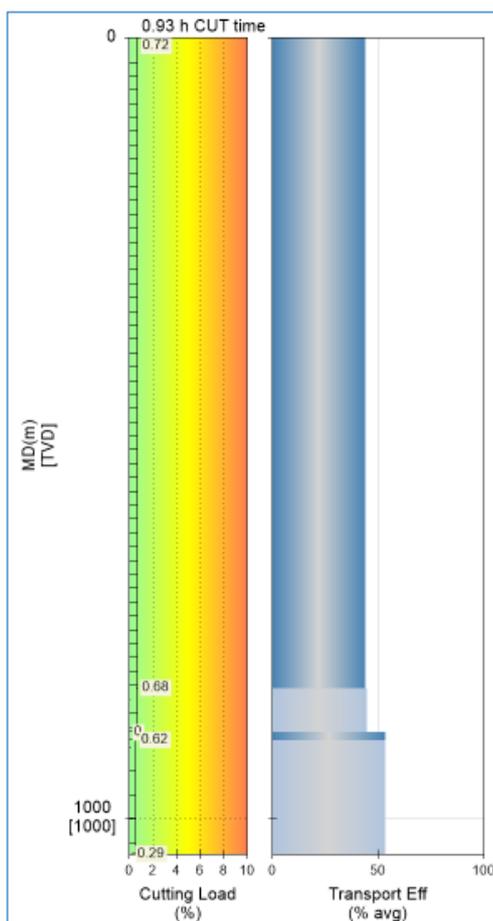


Fig.IV.14. Taux de nettoyage de la boue OBM

Nous constatons que le nettoyage est bon le long de la phase, les taux donnés par la simulation restent au-dessous de la valeur maximale tolérée qui est 3%, le pourcentage des déblais dans l'espace annulaire varie de 0.29% jusqu'à 0.72%.

Ce qui nous ramène à dire que l'efficacité de nettoyage de cette boue est satisfaisante et permet une bonne remontée des déblais en surface.

Nous pouvons conclure que l'utilisation de cette boue dans un premier temps, ne va pas engendrer un excès de pertes de charge et que les valeurs obtenues sont très raisonnables, et restent très inférieures à celles provoquées par la boue utilisé dans le puits HOUA-1, dans un second temps, elle offre un nettoyage efficace mieux que celui de la boue KCL-POLYMER.

3.1.5- Estimation de ROP

Au sujet de l'amélioration de l'avancement du forage, nous allons prédire le ROP de la phase 16'' à partir du modèle de prédiction de ROP généré par les réseaux de neurones artificiels basé sur l'équation (III.12), le graphe ci-dessous illustre le ROP réel, le ROP simulé et le ROP OBM estimé,

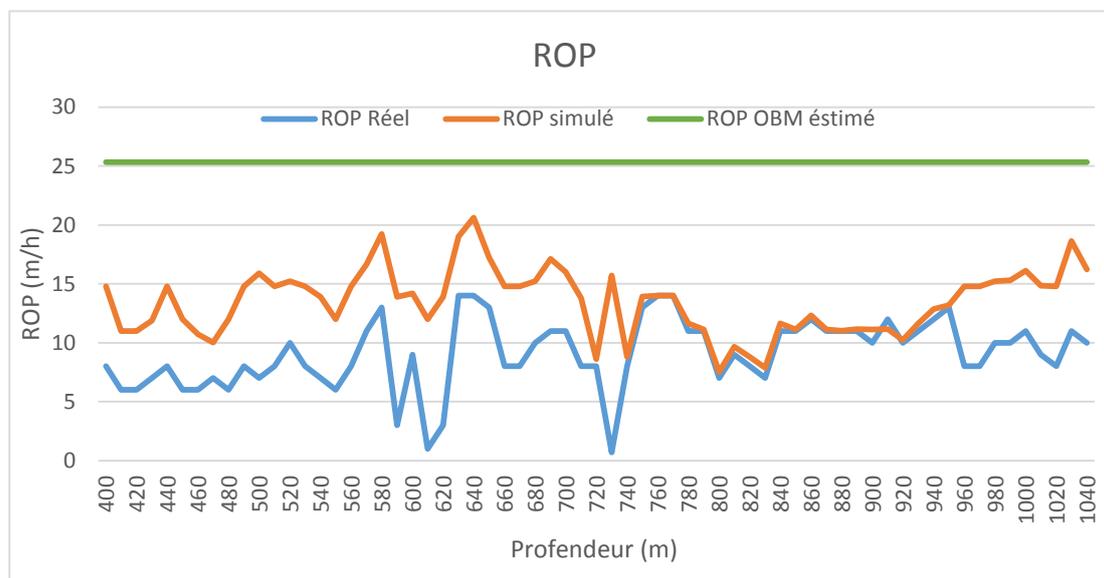


Fig.IV.15. Comparaison des ROP

- **Discussion**

Nous avons trouvé avec la simulation à partir des valeurs optimales de tous les paramètres un ROP égale à 20 m/h, pour la boue KCl-Polymer utilisée dans la phase 16''.

Cependant en tenant compte de la nature de la boue proposée qui est la boue à base d'huile (émulsion inverse 90/10), le ROP augmentera systématiquement car cette dernière est bien plus adaptée au forage des formations argileuses en empêchant leur hydratation par conséquent l'élimination de leur gonflement.

Nous avons estimé l'augmentation du ROP à 25% par rapport à la valeur optimale obtenus par l'utilisation de la boue KCl-Polymer, cette valeur que nous considérons raisonnable.

3.2-boue à base d'huile basse toxicité

A cause du caractère polluant des boues à base d'huile, et de l'endommagement provoqué aux formations traversées, notamment les nappes aquifères qui sont le plus souvent sources d'eau potable aux habitations avoisinantes, les sociétés de service ont mis au point des boues de nouvelle génération qui sont plus respectueuses de l'environnement tout en offrant des performances techniques concurrentielles.

La question de l'impact environnemental de l'utilisation des boues à base de l'huile (Oil Based Mud OBM) est plus courante que celle des fluides eux-mêmes, ce qui nous mène à proposer les boues synthétiques. Les facteurs qui déterminent le choix de la boue synthétique sont :

- ◆ Toxicities
- ◆ Biodegradation
- ◆ Bioaccumulation
- ◆ Santé
- ◆ Performance de forage

- **Biodégradation et bioaccumulation**

La problématique n'est pas seulement celle de la disparition ultime des produits et de leurs métabolites, mais aussi celui de la vitesse adéquate de biodégradation. Une biodégradation rapide expose moins longtemps les organismes, mais consomme beaucoup d'oxygène, ce qui peut être également nuisible. Dans le cas des boues synthétiques l'U.S E.P.A (1999) préconise une rapide biodégradation car elle corrèle le rétablissement des zones forées avec la disparition des filtrats de boue.

- **Dispersion des produits**

La composition du fluide de base ainsi que les produits ajoutés ont un impact direct sur la formation forée du point de vue environnemental. Les boues à huiles/hydrocarbures sont insolubles ne se dispersent pas, ce qui les amène à atteindre rapidement les zones à proximité du puits. En revanche, les boues synthétiques se dispersent et se dissolvent plus facilement.

Nous allons présenter différentes boue qui sont à base d'huile basse toxicité notamment les huiles minérale et les huiles synthétiques et exposer leurs spécificités techniques.

3.2.1- Boues à base d'huiles minérales améliorés (Enhanced Mineral Oil Based Fluids, EMOBF)

Les Boues à base d'huiles minérales améliorées sont à base d'huiles minérales paraffineuses, dont les teneurs en hydrocarbures aromatiques ont été réduites (leurs taux peut être réduit jusqu'à 0.25%). Cette classe de produits n'est définie qu'aux U.S.A et au Canada. En Europe, on les assimile aux SBF.

3.2.2- Boue à base d'huiles synthétiques (Synthetic Based Fluids, SBF ; Emulsion Based Fluids, EBF)

Les fluide à base synthétique (Synthetic Based Fluids SBF) contiennent une base constituée de composés organiques synthétiques tels que les monomères oléfiniques (Carbure éthylénique, caractérisé par une double liaison carbone-carbone), les poly-alpha-oléfinés (Poly-Alpha-Olefins, PAO), les alpha-oléfinés linéaires (Linear-Alpha-Olefins, LAO), et les esters occasionnellement être nommés EBF (Ester Based Fluids), elles contiennent aussi de la barytine des émulsifiants, des argiles, de la chaux etc...

3.2.2.1- Caractéristique des boues synthétiques

- **Base chimique**

Les boues synthétiques peuvent être classées en quatre catégories :

Les boues à base de l'éther ont été utilisées en mer du nord, avant septembre 1994, pour forer 13 dans la zone mer du nord de la Grande Bretagne.

- **Acétals**

Les acétals sont des dialkylethers qui sont fermement liées aux éthers [**Siater et al, 1995**]. Ils sont formés par la réaction de catalysation des acides à partir d'un aldehyde et un alcool ou avec un mélange de carbonyl (une mole de aldehyde et deux moles d'alcool) [**Patel 1998**]. La formule chimique d'un acétal typique dans une boue synthétique est $C_{20}H_{42}O_2$, il a un poids moléculaire égale à 314.3 [**Vik et al. 1996**].

Les acétals sont relativement stables sous les conditions naturelles, mais ils peuvent revenir en aldehyde et alcool dans un milieu acide. Un certain temps, les bous à base de l'acétal fut utilisé en mer du nord.

- **Esters**

En chimie, la fonction ester désigne un groupement caractéristique formé d'un atome lié simultanément à un atome d'oxygène par une double liaison et à un groupement alkoxy du type R-COO-R'. Quand l'atome lié est un atome de carbone, on parle d'esters carboxyliques.

L'ester est formé à partir de la réaction d'un acide carboxylique et un alcool dans un milieu acide [**Norman 1997**]. Les esters sont utilisés pour former les boues synthétiques incluant les acides gras (acide carboxylique) avec 8 à 24 atomes de carbone et d'alcool avec des chaines de différentes longueurs. 2-Ethylhexanol ($C_8H_{18}O$, poids moléculaire 130.2) c'est l'alcool le plus utilisé, mais, le mono- et poly-hydrique alcool (glycole) peut être utilisé.

Les acides gras utilisés sont extrais des plantes végétales et des poissons. Elles peuvent être aussi faites à partir de l'oxydation de la liaison double de LAOs [**Freidhem and Patermeuh, 1993**]. Un exemple d'ester utilisé dans la boue synthétique est mixture de C_8 jusqu'à C_{14} avec 2-ethylhexanol. Un ester typique a une masse moléculaire de 396.4, sa formule chimique est $C_{26}H_{52}O_2$ [**Vik et al, 1996**]. la chaine et les branche de l'acide gras sont modifiés afin d'optimiser la viscosité, point d'écoulement et la stabilité des paramètres hydrauliques [**Freidhem and Patermeuh, 1994**]

Les ester peuvent êtres mixés avec les hydrocarbures synthétique (LAO, IO ou PAO) pour atteindre certaines caractéristiques pour le forage. Les ester sont beaucoup stables dans un milieu neutre.

Les boues synthétiques à base d'ester sont communément utilisées en mer du nord et elles sont largement utilisées dans le golfe du Mexique.

La figure ci-dessous regroupe quelques propriétés des boues à base synthétique

Base Fluid	Specific Gravity	Viscosity, CST @104	Flash Point C	Pour Point C	Aniline Point C
Diesel Oil	0.85	3 - 4	66	-10	65
LTMO	0.80	2 - 3	100	-18	76
ESTER	0.85	5 - 7	179	-30	25
PAO	0.80	5-6	150	-60	107
ETHER	0.83	5 - 6	166	-10	40
LAO	0.78	2 - 3	110	-12	~67
IO	0.78	2.9-3.2	130	-20	~81
LP	0.77	1.76	>100	-10	>93

Fig.IV.16. Quelques caractéristiques des SBM

3.3- Evaluation économique

Afin d'évaluer l'aspect technique et économique des différents programmes aborder nous allons procéder à l'analyse des ROP générés par chaque type de boues ainsi que les coûts engendrés.

3.3-1- Estimation du ROP

Les boues synthétiques permettent d'augmenter la vitesse d'avancement du forage de 20% à 30% [TOTALE, 2010], par rapport aux boues à base d'huile, ce qui les rend très concurrentielles malgré leurs coûts élevés. Nous avons calculé le ROP qui sera généré par la boue synthétique :

$$ROP_{syn} = ROP_{OBM} + (ROP_{OBM} * 30\%) = 25 + (25 * 30/100) = 32 \text{ m/h} \quad (IV.1)$$

ROP_{OBM} : ROP généré par la boue à base d'huile .Le graphe ci-dessous permet de comparer les différents ROP générés par les différentes boues.

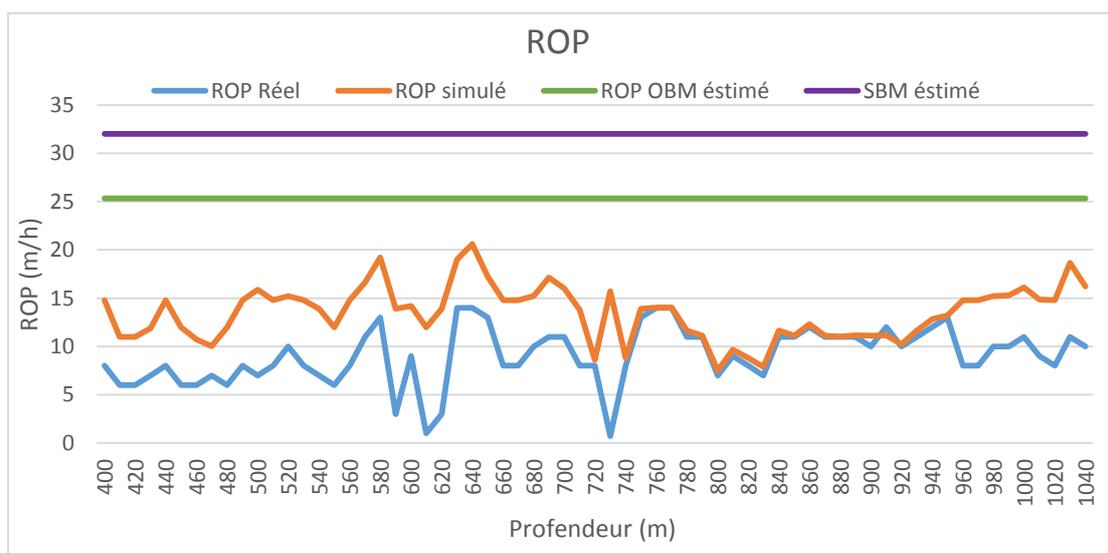


Fig.IV.17. Comparaison des ROP

3.3.2 Temps de réalisation de la phase 16'' cas du puits HOUA-1

Après avoir estimé le ROP généré par chaque boue, nous allons calculer la durée qui sera approximativement prise pour forer les 800 m de la phase 16'' du puits HOUA-1,

- **Estimation du temps de forage T_f**

La longueur de la phase 16'' est de 800 m, nous estimons un ROP de 25m/h pour la boue OBM, 32m/h pour la boue SBM donc le temps de forage T_f égale à :

$$T_{f_{OBM}} = 800/25 = 32 \text{ heure} \quad (\text{IV.2})$$

Et

$$T_{f_{SBM}} = 800/32 = 25 \text{ heure} \quad (\text{IV.3})$$

- **Estimation du temps d'ajout de tige T_a**

Pour l'ajout d'une longueur (27m), le temps moyen est de 5 minutes donc pour 800 m de longueur nous avons 30 longueur.

$$N = 800/27 = 29,62 \quad (\text{IV.4})$$

N : nombre de longueurs

$$\text{Donc } T_a = 30 * 5 = 150 \text{ minute} = 2,5 \text{ heures} \quad (\text{IV.5})$$

- **Estimation du temps de reforage T_r**

La formation se caractérise par le problème des argiles, donc pour le forage nous faisons des passes (back reaming) de 2 à 3 fois pour une longueur forée. Pour chaque passe, nous estimons une durée de 7 à 10 minutes. Donc

$$T_r = 30 * 10 * 3 = 900 \text{ minute} = 15 \text{ heures} \quad (\text{IV.6})$$

- **Estimation du temps de manœuvre pour changer l'outil T_o**

Nous estimons que les 800 mètres seront forés par 2 outils, sachant que le temps moyen pour une manœuvre de 500 mètres est de 2 à 3 heures, donc pour 800 mètres

$$T_o = 3 * 2 = 6 \text{ heures} \quad (\text{IV.7})$$

- **Estimation du temps de circulation T_c**

Pour une telle formation, la circulation se fait tous les 400 mètres qui dure en moyenne 1 heure, donc

$$T_c = 2 * 1 = 2 \text{ heures} \quad (\text{IV.8})$$

- **Estimation des temps T_2 et T_3**

En forage T_2 est le temps nécessaire pour la réparation des pannes et T_3 le temps qui dépasse le temps T_2 , ce sont les temps pour lesquels la compagnie de forage sera payée, que nous pouvons estimer 8 heures.

- **Temps totale de réalisation de la phase T_t**

➤ Pour la boue OBM

$$T_{t\text{ OBM}} = T_f + T_a + T_r + T_o + T_C + (T_2 + T_3) = 32 + 2.5 + 15 + 16 + 2 + 8 = 75,5 \text{ heures} \quad (\text{IV. 9})$$

Donc 3 jours et 4 heures.

➤ Pour la boue SBM

$$T_{t\text{ SBM}} = T_f + T_a + T_r + T_o + T_C + (T_2 + T_3) = 25 + 2.5 + 15 + 16 + 2 + 8 = 68,5 \text{ heures} \quad (\text{IV.10})$$

Donc 2 jours et 20 heures

Du moment qu'on n'a pas tenu compte d'autres facteurs qui peuvent retarder la durée de réalisation de la phase 16'', Nous avons jugé nécessaire de majorer les résultats obtenus

Donc on aura :

$$T_{t\text{ OBM}} = 4 \text{ jours}$$

$$T_{t\text{ SBM}} = 3 \text{ jours}$$

Donc on aura les coûts totaux pour chaque boue (tableau IV.12)

- **Coûts du service de boue**

Tableau .IV.11. Coûts de service de boue

Service et équipements	Prix unitaire (KDA/Jr)
Ingénieur de boue senior (mud engineer)	13,680
Ingenieur de boue junior mud engineer	12,540
Opérateur senior solid control	12,540
Operateur Junior solid control	11,400
Centrifuge "High Speed" STB	6,156
Stockage diesel -60m3-	4,837
PompeCentrifuge "High Speed" OPT	10,260
Pompe diaphragme	2,280
Vacuum truck 6X4 - 20m3- w/driver-operator	54,720
TOTAL	128,341

- **Coûts totaux engendrés par le service de boue pour les 3 programmes**

Les tableaux ci-dessous résument tous les couts engendrés par le service boue en tenant compte de toutes les charges, sachant que le paramètre 'Autres charges' inclut toutes les charges supplémentaires tels que les frais de transport, les bénéfices acquis pour la société du service boue etc..., compte tenu du temps réduit pris par les boues OBM et SBM, nous avons estimé ce terme a 5000 KDA Le prix unitaire des boues à base d'huile synthétiques est généralement estimé au double du celui d'une à base d'huile conventionnelle

Le prix unitaire des boues à base d'huile synthétiques est généralement estimé au double de celui d'une à base d'huile conventionnelle

Tableau.IV.12. Prix de chaque type de boue

Type de boue	Volume totale m ³	Prix unitaire DZD/m ³	Prix total DZD
Boue KCL-Polymer	455	12000	5460000
OBM	455	26000	11830000
SBM	455	52000	23660000

Tableau.IV. 13. Coût engendré par chaque type de boue

Type de boue	Nombre de jours	Charges journalières DZD/Jr	Charges totales DZD	Coûts de la boue DZD	Autres charges DZD	Coûts totale du service boue
OBM	4	128,341	523354	11830000	5000000	16830000
SBM	3	128,341	523354	23660000	5000000	28660000

3.3.3- Coûts de réalisation de la phase 16'' cas du puits HOUA-1

Nous allons procéder à l'étude des coûts de réalisation de la phase pour chaque boue. En tenant compte des données recueillies à partir du rapport (end of section report BASP, HOUA-1). Dans le calcul qui suit nous allons tenir compte du coût de location de l'appareil de forage, du prix de l'outil (on a prévu deux outils pour le forage de la phase 16'') ainsi que du coût de la boue.

Le tableau résume les coûts des boues KCL-Polymer, OBM et SBM en fonction de la durée de réalisation basée sur l'estimation de ROP.

Tableau.IV.14. Coûts des boues KCL-Polymer, OBM et SBM en fonction de la durée de réalisation

Type de boue	Prix des outils DZD	Coût de la boue DZD	Coût de location de l'appareil	Coût total (KDA)
OBM	10000000	11830000	14000000	35830000
SBM	10000000	23660000	7000000	40660000

Nous allons représenter les coûts engendrés par chaque type de boue (KCL, OBM, SBM)

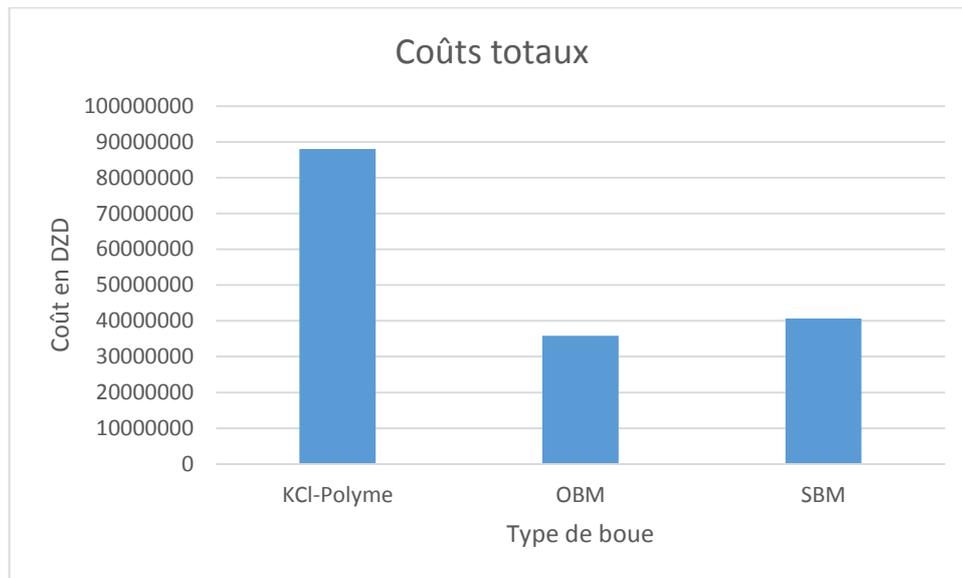


Fig .IV.18.Coûts engendrés par chaque type de boue (KCl, OBM, SBM)

La différence entre les coûts des boues OBM et SBM et celui de la boue KCL-Polymer est très importante. Par conséquent, l'utilisation des boues OBM et SBM au lieu de la boue KACL-Polymer va nous réduire les charge d'exploitation.

- La somme économisée en utilisant la boue OBM

$$88065000-35830000 = 52235000 \text{ DZD}$$

- La somme économisée en utilisant la boue SBM

$$88065000-40660000 = 47405000 \text{ DZD}$$

Donc la boue OBM va nous réduire le coût avec un pourcentage de 59%, et pour la boue SBM avec un pourcentage de 53%

La somme économisée en utilisant la boue OBM est supérieur à celle de l'utilisation de la boue SBM, mais en raison de la biodégradabilité et le respect pour l'environnement de cette dernière, le choix de la boue à utiliser pour le forage de la formation argileuse de la phase 16'' est la SBM.

Conclusion générale

Ce travail a été conduit au départ dans le but d'étudier un des problèmes les plus fréquents et plus dangereux qui se produisent au cours de l'opération de forage, qui est le problème de gonflement des argiles, un phénomène souvent rencontré partout dans le monde, en Algérie notamment. Et cela dans l'espoir d'apporter une contribution à la résolution de ce problème.

Nous avons, tout d'abord étudié l'influence de la boue sur la vitesse d'avancement du forage (ROP), en établissant un modèle numérique prédictif, à l'aide de la méthode de réseau de neurones artificiels, pour cela nous avons établi les coefficients de corrélations des paramètres de forage et des paramètres rhéologiques de la boue avec le ROP, nous avons déduit que ces derniers ont une influence certes moindre que celles des paramètres de forage mais non négligeable.

La majorité des paramètres rhéologiques ont une relation inverse avec le ROP, sauf le gel_0 . Nous avons remarqué que la densité du fluide a plus d'influence avec un coefficient de corrélation $R=-0.8$, comparée aux autres paramètres tels que la viscosité plastiques, le yield point et les gel_0 et gel_{10} .

La programmation de l'algorithme du réseau de neurones, nous a fourni l'équation du ROP en fonction du ROP-normalisé, caractérisée par un facteur de corrélation $R=0.95$ et une erreur quadratique $mse = 0.70$, ce qui reflète la bonne précision du modèle généré, la comparaison entre le ROP réel du puits HOUA-1 et le ROP simulé avec la méthode, nous a permis de constater que, sur tous les points du puits le ROP simulé était supérieur au ROP réel, et du moment que le modèle simulé a donné une très grande précision dans les puits d'apprentissage et de validation, nous avons conclu que le problème de la chute du ROP n'était pas due aux paramètres mécaniques, hydrauliques et rhéologiques appliqués, mais liée directement au type de boue utilisée. Ce qui a été confirmé par une simulation de la boue utilisée dans la phase 16'' du puits HOUA-1.

L'interprétation de la diagraphie et du master log ainsi que l'analyse géologique, minéralogique et stratigraphique de la formation traversée, nous informe qu'il s'agit d'une formation constituée d'argiles qui présentent un problème de gonflement lors du forage, ce qui a engendré la prolongation de la durée de réalisation de la phase 16'', qui à son tour provoqué un coût total très élevé estimé.

Dans le but de remédier à ce problème fréquemment rencontré au sud algérien, nous avons proposé des programmes alternatifs, à savoir les boues à base d'huile naturelle qui présentent un meilleur comportement vis-à-vis des argiles et des meilleures performances. Ces alternatives consistaient en des boues de nouvelle génération à base d'huiles minérales paraffinées dont le taux d'aromatiques ne dépasse pas les 0.25% et d'huiles synthétiques constituées de bases chimiques tels que les esters, les éthers, les oléfines etc. Qui sont caractérisées par un point d'éclair élevé qui limite le risque d'incendie sur chantier mais surtout elles sont plus respectueuses de l'environnement grâce à leur toxicité réduite et leur biodégradation.

Nous allons exposer les caractéristiques techniques de chacune, et nous allons terminer notre travail par une évaluation comparative des coûts engendrés.

• Perspectives

Ce travail pourrait être approfondie et complété, par :

- L'établissement d'un modèle numérique plus performant qui tiendrait compte de tous les facteurs et paramètres affectant la vitesse d'avancement (ROP), notamment les caractéristiques géomécaniques des formations traversées tels que la contrainte de compression non confinée UCS les types et caractéristiques des outils.
- Un travail d'optimisation du ROP par l'application des méthodes analytiques, numériques et combinatoires d'optimisations.
- Optimisation multiobjectif du ROP pour tenir compte des répercussions qui peuvent être engendrées par un ROP excessif tels que les vibrations, usure de l'outil etc...
- Des essais sur des puits pilotes des nouvelles boues proposées pour une meilleure appréciation et une meilleure évaluation technique et économique.

References Bibliographiques

- Alum, M.A.; Egbon, F. (2011): Semi-Analytical Models on the Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration (ROP). In: Paper SPE-150806 Presented at Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Abuja, Nigeria 30 July–3 August (2011)
- Al-Riyamy, K. et Sharma, M.M. (2004): Filtration properties of oil-in-water emulsion containing solids. SPE paper 73769, pp.164-172,(2012)
- Alvarez Del Castelo, A (2012); SANTOYO, E. Garcia-Valladres, O;A new void fraction correlation inferred from artificial neuronal networks for modeling two-phase flows in geothermal wells. Comput. Geosci.41, 25–39 (2012)
- AVA, (2013): Fluid Handbook
- BAROID, (2012): BAROID Fluid Handbook
- Bingham, M. G (1965): A New Approach to Interpreting Rock drillability Drillability. Petroleum Publishing Company, Tulsa (1965)
- Bourgoyne, A.T. (1974); Young, F.S.: A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. J. SPE 14(04),371–384 (1974)
- CAILLERE S. Henin S. Rautueaum « Minéralogie des argiles » Tomes 1 et 2. Paris : Masson. 184-189, 1982.
- Eckel, R (1954) effect of mud properties on drilling rate. In: Paper API-54-119 Presented at Drilling and Production Practice. New York,1 January (1954)
- Elkatatny, S.M. (2016); Zeeshan, T.; Mahmoud, M.A.: Real time prediction of drilling fluid rheological properties using artificial neural networks visible mathematical model (white box). J. Pet. Sci. Eng.146, 1202–1210 (2016)
- Elkatatny, S.M. (2017); Mahmoud, M.A.; Zeeshan, T.; Abdulraheem, A.: New insights into the prediction of heterogeneous carbonate reservoir permeability from well logs using artificial intelligent network. Neural Comput. Appl. (2017). <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2850-x>
- Elkatatny, S.M. (2017); Tariq, Z.; Mahmoud, M.A.; Al-AbdulJabbar, A.: Optimization of rate of penetration using artificial intelligent techniques. In: Paper ARMA-2017-0429 Presented at 51st U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 25–28 June (2017)
- Elkatatny, S.M. (2017): Real time prediction of rheological parameters of KCl water-based drilling fluid using artificial neural networks. Arab. J. Sci. Eng. 42(4), 1655–1665 (2017a)
- Elkatatny. (2017°: New approach to optimize the Rate of Penetration using Artificial Neural network Arabian Journal for science and engineering (2017 b)
- Freidhem and Patermeuh, (1994): Non-fluorescinx oil-based drilling fluid
- Gareche. M, (2013): Formulation et caractérisation rhéologique des suspensions de bentonite en présence d'additifs polymériques

- Graham, J.W. and Muench, N.L. (1959): Analytical Determination of Optimum Bit Weight and Rotary Speed Combinations. Presented at the SPE/AIME Meeting, Dallas, Texas. 4-7 October 1959.
- Hossain, M.E.; Al-Majed, A.A. (2015): Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. Scrivener Publishing, Austin (2015)
- Jean Paul Nguyen (1993) : Technique d'exploitation pétrolière Le forage, Edition TECHNIP, 1993
- Low, FP et Anderson, D.M. (1958) Osmotic pressure equation for determining thermodynamic properties of soil water. Soil sci. 86,251-258
- Lippmann, R. (1987): An introduction to computing with neural nets. IEEE Assp Mag 4(2), 4–22 (1987)
- Maurer, W.C. (1962): The “Perfect-Cleaning” theory of rotary drilling. J.Pet. Technol. 14(11), 1270–1274 (1962)
- McCulloch, W.S.; Pitts, W. (1943): A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. Math. Biophys. 5(4), 115–133 (1943)
- MILPARK, CKS, (1990) : Manuel technique fluide de forage
- Moraveji, M.K.; Naderi, M. (2016): Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm. J. Nat. Gas Sci. Eng. 31, 829–841 (2016)
- Paiaman, A.M.; Al-Askari, M.K. (2009); Salmani, B.; Al-Anazi, B.D.; Masihi, M.: effect of mud properties on drilling rate. NAFTA 60(3), 129–134 (2009)
- R. Hecht Nielsen. 1990, Neurocomputing, 1990

Annexe a : Algorithme final du modèle mathématique développé de ROP

L'algorithme programmé sur MATLAB est le suivant :

```
clearall
clc
% Importer les données du fichier EXCEL
input=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','C2:N27');
target=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','N2:N27');
depth=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','O2:O27');
ROPPUIHS=xlsread('DJAFOUR et BELLACHE.xlsx','sheet','P2:P27');
input = transpose(input);
target = transpose(target);
depth = transpose(depth);
% creationdu réseaux de neurone
%donner une condition d'arret s
%compteur cp
s=2019;
cp=0;
while s==2019
%choisir le nombre de couches cachées
    v1=randi([7 30],1,1);
    %v2=randi([7 30],1,1);
    %v3=randi([7 30],1,1);
    trainFcn='trainlm';
    net = fitnet([v1],trainFcn);
    net = configure(net,input,target);
    net.divideParam.trainRatio = 70/100;
    net.divideParam.valRatio = 0/100;
    net.divideParam.testRatio = 30/100;
    net.trainparam.epochs=100;
    net.trainparam.max_fail=100;
    net.trainparam.goal=0;000002;
    net.trainparam.lr=0.5;
    %choisir la fonction de transfert,
    net.layers{1}.transferFcn = 'logsig';
    %net.layers{2}.transferFcn = 'logsig';
    %net.layers{3}.transferFcn = 'logsig';
    % Training network
    [net,tr] = train(net,input,target);
    outp = net(input);
    perf = perform(net,outp,target);
    mse=error_function(outp,target,26)
    AARD=100*abs(outp-target)/target
    R1=corrcoef(outp,target);
    R=R1(1,2)
    cp=cp+1
    %choisir l'erreur
    ifmse<0.9
        s=1;
    % obtenir la fonction
```

```
genFunction(net, 'ROP', 'MatrixOnly', 'yes')
end
% representaion graphique des resultats
end
plot(depth, outp, depth, ROPPIHS, '--');
xlabel('profondeur (m)')
ylabel('ROP (m/h)')
```

Annexe b : Les constantes du modèle de prédiction

- Les valeurs des bias **b1** sont les suivantes

b1=[1.8574071219615937;1.6828690268380648;1.6171640406662595;1.401272813966064
;1.3382256390323148;1.1890279047087267;1.0486943388767755;0.89617639673993421;
76319618166345593;0.66388959174334583;0.49375637576902381;0.45817879001163681;
0.1175973018655873;0.12251451663437948;0.065430469674928049;0.1742054218852957;
0.43348463480608873;0.43407245751692991;0.66203227386517161;0.6852043589904470
7;1.1419975227758161;0.97985476968379148;1.0240427817550068;1.2334660199062935;
1.6235040656858819;1.5747465186028133;-1.867976336405712;-1.7512590527127201];

- Les valeurs poids (**W1**) de la première couche (**hidden layer**)

IW1_1 = [-0.79901436083755895 -0.39771405341390487 0.073343616064958539
0.80984627491899552 -0.36905065635086898 0.12803299098336421
0.57038238611601166 -0.67358315674320024 -0.53843108552735153 -
0.058882561907472833 -0.81200943309243534 -0.58751162025225068
0.08458184442107157;0.32734664877106273 -0.60338254061585617
0.34457633591634806 -0.60138886861509133 0.011019804684556945 -
0.52427696982900784 0.61299538536452902 0.3381212922286036 -
0.94477698086785145;0.51534816844054099 -0.20224046979724208 -
0.18873669715687624 0.83611994770046705 -0.81593182351487636 -
0.33730978222088553 0.056557864068943781 -0.54492990870483515
0.79172844132861198 0.52994779771773759 -0.67990190687725416 -
0.3097956145226341;0.98049573280537972 0.093474710034220809 -
0.093476611509953192 -0.83077675124957517 -0.27137406301741673 -
0.088139906383178215 -0.088219555662917698 0.59373213040390616 -
0.054676070666269783 -0.5665855596570365 -0.72193571926699063
0.72811379081521332;0.81991406437697567 -0.26371896994127503 -
0.42977603243027868 -0.40996753412823045 -0.25998561157333239 -
0.22610654948694439 0.64020593111472057 -0.0074793947362311458
0.55531766175889152 -0.74096139218263579 0.70628887114977568 -
0.57522915257675766;-0.76105009286293446 0.21411895865445948
0.32661560523253402 -0.79476381226785364 -0.23830666445030588 -
0.32277808701671823 -0.69859051484163637 0.19577347584882962 -
0.85191575268581876 -0.29970559380840128 --0.68853120819806091
0.058008185190908564;0.08956683899213562 -0.039920401912950591
0.27636682754391229 0.39971285634873199 0.62549431045287596 -
0.083934140972095658 -0.018701546206981143 -0.77038774287968237
0.46247375331363361 -0.76457135606779869 0.99734697974676423 -
0.29041787481192394;0.70934443853911822 -0.20825770260419466 -
0.38425629137447664 0.98580932034218605 -0.073311167851258491 -

0.61486544319468994 0.31202465482106051 0.71816264060143209 -
0.32627095505707765 -0.8205185162371873 0.35743033288472897
0.078936955621157448;0.27847294787400334 0.57794418394358804
0.38097550215020265 0.14405217767838593 0.64885090412350421 -
0.96450854479819526 0.49212235830729234 0.067386499522217896 -
0.19982247540484482 0.24026974196616746 0.76369625093661775 -
0.76150616083074674;0.9320791146653411 0.68606397828531396 -
0.50131416769117076 0.45552231123578346 0.31873031855974304 -
0.55971215522561357 0.022711726679453308 -0.026605445567514072
0.79704141659988315 -0.2826305102041462 0.19203651135534175;
0.32269045482530723 -0.89681541323757241 -0.0075087199458392503
0.2987640848224008 -0.54950482021392366 -0.76238766618174525554
0.071631503887137835 0.25894268600241555 -0.10004708981913767
0.4237531627510901 -0.97908041823610559;0.81276590369677777777
0.23860.1649063432505368 0.051951193473733719 -0.72846907629022295
0.62984249565869699 -0.51501566349033612 0.523854254322074 -0
0.12827422352571949 -0.71326877908010355 -1.0082298480883747;-
0.80023143350833548 -0.255203831860015 0.049123591908414754 -
0.56518716556136939 -0.077089162788737828 0.56789825463638754 -
0.54445224027405648 0.70797406491933312 -0.84043445605191569
0.13436662161674232 -0.88418618316356046;-0.16970171258135774
0.21402295280703273 0.28010635787050486 -0.50269314332818249
0.32256724491714983 -0.50159393366999239 1.2285869315486198 -
0.40540682670650302 -0.67259594465607919 -0.67755765711908988
0.11349023563252081;-0.43001514318309725 0.26879243440550893
0.87637503341728529 0.44964912606406521 -0.13112220159451843
0.55784369261444833 -0.23779459513168022 0.85093025886128704 -
0.38786190580924362 -0.50477367207985913 -0.42698539387559237 -
0.74711052766744912;-0.57830537481151134 -0.48355051131766602
0.48814173357948776 0.16063607128039692 0.50588778391268374
0.30.71140314030203988 -0.22043938528752197 0.76289546855606916 -
0.34159907408051471 -0.80241092519081869 0.2748348097278962;-
0.93513734525885095 -0.90844778455265329 -0.23036052093109671 -
0.80450571302795104 -0.015929573675730099 -0.70437097162195017 -
0.28956440586716903 0.53681212825518965 0.079126955406662286 -
0.60324792365960123 0.21471557529620802 0.11883934830577322;
0.19563767604248816 -0.45250098443196501 -0.22793718144800046 -
0.63440568239854578 -0.67973605151129168 -0.64830842736218364 -
0.34718771172022422 0.49941436746942347 0.53824893101489568 -
0.21335917924857623;0.015976925102690269 -0.35460582491390019 -
0.87407233175827481 -0.22375065932294119 0.065496396109273339 -
0.67144670720937272 -0.22970267729593061 0.21192129016035954 -
0.7610765242664389 -0.38202626710933074 0.70066422216934876 -
0.88396058074030437;0.83810277610315931 0.29062425274397891

0.081701151282242798 0.99910705262136223 0.30191884828179666
0.23544521149320777 -0.28426999509566198 -0.159311608145256 -
0.95706859873198769 -0.68864694270374449;0.63931411851106745 -
0.13557091802616247 -0.32662055661128681 -0.88579695591782404
0.17479821302709284 0.41722817215164953 0.12826726348800049 -
0.83184275912744643 0.23260655681967135 0.30000942061055624
0.1886880261849658;-0.22615247412735331 -1.1538651991058575 -
0.15312828886275665 -0.31205767699153042 -0.010494499497102164
0.11411257956309251 0.73556813389287068 0.4266131441402925 0-
0.38570344710458765 0.97302252987824434;-0.27701582846669986 -
0.16822609356962587 -0.17892951813467917 0.7863365325123487 -
0.58336153093696974 -0.7213179715720256 -0.44798161746295911
0.73957654042026288 0.40314240358920567 0.61151807183289353 -
0.72320064328210787 0.11897865892662181;-0.57323778004137182
0.16083451560108367 0.14770855069635636 -0.72986480503842321
0.60397499221016904 0.37923521567246815 -0.69221125190471056 -
0.13229170256973857 0.80390506109768778 0.56819516405611314
00.67753962868534057;-0.017495412703902109 0.70446824325086133 -
0.040591752529850887 0.47001143565101194 0.97070112112480245
0.87978705928871481 -0.54751076657690678 -0.0068194409914231384
0.42659472120474851 0.71713365397306195 -0.056736251946585853
0.011736159133954755;-0.42320488733741241 0.21081607620869131
0.29258630232647687 0.83803816979198176 -0.13184579375124558 -
0.51046434749773084 -0.61599271603002104 0.24989166125753304
0.28547996114343838 -0.76287708293757295 0.0070446432406205926 -
1.0204146771942373;0.060739699825514283 0.28898316994654183
0.28274145528192096 -0.65781286727757782 0.75434397602905645
0.41685395446503731 0.59511390701252154 0.69052756159197926 -
0.43453575512120313;-0.21582437279305061 0.25161626983985863
0.63289298543661576 0.41575694760604692 -0.66239384753367425 -
0.67399054868139607 -0.097846227474976233 -1.0085620569147673 -
0.092567060298493681 -0.60849469106608833 -0.67668869036147872
0.23174256659784603];

- **Les valeurs de la deuxième couche (Layer 2)**

$b_2 = -0.3639928191708045;$

LW2_1 = [0.37156564373405582 -0.64874242604739318 -0.45467818680085753
0.72272353780934284 -0.17698587586552941 -0.063594536184263362
0.12209901883074026 -0.34223298518779571 -0.13401792904448057
0.30613025143293826 -0.415456905718109 -0.70584053316070838 -0.7675697699711187
0.18322957345634189 -0.13516944891944563 0.62454066554213383 -

Annexe c : valeurs de ROP réel et ROP simulé cas du puits HOUA-1

Profondeur	ROP PUIITS	ROP simulé
400	8	14,7932
410	6	10,9871
420	6	10,9871
430	7	11,8882
440	8	14,7932
450	6	11,9871
460	6	10,7155
470	7	10,0122
480	6	11,9871
490	8	14,7932
500	7	15,8882
510	8	14,7932
520	10	15,2228
530	8	14,7932
540	7	13,8882
550	6	11,9871
560	8	14,7932
570	11	16,6448
580	13	19,2252
590	3	13,8882
600	9	14,1932
610	1	11,9871
620	3	13,8882
630	14	19,0124
640	14	20,6035
650	13	17,2252
660	8	14,7932
670	8	14,7932
680	10	15,2228
690	11	17,1252
700	11	16,02
710	8	13,7932
720	8	8,612
730	0,7	15,7
740	8	8,7932
750	13	13,911
760	14	14,0124
770	14	14,0124
780	11	11,6448
790	11	11,1252
800	7	7,53
810	9	9,6532
820	8	8,7932

830	7	7,8882
840	11	11,6448
850	11	11,1252
860	12	12,3214
870	11	11,1252
880	11	11,01
890	11	11,1652
900	10	11,1252
910	12	11,1652
920	10	10,2228
930	11	11,6448
940	12	12,85
950	13	13,201
960	8	14,7932
970	8	14,7932
980	10	15,2228
990	10	15,3
1000	11	16,1252
1010	9	14,85
1020	8	14,7932
1030	11	18,6448
1040	10	16,2228