

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Master

Présenté par

BOUALLAG Salah

BOUDAUD Mohand Ouali

Filière : Hydrocarbures

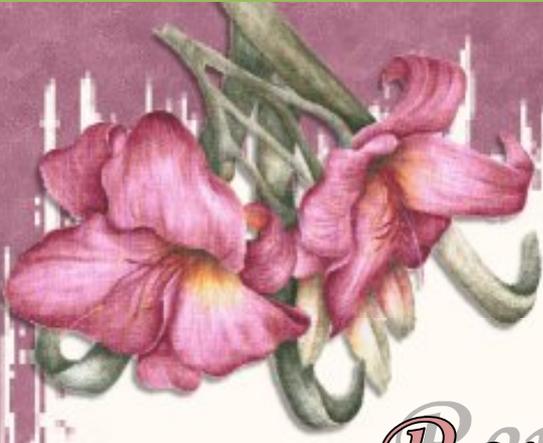
Option : Forage des puits

Optimisation du débit de nettoyage du puits BKNEP-1 dans le Bassin de Berkine

Devant le jury :

Mr. MELLAK Abderrahmane	Pr. UMBB	Président
Mr. HADJADJ Ahmed	MC. UMBB	Encadreur
Mr. BENTRIOU Abdelhak	MC. UMBB	Examineur
Mr. BENYOUNES Khaled	MC. UMBB	Examineur
Mme. AZRIL Nadjat	MA(A). UMBB	Examinatrice
Mme. BOUMAZA Nadia	MA(A). UMBB	Examinatrice

Année Universitaire : 2015/2016



Remerciements

*Toute la gratitude et le merci au **Dieu** notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail.*

Tous nous infinis remerciements à notre promoteur Mr A.HADJADJ Pour son aide, ses conseils et ses remarques qui nous ont permis de présenter notre travail dans sa meilleure forme.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire, particulièrement les membres du jury

Pr A.MELLAÏ, Dr A.BENTRIJOU, Dr K.BEN YOUNES, Dr N.BOUMAAZA et N.AZRIL

Nos sincères reconnaissances s'adressent aussi, à Mr R.MENANA ainsi que tout le personnel d'ENF38

Pour leurs accueils, orientations et contribution au bon déroulement de notre stage pratique.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvant ici l'expression de notre profonde gratitude et profonds respects.





Dédicaces

Je dédie ce travail

A la mémoire de ma mère, celle qui m'a toujours soutenu dans les moments difficiles, qu'elle repose en paix;

A mon père, mes frères et sœurs pour leurs encouragements;

Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils font pour moi « que Dieu vous garde et vous bénisse »,

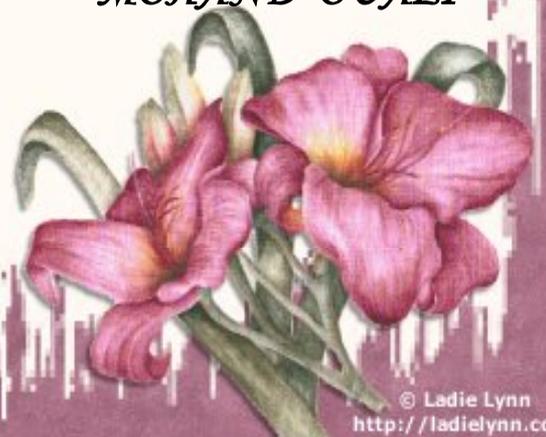
A Tous mes amis,

Ainsi qu'à mes camarades du groupe MAFP-11,

A Tous ceux qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce mémoire,

A Tous ce qui m'aiment et que j'aime,

MOHAND OUALI





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents qui m'ont élevé et éduqué et qui m'ont soutenu
durant toute ma vie,*

Mes FRÈRES et SŒURS,

Mes beaux-frères,

Mes neveux et nièces,

Toute la famille BOUALLAG,

A mon BINOME et tous mes AMIS.

*Et à toutes les personnes qui m'ont encouragé pour continuer mes
études.*



SALAH

Sommaire

Liste des figures

Liste des graphes et tableaux

Nomenclature

Introduction Générale 1

Chapitre I : Revue littérature

1. Introduction.....	2
1.1. Expérimental	2
1.1.1. Tomren et al	2
1.1.2. Ali Pirouzian et al	2
1.1.3. Mengjiao et al.....	3
1.1.4. Ford et al	3
1.1.5. Hareland et al	4
1.1.6. Okrajni et Azar	4
1.1.7. Siherman et Becker	4
1.1.8. Hussain et al	5
1.1.9. Sifferman et al	5
1.2. Expérimentale et Modélisation.....	6
1.2.1. Gavignet et Sobey	6
1.2.2. Paden et al	6
1.2.3. Clark et Bickham	6
1.2.4. Duan et al	6
1.2.5. Zeidler	7
1.3. Etude Numérique	7

Chapitre II: Généralité sur le bassin de Berkiné

1. Le bassin de berkiné	8
1.1. Introduction	8
1.2. Situation géographique.....	8
1.3. Géologie	9
2. Le puits BBKNEP-1.....	9
2.1. Introduction	9
2.2. Localisation	10

2.3.	Les coordonnées du puits BKNEP-1	10
2.4.	La litho-stratigraphiques.....	11
2.5.	La lithologie du puits.....	17
2.6.	Roches mères, piégeage et migration	18
2.7.	Roches couvertures	18
3.	Programme de forage	18
3.1.	Harmonisation des diamètres	18
3.2.	Programme des outils pour le puits BKNEP-1.....	19
3.3.	Programme de boue.....	19

Chapitre III: Généralité sur la boue de forage

1.	Introduction.....	20
2.	Rôle du fluide de forage	20
2.1.	Nettoyage du puits.....	20
2.2.	Maintien des déblais en suspension.....	20
2.3.	Sédimentation des déblais fins en surface	20
2.4.	Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde.....	20
2.5.	Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits	21
2.6.	Dépôt d'un cake imperméable	21
2.7.	Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile.....	21
2.8.	Augmentation de la vitesse d'avancement.....	21
2.9.	Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.).....	22
2.10.	Diminution du poids apparent du matériel de sondage	22
2.11.	Apport de renseignements sur le sondage	22
2.12.	Contamination des formations productrices	22
2.13.	Corrosion et usure du matériel.....	22
2.14.	Toxicité et sécurité.....	22
3.	Type de boue.....	22
3.1.	Boue à base d'eau.....	22
3.1.1.	L'eau de fabrication	22
3.1.2.	Les argiles :	23
3.1.3.	Les solides inertes :	23
3.2.	Les boues à base d'huile	23
3.2.1.	Les boues à l'huile	23
3.2.2.	Les boues inverses	24
4.	Forage à l'air, à la mousse, aux boues aérées.....	25
4.1.	Forage à l'air	25

4.2.	Forage à la mousse	25
4.3.	Boue à base d'eau aérée	25
5.	Caractéristiques de la boue de forage	26
5.1.	Caractéristiques physique.....	26
5.1.1.	La densité	26
5.1.2.	Concentration en sable	26
5.1.3.	Filtration.....	27
5.2.	Caractéristiques rhéologiques :	28
5.2.1.	Termes rhéologiques	28
5.2.2.	Régime d'écoulement	30
5.2.3.	Les modèles rhéologiques.....	31
5.2.4.	Gel est thixotropie.....	33
5.3.	Caractéristiques électrochimiques.....	34
5.3.1.	Le potentiel d'hydrogène (pH).....	34
5.3.2.	Alcalinité.....	35
5.3.3.	Capacité d'échange cationique.....	35
5.3.4.	La conductivité électrique.....	35
5.3.5.	Autres caractéristiques :.....	35

Chapitre IV: Nettoyage du puits

1.	Introduction.....	36
2.	Les conséquences d'un mauvais nettoyage	36
2.1.	Augmentation des torques, drags avec perte de couple et de WOB successive.....	36
2.2.	Difficultés de mouvement de la garniture et risque de coincement	36
2.3.	Instabilité des parois du puits et pertes de circulations	36
2.4.	La mauvaise cimentation.....	37
2.5.	Difficultés de contrôle du puits	37
2.6.	Influence sur le mode d'écoulement de la.....	37
2.7.	Bourrage de l'outil.....	37
2.8.	Coût de revient élevé.....	37
3.	Régime d'écoulement	38
3.1.	Écoulement en bouchon (Plug flow)	38
3.2.	Écoulement intermédiaire entre le plug flow et le laminaire (Plug laminar flow).....	39
3.3.	Régime laminaire	40
3.4.	Régime turbulent	40
4.	Vitesse annulaire.....	41
5.	Rhéologie du fluide.....	42

5.1. Gels (thixotropie) :	43
5.1.1. La thixotropie diminue l'efficacité du transport des solides.....	43
5.1.2. Gel 10 sec (gel 0) vs gel 10 min.....	43
6. Les paramètres de forage	43
6.1. Rotation/ Reciprocation.....	44
6.1.1. Rotation et régime d'écoulement :	44
6.1.2. Rotation et Debit :	44
6.2. Wiper trips.....	45
6.3. Vitesse d'avancement	45
6.3.1. Concentration de cuttings dans l'annulaire.....	45
6.3.2. Capacité inhibitrice de la boue.....	45
6.3.3. Contrôle de l'avancement.....	45
6.4. Capacité de traitement mécanique des solides	46
7. Densité	46

Chapitre V : Etude et optimisation du débit

1. Introduction.....	47
2. Calcul des paramètres hydraulique	47
2.1. La Vitesse annulaire	47
2.2. Nombre de Ryenolds des particules	47
2.3. Efficacité de transport	47
2.4. La concentration de cutting dans l'annulaire	48
2.5. La vitesse de sédimentation.....	48
a) Modèle de Chien.....	49
b) Corrélation de Moore	50
c) Corrélation de Walker et Mayes	51
2.6. Calcul des pertes de charge et de l'ECD	51
2.6.1. Calcul de l'indice de consistance dans l'annulaire	51
2.6.2. Calcul de l'indice de comportement dans l'annulaire.....	51
2.6.3. Calcul de la viscosité dans l'annulaire.....	52
2.6.4. Calcul de nombre de Reynolds dans l'annulaire.....	52
2.6.5. Calcul du facteur de friction.....	52
2.6.6. Calcul des pertes de charge dans une section	52
2.6.7. Calcul des pertes de charge total dans l'annulaire	53
2.6.8. Calcul de la densité équivalente de circulation ECD.....	53
2.7. Calcul hydraulique au niveau de l'outil	53
2.7.1. Calcul de la surface des duses.....	53

2.7.2. Perte de charge au niveau de l'outil	53
3. L'organigramme de calcul des paramètres hydraulique.....	55
4. Les données du puits BKNEP-1	59
5. Etude et optimisation du débit	59
5.1. Variation de l'efficacité de transport (ET) en fonction de Débit	59
5.1.1. Corrélation de Moore	59
5.1.2. Corrélation de Chien	61
5.2. La variation de l'ECD en fonction du débit	63
5.3. La Puissance et l'impact hydraulique au niveau de l'outil.....	63
6. Les résultats obtenus par le logiciel MUDWERE	66
7. Etude économique	66

Conclusion

Recommandation

Bibliographie

Annexes

Figure.1: Agent tensioactif sur un cutting	3
Figure.2: Situation du bassin de Berkine	8
Figure.3: Plan de position du puits BKNEP-1	10
Figure.4: Schéma synoptique et plan de position du puits BKNEP-1	11
Figure.5: Coupe lithologique du puits BBKNEP-1	17
Figure.6: Maintien des déblais et nettoyage du puits	20
Figure.7: Cavage et resserrement des parois du puits.....	21
Figure.8: Formation du cake imperméable	21
Figure.9: Densimètre	26
Figure.10: Elutriomètre	26
Figure.11: Filtration de la partie liquide de la boue dans la formation.....	27
Figure.12: Filtre-presse HP/HT	27
Figure.13: Viscosimètre Marsh	29
Figure.14: Viscosimètre fann Model 35A 6 Speed V-G Meter.....	29
Figure.15: Régimes d'écoulement	31
Figure.16: Modèles rhéologiques	33
Figure.17: Echelle de PH.....	34
Figure.18: PH mètre	34
Figure.19: Papier PH	34
Figure.20: Effet du régime d'écoulement sur la concentration annulaire des cuttings.....	38
Figure.21: Profil de vitesse en Plug flow	39
Figure.22: Profil de vitesse en Plug laminar flow	39
Figure.23: Profil de vitesse en régime laminaire	40
Figure.24: Profil de vitesse en Régime turbulent	40
Figure.25: Efficacité du nettoyage en fonction de la vitesse annulaire	41
Figure.26: Débit « critique » en fonction de l'inclinaison.....	42
Figure.27: Vitesse annulaire requise en fonction de la taille " d " des particules.....	43
Figure.28: Effet de la vitesse de rotation sur l'enlèvement des cuttings	44
Figure.29: Effet de la vitesse de rotation et celle d'annulaire sur l'enlèvement des cuttings.....	45
Figure.30: Influence de la densité sur l'enlèvement des cuttings	46
Figure.31: Logiciel Mudware	Annexe3

Graphe 01 : Efficacité de transport en fonction de Débit « corrélation de Moore ».....60
 Graphe 02 : Concentration des cuttings en fonction de Débit60
 Graphe 03 : Efficacité de transport en fonction de Débit « corrélation de Chien ».....61
 Graphe 04 : Concentration des Cuttings en fonction de Débit62
 Graphe 05 : Variation de l’ECD en fonction de Débit63
 Graphe 06 : Variation de HSI en fonction de Débit64
 Graphe 07 : Variation de l’impact hydraulique IF en fonction de Débit64
 Graphe 08 : Variation de CCI, ECD, HSI en fonction du débit65
 Graphe 09 : Variation de l’impact hydraulique en fonction du débit66

Tableau 1: Coordonnées du puits BKNEP-110
 Tableau 2: Harmonisation des diamètres.....18
 Tableau 3: Programme des outils19
 Tableau 4: Programme de boue19
 Tableau 5: Relation entre le PH et l’alcalinité pour l’eau pure35
 Tableau 7: Données du puits BKNEP-159
 Tableau 8: Variation de Va et Vs en fonction du débit « corrélation de Moore ».....59
 Tableau 9: Variation de Va et Vs en fonction du débit « corrélation de Chien ».....61
 Tableau 10: Variation de l’ECD en fonction du débit.....63
 Tableau 11: Variation de la puissance et l’impact hydraulique en fonction du débit.....63
 Tableau 12: Variation des paramètres Va et ECD, HSI, CCI et Pa en fonction du débit65
 Tableau 13: Coût de la boue de forage67

symbole	Signification	unité
dv	Différence de vitesse entre deux lames voisines	m/s
dr	Distance entre les deux lames.	m
τ	Tension de cisaillement	lb/100ft ²
V	Vitesse de déplacement	m/s
D	Diamètre	m
P	Masse volumique	Kg/m ³
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement.	s ⁻¹
μ_{app}	Viscosité apparente	cp
L600	Lecture Fann 600	(tr/min)
L300	Lecture Fann 300	(tr/min)
L3	Lecture Fann 3	(tr/min)
τ_c	Contrainte seuil de cisaillement	lb/100ft ²
μ_p	Viscosité plastique.	cp
N	Indice de comportement rhéologique	
K	Indice de consistance	dyne.s
τ'	Lecture de tension de cisaillement au taux plus élevé de cisaillement	lb/100ft ²
τ	Lecture de tension de cisaillement au taux inférieur de cisaillement	lb/100ft ²
$\dot{\gamma}$	Taux plus élevé de cisaillement	s ⁻¹
$\dot{\gamma}$	Taux inférieur de cisaillement	s ⁻¹
E_T	Efficacité de transport	%
C_a	Concentration des déblais dans l'annulaire	%
Q	Débit	gpm
d_{OH}	Diamètre de puits	in
d_1	Diamètre des tiges ou masses tiges	in
ρ_f	Masse volumique de fluide de forage	ppg
v_s	Vitesse de sédimentation des cuttings	ft/min
N_{Re}	Nombre de Ryenolds de la particule	
f	Facteur de friction	
d_c	Diametre des cutting	in
ROP	Vitesse d'avancement	ft/hr
ρ_c	Masse volumique des déblais	ppg
g	Accélération de la gravité	ft/s ²
d_{dp}	Diamètre de la tige de forage	in
T_c	Epaisseur de la particule	in
γ_b	Taux de cisaillement limite	s ⁻¹
τ_p	Contrainte de cisaillement (particule)	lb/100ft ²
γ_p	Taux de cisaillement particule	s ⁻¹

n_a	Indice consistance dans l'annulaire	
K_a	Indice de comportement dans l'annulaire	poise
μ_{ea}	Viscosité annulaire	cp
f_a	Facteur de friction annulaire	
L	Longueur de la section annulaire	ft
D_2	Diamètre de la section (puits ou tubage)	in
D_1	Diamètre de tige ou masse tige dans la section	in
Re_a	Nombre de Reynolds annulaire	
Re_L	Nombre de Reynolds pour le régime laminaire	
Re_T	Nombre de Reynolds pour le régime turbulent	
P_a	Perte de charge annulaire	psi
P_{aT}	Perte de charge totale dans l'annulaire	Psi
ECD	Densité équivalente de circulation	ppg
TFA	Surface des duses	in ²
n	Nombre de duses	
J	Diamètre des duses en (1/32)"	in
ΔP_b	Pertes de charge à travers l'outil	psi
HHP	Puissance hydraulique (Hydraulic Horse Power)	hp
HSI	Puissance hydraulique par unité de surface (Hydraulic Horse Power per square inch)	hp/in ²
V_n	Vitesse de jet de fluide	ft/s
IF	Force d'impact	lbf
IF/in^2	Force d'impact par unité surface	lbf/in ²

Introduction

Lors des forages pétroliers, la traversée des différentes formations n'est pas une opération facile étant donné les différents problèmes qu'on peut rencontrer tels que l'itinéraire entrepris par la boue de forage donc l'établissement d'un programme de boue constitue une opération primordiale pour la réussite d'un forage. Il s'agit en effet de choisir les caractéristiques de la boue utilisée (débit, densité, rhéologie, etc.) afin qu'on puisse atteindre l'objectif dans les meilleures conditions économiques et assurer un bon nettoyage du puits.

En effet, le problème de nettoyage des puits se manifeste très sévèrement dans la partie déviée où un lit stationnaire de débris se développe et peut conduire aux différents problèmes (coincement de la garniture, bourrage de l'outil, mauvaise cimentation...etc.). Il dépend essentiellement de la nature du fluide de forage, des dimensions du trou, de la granulométrie des débris et des paramètres de circulations.

L'objectif de notre travail est l'étude et l'analyse des différents paramètres dynamiques affectant le nettoyage des puits (débit, vitesse annulaire, vitesse de sédimentation...) puis essayer d'optimiser leurs valeurs pour arriver à obtenir un rapport de nettoyage satisfaisant (efficacité de transport des déblais) afin d'améliorer l'opération de forage et en particulier le balayage des cuttings de la phase 8^{1/2} du puits BKNEP-1 situé au niveau du bassin de Berkine.

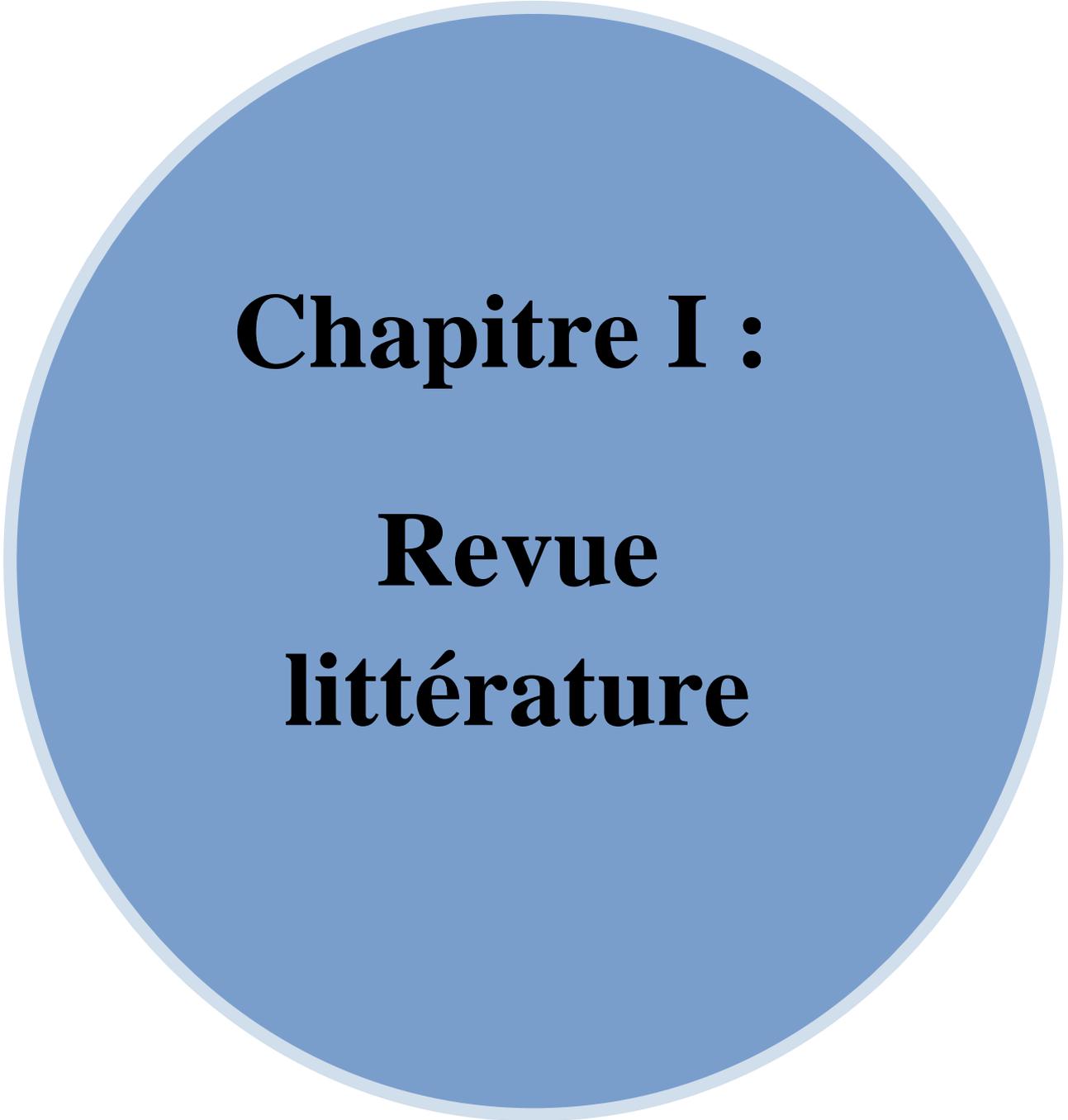
Ce mémoire est divisé sur 5 chapitres, dont le premier présente une revue et un aperçu des travaux fondamentaux sur le transport des déblais.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités du bassin de Berkine, il aborde aussi des notions et le programme du puits BKNEP-1.

Le troisième chapitre est dédié aux généralités sur la boue de forage en citant leurs rôles et leurs fonctions, les différents types de boue, les caractéristiques exigées d'une boue face aux problèmes de forage ainsi que les caractéristiques de filtration.

L'intérêt du quatrième chapitre est de présenter les différents problèmes liés au nettoyage du puits avant de traiter l'efficacité de transport et les paramètres de forage qu'on doit suivre afin de remédier à ce phénomène.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude numérique qui consiste à analyser les données sous la forme d'un programme Matlab qu'on a développé par des formules empiriques et théorique (modèle de Moore et Chien) pour l'analyse et l'optimisation du débit de circulation afin d'assurer un bon nettoyage du puits BKNEP-1



Chapitre I :

**Revue
littérature**

1. Introduction

Dans la littérature, il existe plusieurs études documentées sur les questions de transport de déblais, Celles-ci comprennent des études empiriques et théoriques (modèle mécaniste et travaux expérimentaux).

Le comportement de transport de déblais dans un puits dévié est différent dans le puits vertical, le problème devient pire dans ce dernier.

Dans cette section, nous allons mettre en évidence les principaux documents d'enquête dans la littérature.

1.1. Expérimental

Les travaux expérimentaux concernant le dispositif expérimental mis en place et les enquêtes majeures sont les suivants :

1.1.1. Tomren et al [1]

Il ont rapporté les résultats d'expériences de laboratoire réalisées avec divers fluides de forage et déblais dans des tuyaux en plastique avec des angles d'inclinaison variant de vertical (0) à l'horizontale (90 °). La longueur de la section d'essai était de 40 ft, la taille de l'annulaire de 5 in x 1,9 in et les débits allant jusqu'à 200 gal / min, le tube tourne dans l'anneau. Les chercheurs ont observé que :

- Pour des puits proches de la verticale (à savoir lorsque l'écart de la verticale est inférieur à 10 °), le transport de déblais est similaire à la situation verticale, il a été observé qu'avec 10 ° le mouvement des déblais et les concentrations ne sont que légèrement pire que les tests verticaux ;
- Lors des augmentations d'inclinaison de puits, les déblais s'accumulent et donc des lits se développent à des faibles débits ;
- Pour un débit donné, l'épaisseur du lit augmente avec la déviation jusqu'à un angle où il devient indépendant de l'angle de déviation ;
- Dans des conditions données de déviation et de débit, l'épaisseur du lit est fortement influencée par l'excentricité des tiges de forage, mais seulement modérément influencé par la viscosité de fluide. La performance de transport diminue à mesure que l'inclinaison du puits et le taux de la pénétration augmente ;
- Les angles de puits entre 40° et 50 ° sont critiques en raison de l'accumulation de déblais et le glissement du lit de débris vers le bas ;
- Les boues à haute viscosité ont été observées pour fournir un meilleur transport que les boues à faible viscosité.

1.1.2. Ali Pirouzian et al [2]

Ils ont étudié expérimentalement l'influence de la viscosité du fluide de forage, la vitesse et l'inclinaison du trou sur le transport des déblais dans les puits horizontal et déviés.

Pour l'enquête, les auteurs ont examiné trois types de fluide de forage et l'expérience a été réalisée en utilisant une longue boucle d'écoulement de 17 ft, de 2 in de diamètre.

Au cours des essais, ils ont déterminé les performances de transport des déblais à partir des mesures de poids. Le résultat de cette expérience montre que :

- Pour la vitesse d'écoulement constante, l'augmentation de la viscosité du liquide améliore la performance de transport des déblais environ 8% sous tous les angles à condition que le régime d'écoulement reste turbulent ;
- L'augmentation de la viscosité transforme le régime d'écoulement vers un écoulement transitoire ou laminaire et réduit la performance de transport des déblais d'une valeur moyenne de 12%.

1.1.3. Mengjiao et al [3]

Ils ont écrit une nouvelle approche pour améliorer le transport des déblais dans les puits horizontaux à long déports. La méthode consiste à contrer la force gravitationnelle tout en augmentant simultanément la force de frottement en fixant les particules de forage avec des agents tensio-actifs chimiques.

Pendant l'essai, ils ont effectué des expériences de transport avec et sans des additifs chimiques, leur résultat d'essai en coupe horizontale montre que :

- Sans additifs chimiques, pas de déblais transportés ;
- Avec l'addition d'agents tensio-actifs chimiques à chaîne linéaire, 30% des déblais étaient transportés par l'air et beaucoup d'autres ont été partiellement déplacés aussi à travers le tube ;
- L'utilisation des tensio-actifs chimiques ramifiés, 58% des déblais ont été transportés.

Comme le montre la figure 1 :

Le transport des déblais devient difficile dans les puits inclinés et horizontaux, en effet, la force gravitationnelle provoque la sédimentation des particules au fond.

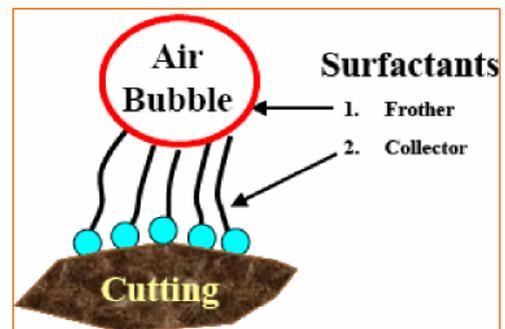


Figure 1 : agent tensioactif sur un cutting

Ils ont étudié expérimentalement le phénomène de transport des déblais dans un puits. L'enquête principale obtenue à partir de ces expériences est que la vitesse qui initie le transport de déblais est sensible à l'inclinaison du puits et que l'efficacité de fluide à éliminer des déblais forés dépend de sa rhéologie et son écoulement (laminaire ou turbulent).

L'observation dans l'eau montre que sous turbulence le transport de déblais a été très efficace.

Le paramètre opérationnel tel que la rotation du tube montre peu ou pas d'effet lors de la diffusion de l'eau, mais il a réduit significativement la vitesse critique de transport lorsqu'il circule avec des fluides de viscosité moyenne ou très élevée.

1.1.5. Hareland et al [5]

Ils ont étudié expérimentalement le transport de déblais de calcaire à faible toxicité avec des boues à émulsion inverse (à base d'eau et d'huile minérale)

Tel que rapporté par les auteurs, leurs expériences mis en place d'autres enquêteurs similaires comme les travaux de **Tomren et al [1]** et **Okanji [6]**.

Après l'analyse des données expérimentales, les auteurs sont arrivés aux conclusions suivantes :

- Il a été observé que avec l'augmentation de la yield point et la viscosité plastique il y'aura une diminution de taux de transport des déblais dans les puits fortement inclinés. Ils ont également observé que cet effet est plus sévère dans les boues à émulsion inversée à base d'huile.
- Pour les grandes inclinaisons, une diminution de la yield point et de viscosité plastique associée à l'augmentation du débit, montre une amélioration du nettoyage du puits pour les deux types de boue. Cette conclusion est basée sur l'observation du lit formé et formation de film.
- Pour une inclinaison de puits de 40 ° à 50 °, les boues à base d'eau montrent un meilleur nettoyage du trou que les boues à base d'huile qui fournit une rhéologie similaire.

1.1.6. Okrajni et Azar [6]

Ils ont étudié expérimentalement l'effet de la rhéologie de la boue sur le nettoyage de trou annulaire. Ils ont identifié trois régions de transport de coupe à savoir :

- Région 1 (0 à 45 °)
- Région 2 (45 à 55 °)
- Région 3 (55 à 90 °)

Leur travail montre que sous le régime turbulent, le transport de déblais n'est pas affecté par les propriétés rhéologiques de la boue (rendement et le rapport YP/ PV) dans les trois régions. D'autre part, lorsque l'écoulement est laminaire une grande valeur de rendement de boue réduit les concentrations de déblais ce qui montre une meilleure performance de transport. L'effet de la yield point de la boue est très important dans les puits à faible angle (Région 1) et devient presque négligeable dans la région 3.

Les auteurs ont également observé un mauvais nettoyage lorsque l'angle était de 40 à 45° (pour les faibles débits). Ils ont également analysé l'effet de l'excentricité et le résultat montre qu'un effet relativement faible pour un faible angle d'inclinaison (Régions 1 et 2) pour tous les régimes d'écoulement et devient modéré dans la région 3 sous écoulement turbulent et significatif pour un écoulement laminaire, en plus ils ont observé en général que le débit de la boue a un effet dominant sur le nettoyage du trou annulaire.

1.1.7. Siherman et Becker [7]

Ils ont réalisé une expérience de nettoyage de trou dans une tendance bien variée de 45-90°, la longueur de l'expérimentation était de 18,3 m de longueur, et de 3 et 4.5 in de diamètre et le trou de forage avait un diamètre intérieur à 8 in.

Les chercheurs ont évalué l'effet de plusieurs paramètres sur le nettoyage de trou qui sont la vitesse, la densité, la rhéologie, le type de la boue, la taille de déblais, le taux de pénétration (ROP) la vitesse de rotation de tiges, l'excentricité des tiges, diamètre des tiges, et l'angle de trou.

La vitesse de la boue et sa densité ont le plus grand effet sur le nettoyage du trou. Selon les enquêteurs, on résume que :

- Si le poids de la boue augmente, les lits de déblais diminuent.
- pour les petits déblais (0.08 in. [2 mm]), et faible ROP (50ft / h), l'effet de la rotation de tiges sur l'accumulation de déblais est plus grand dans certaines conditions telles que des angles d'inclinaison près de l'horizontale.
- Les lits de déblais formés à des angles d'inclinaison entre 45 et 60 ° peuvent glisser sans cesse et dégringoler. Aux angles de 60 à 90 ° de la verticale, il y'aura peu de glissement de déblais ou avec une tendance réduite.

1.1.8. Hussain et al [8]

Ils ont mené une étude expérimentale du transport de déblais, leur enquête montre que l'augmentation de la vitesse annulaire et la limite de l'élasticité de fluide de forage sont des conditions favorables pour l'efficacité de nettoyage de puits.

1.1.9. Sifferman et al [9]

Ils ont mené des expériences en utilisant un anneau vertical pour étudier les différents paramètres affectant le rapport de transport des déblais à la vitesse annulaire pour différents systèmes de boue sur le terrain. Ils ont conclu que la vitesse de rotation, la dimension annulaire et l'excentricité eue un effet minime sur le transport de déblais.

Une étude expérimentale à grande échelle a été réalisée en utilisant plusieurs tubes de forage et de dimension de tubage de 140ft avec un écoulement vertical ; la vitesse annulaire utilisée pour l'évaluation a été modifiée (4 à 200 ft / min) en utilisant les différentes propriétés rhéologiques du fluide, réduisant la taille et les paramètres opérationnels.

Entre autre l'observation, les facteurs de contrôle les plus importants sont les suivants :

- La vitesse annulaire et les propriétés rhéologiques sont les paramètres qui contrôlent le plus le transport des déblais. Les vitesses annulaires de 50 ft / min sont suffisantes pour le transport des déblais dans les boues typiques ;
- Avec l'augmentation de la viscosité du fluide l'efficacité du transport de déblais augmente. Dans un écoulement laminaire d'huile comme fluide transport, le transport des déblais est de 85 à 90% des valeurs théoriques basées sur la vitesse de glissement terminale des déblais. Dans un écoulement turbulent, le transport des déblais est d'environ 75% des valeurs théoriques ;

- La dimension de tubage et de la densité du fluide de forage montre un effet modéré, mais la rotation du tube de forage, le taux de forage (concentration des déblais), et l'excentricité des tiges ont eu un effet minime sur le transport des déblais.

1.2. Expérimentale et Modélisation

Cette section présente également quelques travaux expérimentaux ainsi que des vérifications de modèle. La modélisation est une partie importante de la recherche sur le nettoyage de puits, si le modèle prédit le phénomène de transport de déblais, on peut exécuter plusieurs expériences informatiques.

1.2.1. Gavignet et Sobey [10]

Ils ont présenté un modèle de transport de déblais en fonction des phénomènes physiques et connu comme le modèle à double couche. Les chercheurs ont comparé leur modèle avec les données de laboratoire d'Iyoho et al. Le modèle montre relativement une bonne prédiction du système de fluide Carbopol (polymère) que l'eau.

1.2.2. Paden et al [11]

Ils ont mis au point des modèles de prédiction de vitesse de transport minimum pour les suspensions de déblais et déblais glissant.

Les prédictions ont été comparées avec les données de laboratoire, les chercheurs ont observé que l'augmentation de la viscosité du fluide a pour résultat une diminution de circulation de MTV (vitesse minimal de transport) et que l'efficacité de nettoyage du trou dépend de la rhéologie des régimes d'écoulement de fluide (à savoir l'écoulement laminaire ou turbulent).

1.2.3. Clark et Bickham [12]

Ils ont développé un modèle mécanistique basé sur les forces d'inertie agissant sur une particule, ce modèle prédit que le débit minimum de la pompe pour transporter une particule. Ils définissent trois modes pour le transport de déblais : décantation, levage, et rouler chaque dominante dans une certaine gamme d'angles de puits de forage. Clark et Bickham sont venus avec des solutions pour les vitesses minimales pour le transport de particules sur le lit. Cependant, le modèle prend en compte la vitesse annulaire (axiale) seulement sans tenir compte de la vitesse de rotation des tiges de forage. Le modèle prédit assez bien les données expérimentales données.

1.2.4. Duan et al [13]

Ils ont étudié expérimentalement le phénomène de transport des déblais de petite taille (deux conditions pour le transport efficace), ceux-ci sont :

- la vitesse du fluide minimale nécessaire pour amorcer l'érosion du lit des solides.
- la vitesse minimale de fluide qui empêche la formation d'un lit.

Pour l'enquête, ils ont utilisé une boucle d'écoulement ($8 \times 4,5$ in, 100 ft de longueur), les déblais utilisés étaient du sable de 0,45 mm et 1,4 mm de diamètre dans différents fluides avec une plage d'inclinaison.

Les résultats montrent qu'en termes d'érosion du lit l'eau est plus efficace que les solutions de polymères à faible concentration, leur observation expérimentale montre également que les solutions polymères empêchent la formation de lit mieux que l'eau.

Duan et Al ont également mis au point un modèle mécaniste pour le lit solide et montré les prédictions du modèle en bon accord avec les résultats expérimentaux. En outre, ils recommandent que l'eau ou les fluides à basse viscosité soient préférables aux fluides visqueux pour des opérations de nettoyage lors de l'arrêt du forage, de plus les solutions de polymères pour le transport des petites-solides lors de la progression du forage.

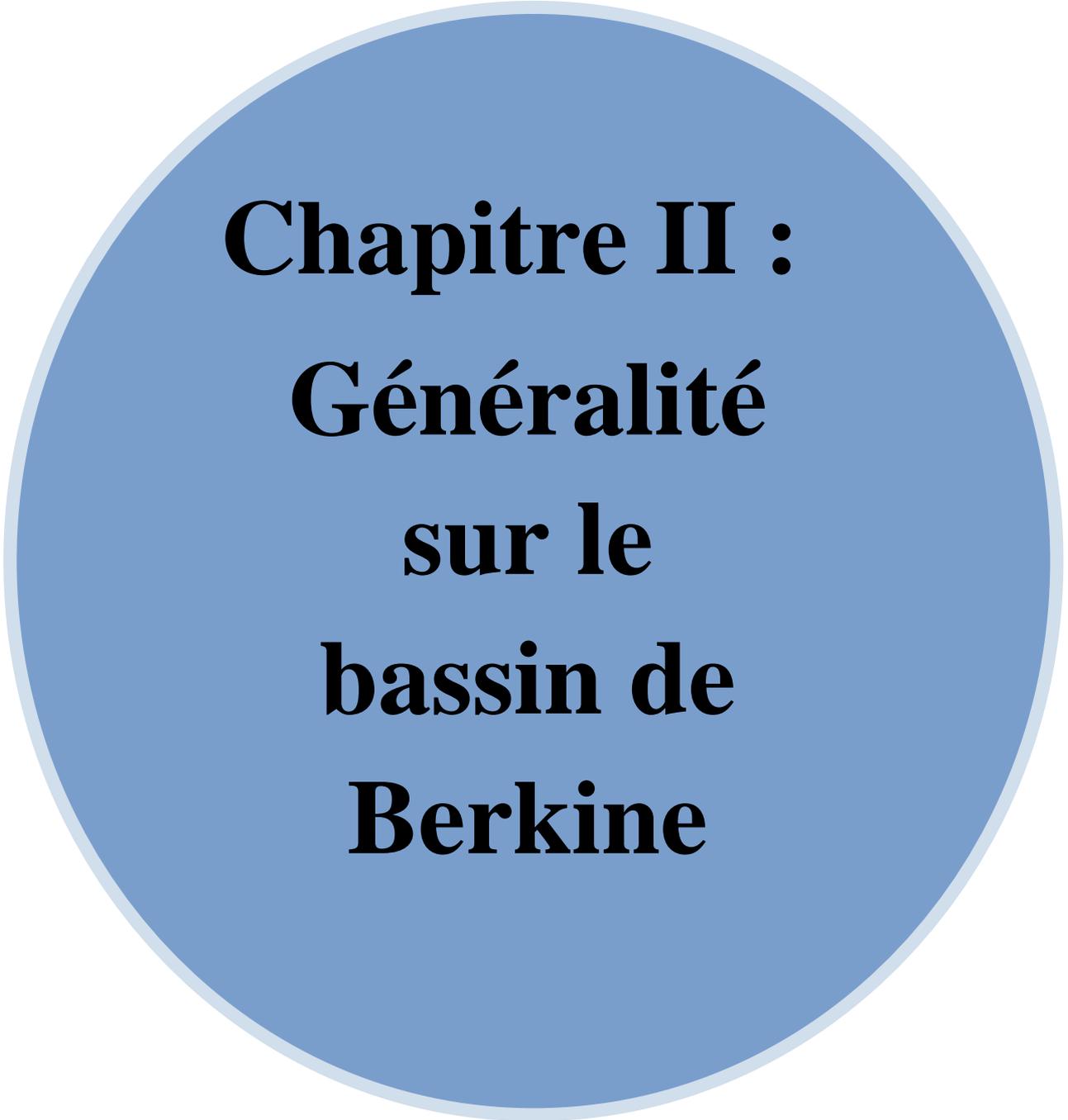
1.2.5. Zeidler [14]

Il a mené une série d'expériences pour essayer de prévoir les fractions de récupération.

L'investigateur a développé une corrélation pour la vitesse de sédimentation des déblais dans un fluide newtonien pour la fraction de récupération de déblais soumis à un écoulement turbulent d'eau dans l'espace annulaire, puis il a conclu que la rotation de la conduite a eu une augmentation significative de la récupération des particules tandis que la viscosité n'est pas un facteur important dans le transport des déblais

1.3. Etudes Numériques

Un modèle à trois couches plus avancé a été calculé par **Nguyen et Rahman [15]** ; Cependant, l'applicabilité du modèle n'a pas été vérifiée par rapport aux données mesurées. Les auteurs ont présenté une étude paramétrique pour étudier les effets des déblais, le fluide de forage et les paramètres d'excentricité sur le phénomène de transport des déblais. Néanmoins, Ils ont indirectement vérifié leurs résultats de simulation contre les tendances des données expérimentales rapportées par plusieurs chercheurs.



Chapitre II :
Généralité
sur le
bassin de
Berkine

1. Le bassin de Berkine

1.1. Introduction

Des activités d'exploration dans le bassin de Berkine ont commencés vers la fin des années 1950 avec la découverte du gaz et du condensât en 1958 dans les quartzites de Hamra (Ordovicien) et les réservoirs Triasiques, environ 150 puits ont été forés ayant pour résultat la découverte d'un important nombre des gisements d'huile et du gaz.

1.2. Situation géographique

Le bassin de Berkine est situé dans la partie nord de la plateforme saharienne, il est limité par :

- les frontières : tunisiennes et libyennes à l'est
- bassin d'Ilizi au sud
- dôme de Dahar au nord
- Hassi-Messaoud à l'ouest

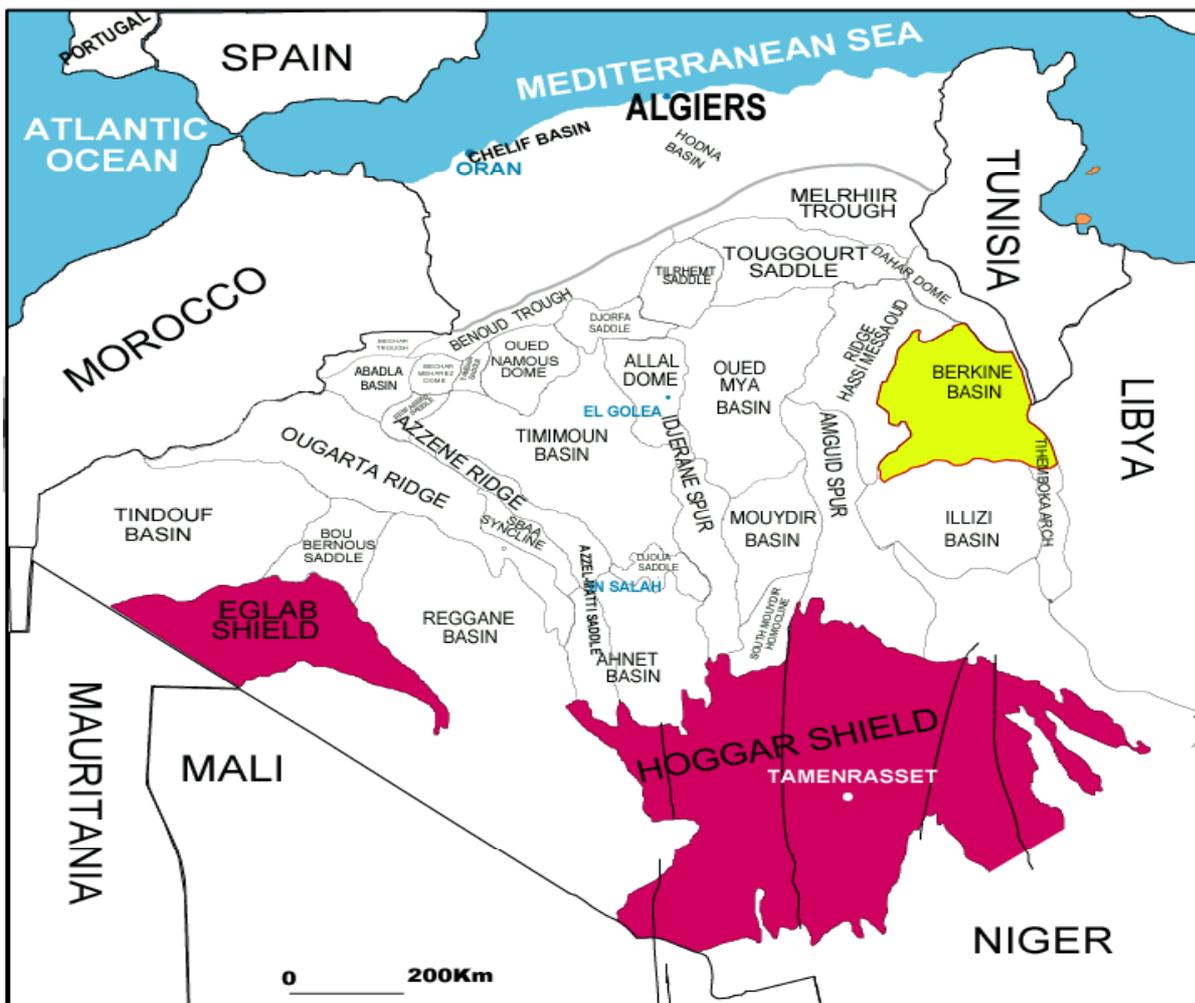


Figure.2 : Situation du bassin de Berkine

1.3. Géologie

Le bassin de Berkine constitue la partie occidentale d'un plus grand bassin (Celui de Ghadamès) qui se prolonge vers la Lybie et au sud de la Tunisie. La partie Algérienne de ce bassin qui est connue sous le nom du grand Erg Oriental, s'étend sur une surface estimée à 120,000 km² et prolonge en E-W et N-S sur 350 Km.

Le bassin de Berkine est influencé par une série structurale « moles » où sa structure et sa sédimentation sont contrôlées par le temps géologique. Ce bassin est le résultat des différentes phases tectoniques depuis le Précambrien jusqu'au Tertiaire.

Le bassin de Berkine est le bassin le moins exploré de la province orientale. Les travaux récents ont mis en évidence des accumulations de pétrole et montrent également que cette zone peut receler des réserves importantes d'hydrocarbures.

Les principaux réservoirs sont constitués par :

- Les grés du dévonien inférieur
- Les grés de l'ordovicien et du cambrien
- Les niveaux gréseux du carbonifère
- Les sable et grés du trias

Les roches mères sont constituées par les argiles du gothlandien dont l'épaisseur peut atteindre 250 à 300m et du dévonien supérieur et moyen.

Les argiles de l'Ordovicien et du Carbonifère ont également des caractéristiques de roches mères.

La couverture est assurée par les couches salifères du lias.

2. Le puits BBKNEP-1

2.1. Introduction

Le forage Berkine Nord Est Profond-1 (BKNEP-1) est implanté dans le cadre du planning 2015 des activités de forage de la Division Exploration. Ce forage de catégorie exploration est situé sur le bloc 404a du périmètre de recherche Ourhoud II, à 250m à l'ouest de la limite de la surface d'exploitation BKNE du gisement d'huile et gaz TAGI en association Sonatrach-Anadarko.

Le forage BKNEP-1, a pour objectif pétrolier principal, l'exploration des unités gréseuses (A et M) du Silurien Argilo-gréseux (SAG), productives de gaz à condensat dans les puits voisins, BBKP-1 (unité M2), BBKP-2 (unité A1) et BBKPSE-1 (unité M2) situés une vingtaine de kilomètres au nord.

Ce forage aura pour objectif pétrolier secondaire les grés du Siegénien (niveaux C, D et E) qui ont produit de l'huile et du gaz au niveau du puits BBKPSW-1, situé 18km au nord-ouest.

La profondeur finale prévue pour le puits BKNEP-1 est de 5450 m, soit 70m dans la formation du Silurien Argileux.

2.2. Localisation

Le puits Berkine Nord Est Profond-1 (BKNEP-1) se situe sur le bloc 404a du périmètre de recherche Ourhoud II, à 1.9 Km au nord de BKNE-2 et à 4.5 Km au sud-est du puits BBKS-2. Le point d’implantation est situé sur le croisement des lignes sismiques : inline 13223 et cross line 5748 du cube sismique 3D satellite (ANADARKO). [32]

2.3. Les coordonnées du puits BKNEP-1

Coordonnées du puits BKNEP-1 (Berkine Nord Est Profond-1)			
	UTM	Géographiques	
X	403950.00 m	Longitude : 07°	59' 45.31" E
Y	3408773.91 m	Latitude : 30°	48' 37.98 " N
Élévation	Zsol : 193.56m	Ztable : 202.56m	
Ellipsoïde	Clark 1880		
Projection	UTM, Fuseau 32		

Tableau.1: Coordonnées du puits BKNEP-1

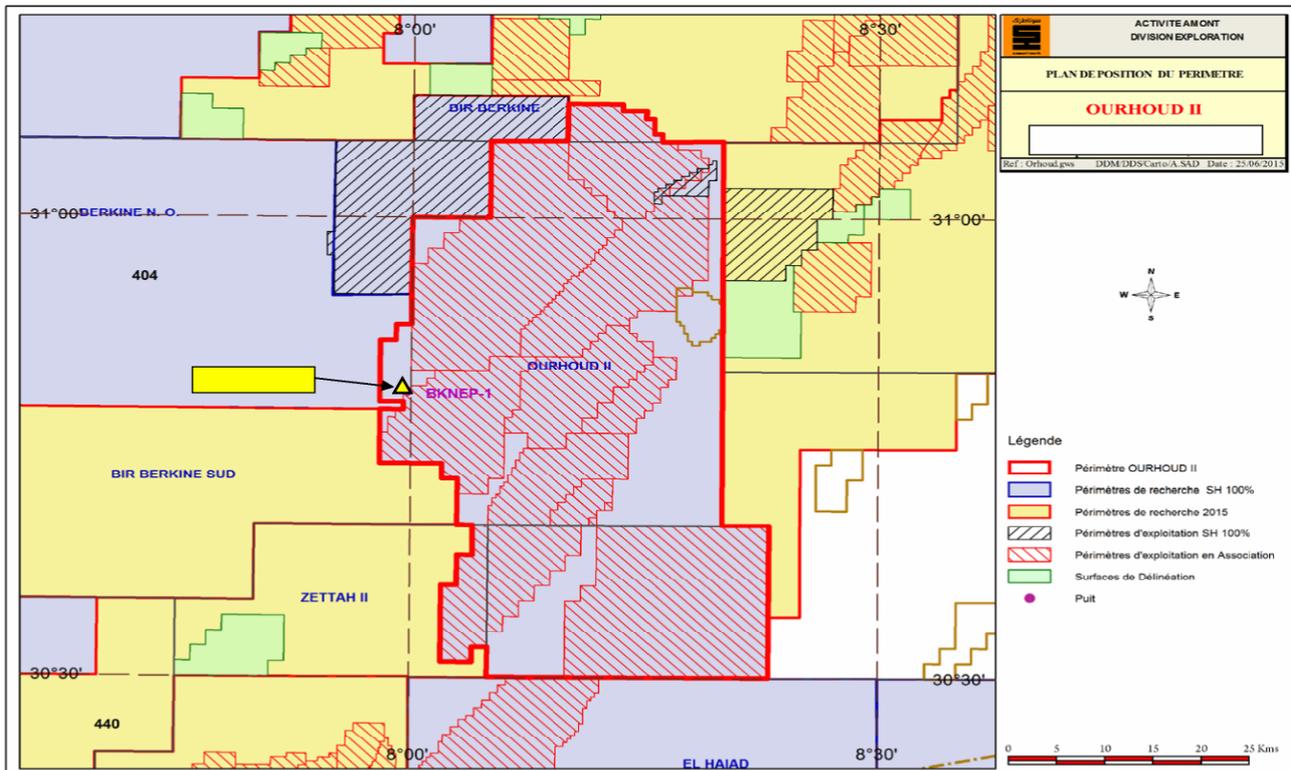


Figure.3 : Plan de position du puits BKNEP-1

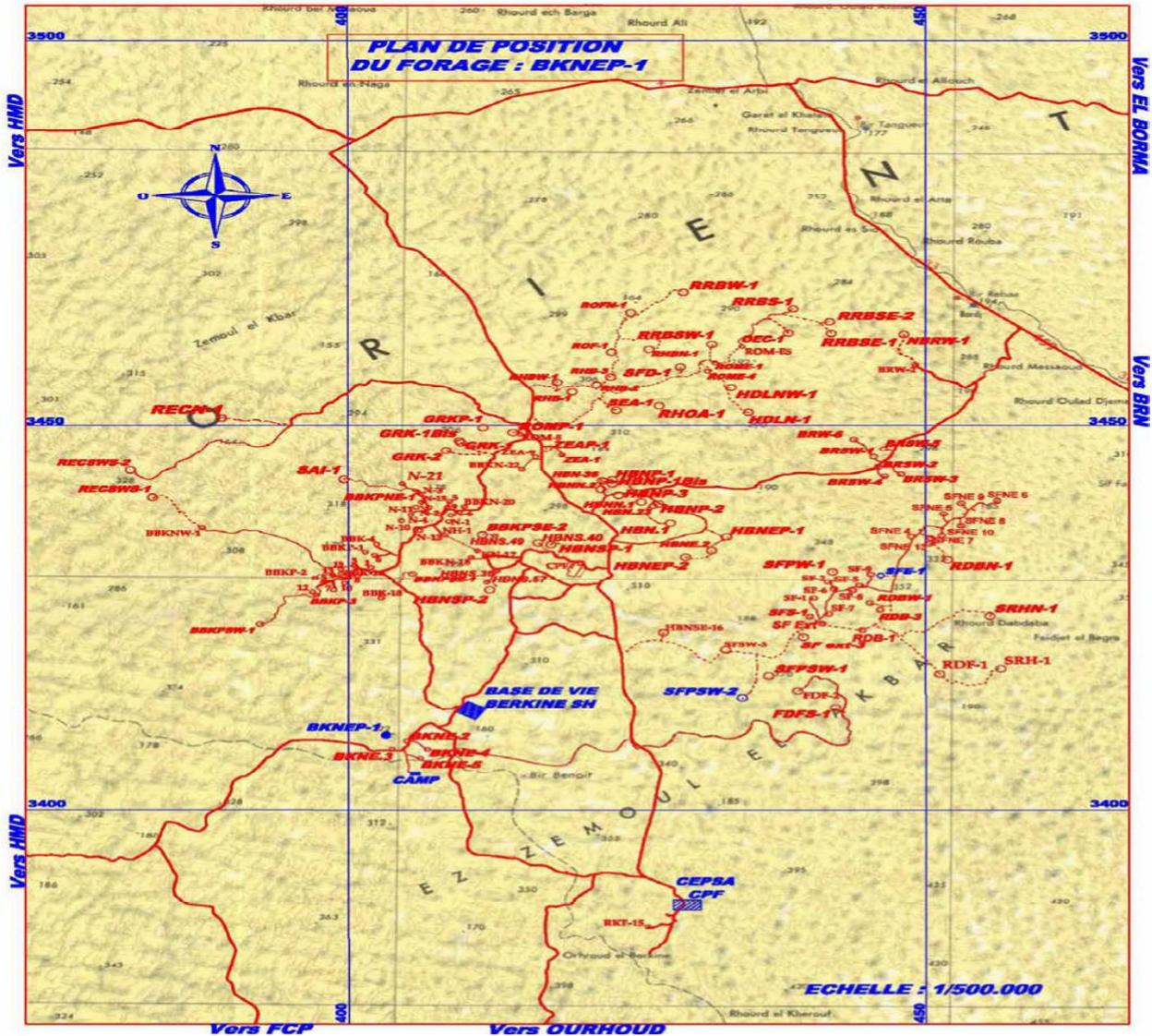


Figure.4 : Schéma synoptique et plan de position du puits BKNEP-1

2.4. Litho-stratigraphiques

La litho-stratigraphie du puits BKNEP-1, sera globalement similaire à celle reconnue dans la région d’Ourhoud. Les puits de référence BKNE-2, BBKS-2, et BBKPSW-1 ont été utilisés pour établir les prévisions litho-stratigraphiques du sondage BKNEP-1, pour toutes les formations. La description lithologique de haut en bas pour chaque formation avec les profondeurs et les épaisseurs estimées sont résumés ci-dessous :

Mio-Pliocène : Surface à 185m

Sable blanc à translucide, fin à moyen, parfois grossier et sub-arrondi. Niveaux de calcaire gris beige à blanchâtre argileux et gréseux avec des fines passées de dolomie grise, beige, blanche et microcristalline. Traces de grés blanc à gris blanc, moyen, sub-arrondi, silico-carbonaté et friable.

Mésozoïque**Sénonien Carbonaté : 185 - 315m**

Calcaire dolomitique gris-beige à blanc microcristallin dur parfois gris verdâtre argileux tendre avec passées de dolomies gris-beige à beige microcristalline dure et fines passées d'argile brun rouge et gris-verdâtre tendre silteuse carbonate.

Sénonien Anhydritique : 315 - 650m

Anhydrite massive blanche à translucide avec passées de calcaire blanc dolomitique blanc beige à grisâtre cristallin dur, parfois gris clair argileux tendre et présence de dolomie gris beige cristalline dure et d'argile grise à gris verdâtre parfois brun rouge gris verdâtre tendre à indurée carbonatée et anhydritique.

Sénonien Salifère : 650 - 835m

Sel massif blanc à translucide avec fines passées d'argile grise à gris verdâtre tendre salifère et de dolomie gris-clair à gris-beige argileuse et fines passées d'anhydrite blanche à translucide pulvérulente.

Turonien : 835 - 885m

Alternance de calcaire gris-brun à blanc, microcristallin, dur, localement gris brun, argileux, tendre avec passées d'argile grise, tendre, carbonatée, passant par endroits à des marnes.

Cénomaniens : 885 - 1060m

Argile versicolore à prédominance brun-rouge, gris-verdâtre carbonatée avec passées de calcaire gris clair à blanc argileux parfois dolomitique tendre et fines passées d'anhydrite blanche massive et un niveau de sel massif blanc à translucide vers la base.

Albien : 1060 - 1300m

Grès gris clair à beige et brun-rouge fin à moyen rarement grossier sub-arrondi à anguleux avec passées d'argile brun rouge à rouge brique rarement gris verdâtre silto-sableuse parfois carbonatée tendre. Présence de lignite.

Aptien : 1300 - 1325m

Dolomie blanche, beige microcristalline dure et gris beige argileuse tendre. Présence de calcaire gris-clair à blanc argileux parfois crayeux. Traces d'argile grise à verdâtre tendre carbonatée.

Barrémien : 1325 -1700m

Grès gris-clair à beige et brun-rouge fin à moyen parfois grossier sub-arrondi à sub-anguleux avec intercalations d'argile brun rouge à rouge brique rarement gris-verdâtre tendre silto-sableuse, parfois carbonatée. Présence de dolomie beige microcristalline dure. Traces de lignite.

Néocomien : 1700 -1980 m

Argile versicolore à prédominance brun-rouge et gris-verdâtre tendre à indurée silto-sableuse, parfois carbonatée avec passées à intercalations de grès gris-clair à beige et brun rouge fin à moyen rarement grossier sub-arrondi à sub-anguleux. Traces de dolomie beige et gris blanc argileuse tendre.

Malm : 1980 - 2205m

Argile bariolée brun rouge et gris verdâtre tendre à indurée silto-sableuse, parfois carbonatée avec fines passées de grès gris clair à beige et brun rouge fin à moyen, argilo-siliceux friable et de calcaire gris-clair, gris argileux tendre et de dolomie grise à gris-beige argileuse et d'anhydrite blanche à translucide.

Dogger Argileux : 2205 - 2360m

Argile brun-rouge et brune, rarement gris-vert tendre à indurée silteuse légèrement carbonatée, avec passées de grès gris clair fin de silico-argileux friable et de calcaire dolomitique gris à gris beige argileux dur.

Dogger Lagunaire : 2360 - 2455m

Argile grise à grise verdâtre et brun-rouge tendre à indurée légèrement carbonatée avec passées d'anhydrite blanche à translucide massive et de calcaire dolomitique gris beige microcristallin dur.

Lias Anhydritique : 2455- 2690m

Anhydrite massive blanche translucide avec passées de sel massif blanc à translucide et fines passées d'argile grise à gris clair tendre à indurée parfois pâteuse salifère, Présence de dolomie beige microcristalline dure.

Lias Salifère : 2690 -2750m

Il s'agit d'un sel massif blanc, translucide, parfois rosâtre avec de nombreuses fines passées d'argile grise à gris clair tendre à indurée.

Horizon B : 2750 -2770m

Calcaire dolomitique gris à gris-clair microcristallin dur parfois gris sombre tendre argileux avec présence d'argile fortement carbonatée et d'anhydrite blanche pulvérulente.

Lias S1 +S2 : 2770 - 3020m

Sel massif, blanc translucide avec intercalation d'anhydrite blanche à translucide massive, et d'argile grise à gris verdâtre tendre à indurée salifère.

Lias S3 : 3020 -3160m

Sel massif blanc translucide avec fines passées d'argile grise à gris verdâtre tendre à indurée salifère.

Lias Argilo-Salifère : 3160- 3175m

Il est formé d'argile grise à brun rouge tendre à indurée avec passées de sel massif blanc à translucide et présence d'anhydrite blanche pulvérulente.

Trias S4 : 3175 - 3190m

Sel massif blanc translucide avec fines passées d'argile grise à gris verdâtre et brun rougetendre à indurée salifère.

Trias argilo-salifère : 3190 -3240m

Alternance de grès gris-blanc, moyen à grossier, siliceux et d'argile brun-rouge à gris-vert, indurée, silteuse avec présence locale d'anhydrite blanche en inclusions.

Trias Carbonaté : 3240 -3300m

Argile brun rouge, grise à gris-vert et brune, tendre à indurée, silteuse à très silteuse, dolomitique passant par endroit à des siltstones avec passées de calcaire dolomitique gris blanc et gris beige microcristallin, dur.

TAGI: 3300 -3335 m

Grès gris vert blanc, gris verdâtre et brun rouge fin localement moyen sub-arrondi à sub-anguleux argileux à argilo – siliceux friable à moyennement consolidé avec intercalation d'argiles brun rouge parfois grises à gris- verdâtre tendre à indurée, silteuse.

Paléozoïque**➤ Dévonien Supérieur****Strunien F2 : 3335 - 3400m**

Argile gris noir, finement silteuse et micacée, avec Passées de grés claire à gris vert clair, beige parfois tendre, très fin à fin localement quartzitiques .Présence de glauconie et de la pyrite.

Famennien : 3400-3705m

Argile gris noir, finement silteuse et micacée, feuilletée et indurée. Passées de grés claire gris vert clair, gris vert clair, beige parfois tendre, très fin à fin localement quartzitiques et argileux. Présence de dolomie gris clair à beige et de calcaire blanchâtre, présence de pyrite et de fossiles.

Frasnien : 3705 - 3955m

Argile noire ou brune foncée feuilletée à aspect schisteux, très riche en matière organiques, et microfossiles ainsi que des débris de brachiopodes. Présence de très fines passées d'intercalations de calcaire argileux et gréseux blanc et gris clair pyriteux et passées silto-gréseuses vert clair.

➤ Dévonien moyen**Eifélien-Givétien 3955 - 4095m**

Argile grise à gris foncée, indurée, silteuse, localement carbonatée avec présence de dolomie calcaire gris blanc.

Emsien : 4095 - 4120m

Grès blanc à gris blanc, fin à très fin, argileux à moyennement consolidé et gris à gris foncé vers la base prédominance d'argile grise à gris foncé, indurée, silteuse avec passées de grés gris à gris foncé, très fin, argileux, friable à moyennement consolidé.

Siegénien : 4120 - 4365m

Il englobe plusieurs niveaux réservoirs (Niveaux 'C' 'D', 'E', 'F', 'G') qui constituent des objectifs primaires d'exploration dans le périmètre Zemoul El Kbar. Il est composé d'alternance de grès quartzitique, gris clair, beige, fins à moyens parfois grossier, sub-arrondi, à faible ciment et d'argiles grises, parfois grises verdâtres, silteuses et indurées.

Gédinnien (Tadrart) : 4365 - 4665m

Grès brun rouge, gris brun et gris verdâtre parfois blanc fin à moyen localement grossier sub-anguleux à sub-arrondi, argileux à argilo-siliceux friable à moyennement consolidé avec intercalations d'argile grise foncée à noire tendre à indurée, silteuse légèrement feuilletée.

Silurien Argilo-gréseux :4665 - 5410m

Complexe Argilo-gréseux avec des argiles grises à gris foncé parfois grises verdâtres, silteuses et des grès blanc quartzeux fins à très fins parfois compacts et quelques intercalations de siltstones.

- Unité B : 4665 - 5075 m

Argile noire foncé, fortement silteuse à sableuse, micacée, légèrement feuilletée, avec des intercalations de blanc de grés fin à moyen, localement grossier, siliceux à silico-quartzitique, micacé bien consolidé, dur à très dur.

- Unité A : 5075 - 5265m

Grés blanc à beige, fin à très fin, passant à des siltstones, silico-quartzitique, dur localement silico-argileux, avec passée d'argile grise foncée à brune rouge, pyriteuse indurée.

- Unité M : 5265 - 5410m

Présente au sommet un intervalle gréseux (~20m) fin à moyen silico-argileux friable. Argile grise, localement silteuse, indurée, avec fines passées de Grés, gris à gris blanc, beige à jaunâtre, fin à très fin, silico-quartzitique.

- Silurien Argileux : 5140 - 5450m

Argile grise à gris clair, devenant parfois brun foncée, silteuse, avec fines passées de siltstone.

2.5. La lithologie du puits

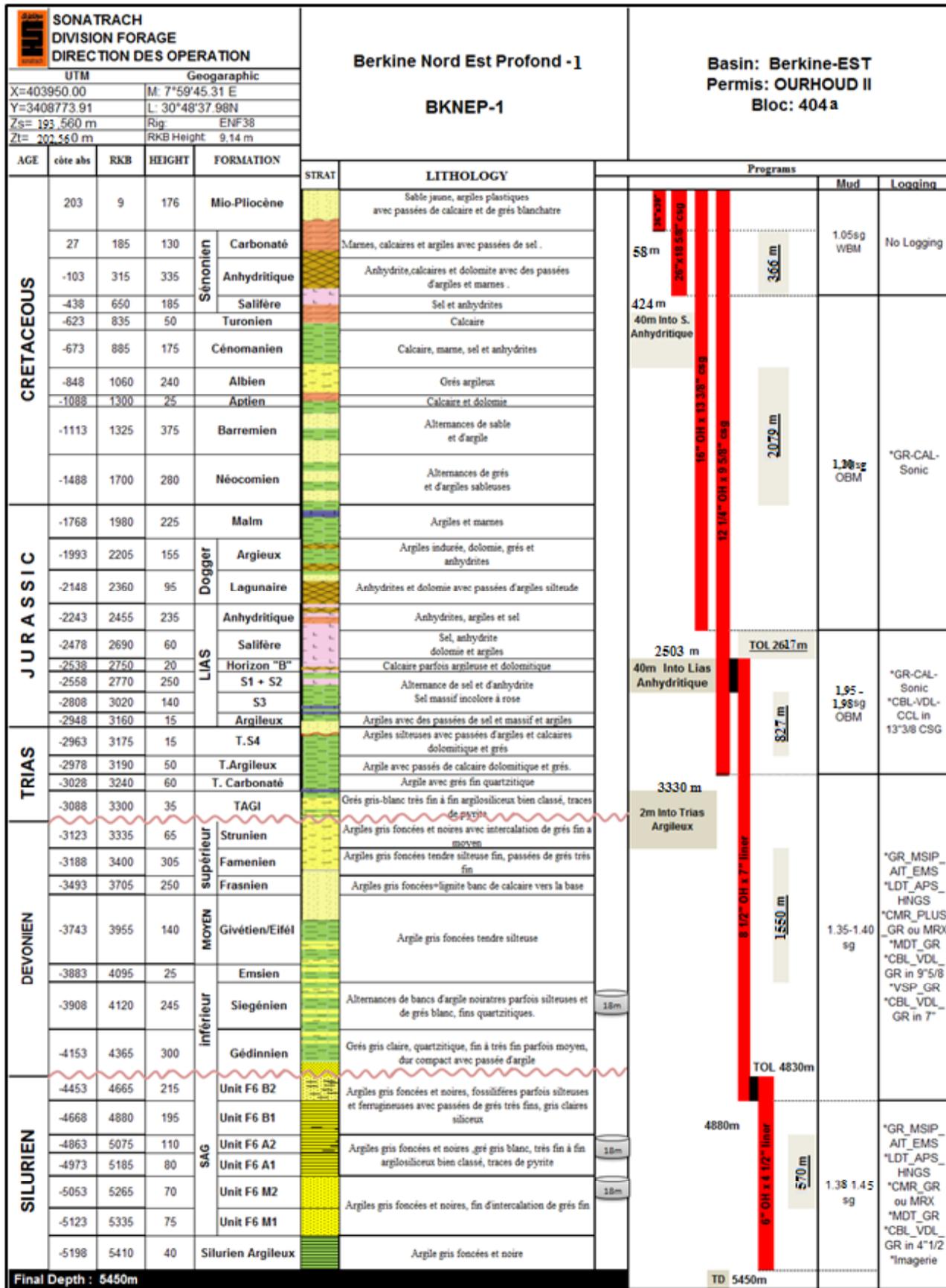


Figure.5 : Coupe lithologique du puits BBKNEP-1

2.6. Roches mères, piégeage et migration

Les argiles radioactives à graptolites du Silurien argileux et les argiles radioactives du Frasnien constituent les principales roches mères génératrices d'huile légère (39- 49°API) de gaz et de condensat dans le bassin de Berkine. Les modélisations géochimiques montrent que la roche mère silurienne a atteint la fenêtre à huile à la fin du Paléozoïque et la fenêtre à gaz à partir du Crétacé inférieur. Elle est actuellement en phase à gaz sec dans la majeure partie du bassin. Quant à la roche mère frasnienne, très affectée par l'érosion hercynienne, elle a atteint la fenêtre à huile au Crétacé supérieur et demeure en phase à huile dans la majeure partie du bassin, à l'exception du dépôt-centre paléozoïque (région de Timissit Ouest-Rhourde El Farés) où elle est en phase à gaz sec.

L'alimentation en gaz des réservoirs gréseux du Silurien se ferait directement depuis la roche mère silurienne sous-jacente ou par migration verticale le long des failles et/ou à travers les argiles silteuses du Silurien argilo-gréseux. La roche mère frasnienne a généré environ 29mg HC/g de roche et a expulsé environ 21mg HC/g de roche. Les hydrocarbures ainsi générés peuvent migrer vers les réservoirs dévoniens et ceux du Trias, à travers les failles, ou le long des bancs gréseux du TAGI servant de drains et/ou suivant la surface d'érosion hercynienne.

2.7. Roches couvertures

Les argiles et évaporites du Trias représentent une couverture efficace pour les réservoirs du TAGI. Les argiles du Siégénien forment une couverture pour les niveaux gréseux du Siégénien F6 et Tadrart.

Les argiles intermédiaires du Silurien–F6 constituent des couvertures efficaces à l'échelle régionale pour les niveaux gréseux de cette formation. Les niveaux réservoirs présentent des épaisseurs de 10 à 20m et les niveaux argileux qui jouent le rôle de couverture sont de l'ordre de 50 à 100m d'épaisseur.

3. Programme de forage

3.1. Harmonisation des diamètres

Phase	1	2	3	4	5	6
Diamètre du trou (in)	36	26	16	12 ^{1/4}	8 ^{1/2}	6
Diamètre du tubage (in)	30	18 ^{1/2}	13 ^{3/8}	9 ^{5/8}	7	4 ^{1/2}

Tableau 2 : Harmonisation des diamètres

3.2. Programme des outils pour le puits BKNEP-1

Bit size	36 "	26"	16"	12 ^{1/4}	8 ^{1/2}	6"
Distance forée (m)	0 à 59 (59m)	59 à 425 (366m)	425 à 2505 (2080m)	2505 à 3331 (826m)	3331 à 4881 (1550m)	4881 à 5451 (570m)
Type	L3A	SB115C	TFF913S	SP619A	MM84,FX84I	MM94
NS	1032206	PZ5351	A209020	7993D14	12703665 12319389	12709477
Nozzles	/	3*18,1*16	9*12	3*20,6*15	4x16 8x12	3*13 3*15
TFA (in ²)	3,142	0,942	0,994	1,955	0,785 0,883	0,389 0,517
WOB (tonnes)	0,5 à 04	0,3 à 28	2-29	2-21 7-18	1-17 3-18	1-6
RPM (tr/min)	40 à 70	40 à 100	70-200	70-170 130-165	55-150 50-110	50-60
Débit (lpm)	500 à 1300	1800 à 3115	2300-3100	2300-2650 2450-2550	1775-1875 1750-1850	850-900

Tableau 3 : Programme des outils

3.3. Programme de boue

Phase	36 "	26"	16"	12 ^{1/4}	8 ^{1/2}	6"
Type de boue	Bentonite	Bentonite	OBM	OBM	OBM	OBM
Densité de boue (sg)	1,05	1.06	1.20	1.95-1.98	1.35-1.40	1.38-1.45
Viscosité march (cp)	82	60-80	45-55	45-55	40-50	45
Viscosité plastique (cp)	10	10-11	13-15	35-37	15-17	17-23
Yield point (lb/100ft)	47	38-47	19-20	12	12-18	11-15
HTHP FL 200 °F/500 psi (cm ³)	-	-	7-8	9-10	4-6	4
Rapport huile/eau	96	96-97	70/30 - 81/19	90/10	90/10 – 92/8	95/5
PH	10-12	10-12	-	-	-	-

Tableau 4 : Programme de boue

Chapitre III :

**Généralité
sur la boue
de forage**

1. Introduction

Un fluide de forage doit être basé sur les capacités du fluide pour réaliser les fonctions essentielles et pour réduire au minimum des problèmes prévus du puits. La boue est un outil indispensable au forage, ses rôles sont multiples et son maniement délicat. au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit, la boue est un paramètre de forage, donc il est indispensable de leur apporter tous les soins nécessaires à leur fabrication, à leur contrôle et à leur entretien en cours d'utilisation car elle a un rôle primordial dans le puits de forage

2. Rôle du fluide de forage

Les boues de forage doivent avoir des propriétés leur permettant d'optimiser les fonctions suivantes [22] [23] :

2.1. Nettoyage du puits

La boue doit débarrasser le puits des particules de formation forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « cuttings » ou « déblais ».

2.2. Maintien des déblais en suspension

Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

2.3. Sédimentation des déblais fins en surface

Alors que la boue doit permettre le maintien en suspension des déblais dans le puits durant les arrêts de circulation, ce même fluide doit laisser sédimenter les déblais fins en surface, afin de les éliminer. Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles. En effet dans le cas de maintien en suspension dans le sondage, c'est à tous les déblais (quelque soit leur granulométrie) est particulièrement aux particules les plus grosses, ceci dans une section réduite, que nous nous intéressant

En surface le problème est différent car c'est une boue débarrassé des déblais éliminé sur les toiles des vibrateurs, le fluides ne conserve donc en suspension que les particules les plus fines et les plus dance qui dans un circuit favorisant la décantation pourront sédimenter tout au moins partiellement.

2.4. Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde

Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique. La circulation de la boue au droit de l'outil assure aussi son nettoyage ainsi que sa lubrification.

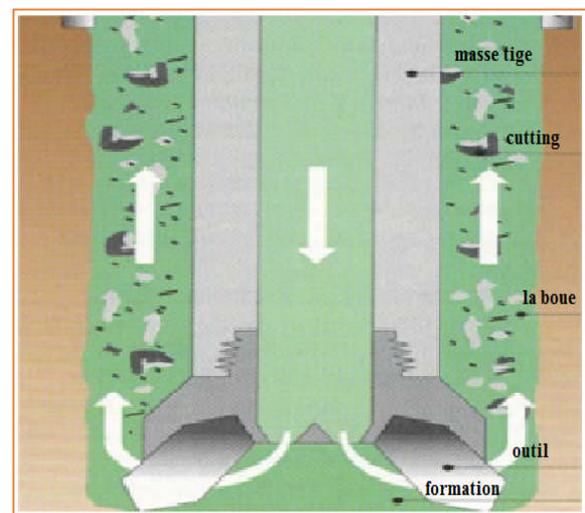


Figure.6 : Maintien des déblais et nettoyage du puits

Cette dernière est bien sur fonction de type de boue et de ses caractéristiques, une addition d'huile émulsionnée dans la phase aqueuse est souvent un élément favorable.

Des additif anti friction et des lubrifiants extrême pression en été mis au point, additionné a la boue , ils permettent de réduire considérablement les coefficient de frottement prolongeant ainsi la vie des outils de train de sonde, de plus le dépôt d'un cake sur les parois de puits diminue les frottement de la garniture de forage en rotation et en mouvement .

2.5. Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits

La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles, que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de l'outil.

Le cavage est causé par des éboulements, par la dissolution du sel, par la dispersion des argiles, par une érosion due à la circulation de la boue au droit des formations fragiles, etc.

Les resserrements ont souvent pour cause une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue qui ne peut équilibrer la pression des roches, et des fois ils sont dus à des formations gonflantes.

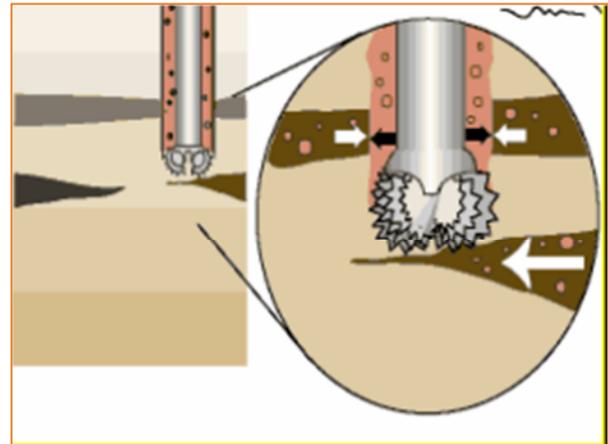


Figure.7 : Cavage et resserrement des parois du puits

2.6. Dépôt d'un cake imperméable

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage, ce film est appelé cake.

Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

2.7. Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile

Afin d'éviter le débit dans le puits des fluides contenus dans les réservoirs rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de gisement.

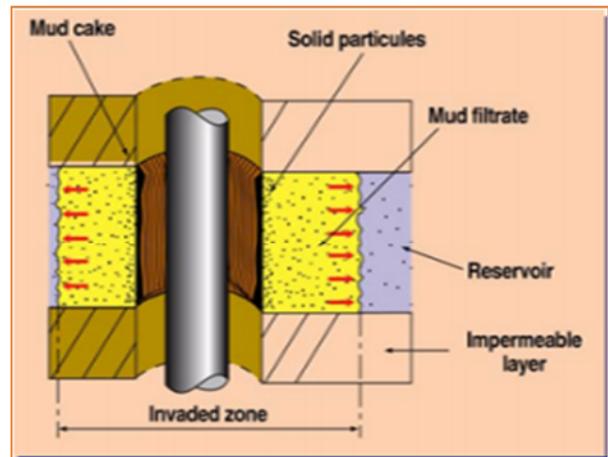


Figure.8 : Formation du cake imperméable

La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximum et minimum pour éviter la fracturation et les venus respectivement.

2.8. Augmentation de la vitesse d'avancement

Au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide, le choix du type et les caractéristiques de la boue conditionnent les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre, en un mot, les performances du forage.

Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorable à la pénétration des outils.

2.9. Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.)

Dans le cas du turboforage la boue entraîne la turbine en rotation. Cette fonction, l'amenant à passer à travers une série d'évents et à mettre en mouvement des aubages, implique certaines caractéristiques et rend impossible ou très délicat l'utilisation de certains produits (colmatant).

2.10. Diminution du poids apparent du matériel de sondage

Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence qu'une fonction, la présence d'un fluide d'une certaine densité dans le puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garniture de forage et tubages, ceci permet de réduire la puissance exigée au levage.

2.11. Apport de renseignements sur le sondage

La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et fluides rencontrés. Ces renseignements sont obtenus :

- Par les déblais remontés avec la circulation du fluide,
- L'évolution des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la boue,
- La détection de gaz ou autres fluides mélangés à la boue.

2.12. Contamination des formations productrices

La présence d'un fluide au droit de formations poreuses et perméables peut exercer une pression hydrostatique supérieure à la pression de gisement. Cela peut nuire à la future mise en production de cette zone.

2.13. Corrosion et usure du matériel

Le fluide peut accélérer l'usure du matériel de sondage, par une action mécanique, si elle contient des matériaux abrasifs.

Elle peut aussi être corrosive par une action électrolytique (présence d'ions) due à un déséquilibre chimique.

2.14. Toxicité et sécurité

La boue de forage ne devra pas présenter de danger pour la santé du personnel. Elle ne devra pas non plus créer de risques d'incendie, tout particulièrement dans le cas d'utilisation de boues à base d'huile.

3. Type de boue

3.1. Boue à base d'eau

C'est une boue dont la phase continue est l'eau, on y trouve trois phases distinctes [18] [22] :

3.1.1. L'eau de fabrication :

Elle peut être une eau douce ou une eau contenant peu de sels de sodium, calcium, magnésium, ou encore une eau de gâchage dessalée. Sa dureté dépend des deux derniers éléments. La dureté de l'eau diminue sa rentabilité.

Pour faire face à ce problème, des quantités de soude caustique ou de carbonates de soude sont ajoutées afin d'adoucir cette eau. L'eau de fabrication peut être plus ou moins salée de 7 à 35g/l. Elle peut être également salée saturée 358g/l de NaCl et avoir une densité voisine de 1.20.

On peut y ajouter de l'huile et former une émulsion du type huile dans l'eau. La phase aqueuse peut contenir aussi des produits chimiques ajoutés pour traiter la boue.

3.1.2. Les argiles :

Dans ce type de boue, les argiles sont utilisées pour augmenter la viscosité et réduire le filtrat. Les argiles les plus couramment utilisés sont du type Montmorillonite (de Montmorillon de Vienne) et sont connus sous le nom « **bentonites** ».

L'argile peut provenir de la formation le long du forage et faire augmenter dangereusement la viscosité de la boue. Ceci peut être contourné par l'addition de produits fluidifiants et inhibiteurs de gonflement, ajout d'eau, centrifugation, etc....

3.1.3. Les solides inertes :

Ils n'agissent que par effet de masse. On peut citer le sulfate de baryum $BaSO_4$ (ou **barytine**) connu sous le nom « **baryte** », employé pour augmenter la densité.

3.2. Les boues à base d'huile

Une boue à huile est une fluide dont la phase continue est de l'huile on distingue deux catégories :

3.2.1. Les boues à l'huile

Constituées d'une phase continue huile et d'une phase dispersé aqueuse pouvant contenir 5 à 15 % d'eau en maximum.

Caractéristiques :

- La boue à l'huile cause le minimum de dommage aux formations productrices.
- Elle possède les caractéristiques nécessaires à de bonnes conditions de forage.
- Faible filtration d'huile.

Domaine d'utilisation :

- Forage et carottage de réservoirs.
- Reprise et entretien de puits producteurs.
- Forage de zones difficiles en présence d'un fluide à base d'eau (argiles gonflantes, problème de coincement, etc.).

Composition courante :

- Huile de base : 95 à 98 % du volume. On utilise de l'huile diesel à de l'huile
- Eau : 2 à 5 %, permet d'adapter les caractéristiques générales de la boue à l'huile. Elle est émulsionnée.
- Agents plastifiants : pour contrôler la filtration et la viscosité, on ajoute des produits tels que : asphalte soufflé, argile organophile, noir de fumée, etc.
- Agents émulsionnants et stabilisants.
- Agents fluidifiants.

- Alourdissant : CaCO₃, BaSO₄, galène.
- Agents de neutralisation de l'eau.

Avantage :

Les avantages de ce type de boues sont :

- Contrôle aisé des caractéristiques en l'absence de venues d'eau ou de brut.
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO₄, ciment, argile).
- Excellentes caractéristiques de filtration statique en température et pression, cake très mince.
- Forage à densité proche de 1.
- 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.
- Suppression du collage par pression différentielle.
- Meilleure récupération en carottage.
- Carottes sur lesquelles il est possible de mieux approcher la valeur de la teneur et la nature de l'eau interstitielle.
- Augmentation, par rapport au forage en boue à l'eau, de la productivité.
- Moindres dommages à la formation.

Inconvénients :

- Sensibilité à l'eau et à certains bruts.
- Risqué de sédimentation des alourdissements.
- Manipulation salissante.
- Risque d'incendie.
- Détérioration des caoutchoucs non spécifiques aux hydrocarbures.
- Difficultés pour déceler la présence d'huile 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.

3.2.2. Les boues inverses

Ce sont des fluides de forage ou de complétion, constitués d'une phase continue huile et d'une phase aqueuse dispersée d'au moins 50% de volume.

Caractéristiques :

Ce sont les mêmes que celles des boues à base d'huile mais permettent de pallier à certains inconvénients :

- sensibilité à l'eau,
- contrôle de la rhéologie plus aisé,
- risque d'incendie,
- prix de revient au m³ élevé.

Domaine d'utilisation :

- Grande épaisseur de sel ou anhydrite.
- Problème de forage haut température.
- Problème de déviation.

- Forage à faible température atmosphérique.

Avantage :

Les mêmes que la boue à base d'huile mais :

- Les risques d'incendie sont moindres.
- Le prix de revient est moins élevé.
- Le traitement de surface est plus facile.

Inconvénients :

Les principaux inconvénients des boues à émulsion inverse sont :

- contrainte environnementale : récupération des déblais pour les débarrasser des huiles résiduelles,
- logistique lourde,
- manipulation salissante mais nettoyage plus facile qu'avec une boue à l'huile,
- détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures,
- difficultés pour déceler la présence d'huile de formation dans les déblais :
- prix de revient au m³ plus élevé que les boues à l'eau rendant souhaitable une récupération de la boue de puits à puits.
- coût éventuel du traitement des déblais.

4. Forage à l'air, à la mousse, aux boues aérées

4.1. Forage à l'air

C'est de l'air comprimé qui, injecté à la place de la boue de forage, assure toutes les fonctions nécessaires au forage avec les différences essentielles suivantes :

- Vitesse de remontée de 900 m/min.
- Très faible pression hydrostatique sur le fond.
- Vitesse d'avancement très importante car la pression est négative sur le front de taille.
- Pas d'envahissement des formations traversées.
- Nécessité d'un obturateur rotatif (diverter) en tête du puits.
- Mais impossibilité de forer à l'air, s'il y a des venues d'eau.

4.2. Forage à la mousse

On essaye de conserver les avantages du forage à l'air et de s'affranchir de la présence d'eau en injectant de la mousse résultant du mélange air + eau + agent moussant.

Avantage :

- Débit d'injection d'air 10 fois moindre qu'à l'air (capacité de nettoyer le puits beaucoup plus importante avec la mousse qu'avec l'air).
- Mousse stable vis-à-vis des faibles venues d'eau.

Inconvénients :

Mousse stable donc pratiquement impossible de la traiter en surface en continue, les applications ont été réservées aux zones désertiques.

4.3. Boue à base d'eau aérée

Permet de conserver en partie les avantages sur la vitesse d'avancement et la plus faible usure des outils, tout en ayant la possibilité de contrôler des venues faibles dans le puits.

5. Caractéristiques de la boue de forage

5.1. Caractéristiques physique

5.1.1. La densité

La densité est le rapport de la masse volumique d'un corps à la masse volumique d'un autre corps de référence dans les conditions qui doivent être spécifiés pour les deux corps (l'eau à 4°C pour les liquides et les solides et l'air pour les gaz). elle s'exprime par un nombre sans dimension [18].



Figure.9 : Densimètre

La masse volumique est le rapport du poids d'un corps à son volume dans des conditions définies de pression et température. Elle s'exprime en N/m^3 ou plus pratiquement en kg/l .

La densité se mesure avec le densimètre dont le principe est équivalent à la balance à curseur.

Cette caractéristique est très importante et doit être contrôlée régulièrement car la densité doit être telle que la pression hydrostatique au fond ($P_h = 9,81Zd$ en kPa, Z en m, d densité) soit suffisante pour contrôler les fluides de formation et ne doit pas être trop importante vis-à-vis de la résistance des terrains forés. Il existe également des appareils de mesure en continu de la densité placés sur le refoulement des pompes de forage dont le principe est fondé sur la mesure de l'atténuation par la boue utilisée du rayonnement d'une source radioactive.

5.1.2. Concentration en sable

On appelle sable les particules qui ne passent pas sur un tamis de **200 mesh** (particules de diamètre supérieur à **74 μm**), les particules de diamètre inférieur à **74 μm** sont appelées silt [18].

La présence de sable dans une boue à un effet abrasif sur toutes les pièces en mouvement et en particulier sur les chemises et pistons des pompes ainsi que sur les outils. De plus, à concentration élevée le sable augmente la densité de boue et peut sédimenter dans le trou pendant les arrêts de circulation risquant d'occasionner des coincements. Il est recommandé de maintenir la teneur en sable à moins de 1% en volume dans la boue par dessablage du fluide dans des cyclones appropriés et par sédimentation dans les bacs de décantation. On mesure la concentration en sable par un élutriomètre.

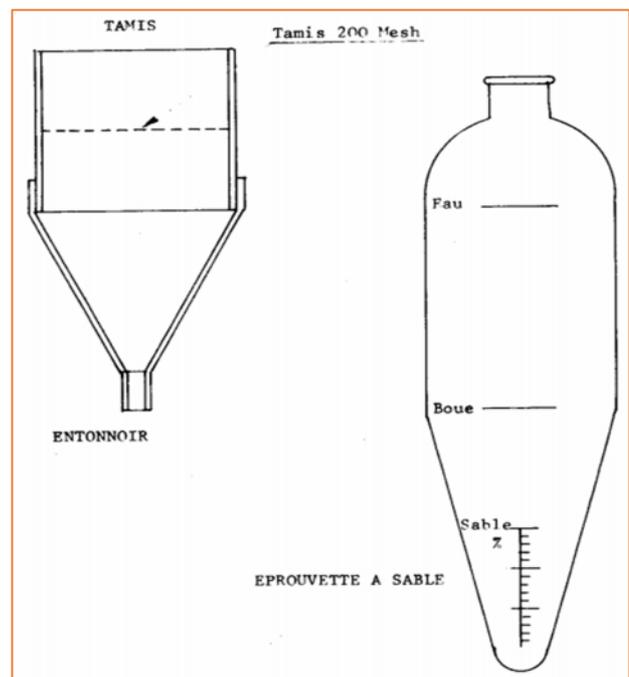


Figure.10 : Electromètre

5.1.2. Filtration

Le mécanisme de la filtration peut être schématisé de la manière suivante [18] :

D'une part une formation poreuse et perméable et d'autre part une suspension argileuse dans de l'eau qui sous l'effet d'une pression différentielle tendra à pénétrer dans la formation.

Si toutes les particules de la boue sont plus petites que les pores du milieu perméable, toute la suspension traversera le milieu perméable et se comportera comme un système monophasique.

Si une partie des particules est plus grosse que les pores du milieu perméable, elle sera retenue tandis que le liquide et les particules les plus fines pénétreront dans la formation.

Si toutes les particules sont plus grosses que les pores de milieu perméable, seul le liquide ou filtrat pénètre dans la formation. Ce cas diffère peu de précédent car seul la perméabilité du cake qui intervient dans la valeur de filtration et non pas celle de la formation.

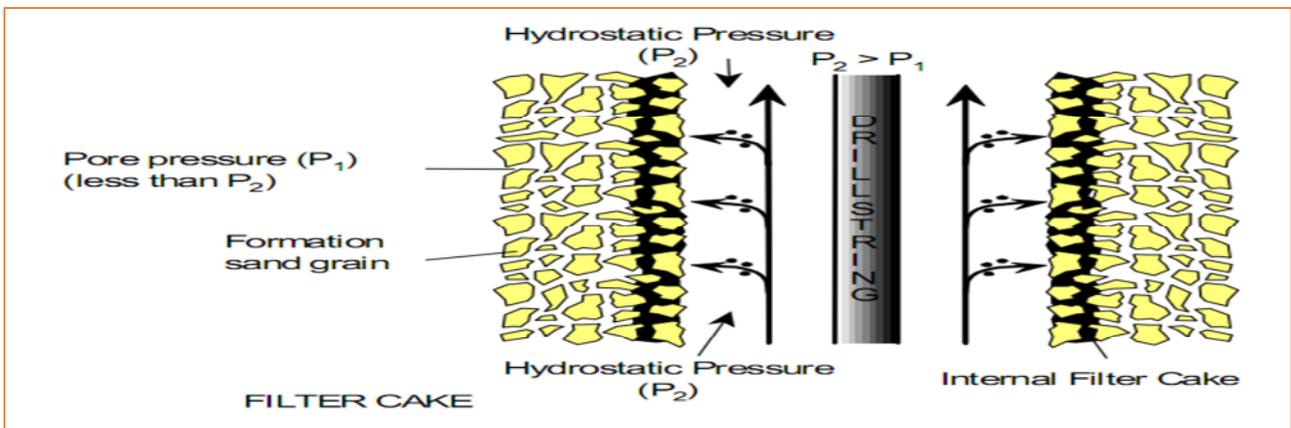


Figure.11 : Filtration de la partie liquide de la boue dans la formation

Cependant un épais cake est l'origine de certains problèmes tels que la réduction de diamètre en particulier, un excès de torque, une traction importante lors de manœuvre, aussi qu'un pistonnage important vers le haut et vers le bas. Il est à signaler que les coincements de la garniture par pression différentielle (nécessitant par fois un fishing job jugé coûteux) sont dans leurs origines le résultat de processus de filtration. Dans le forage pétrolier on connaît deux types de filtration :

- **Filtration en statique :**

Il prend place lorsque le fluide est en statique, dans ce cas-là le cake s'épaissit continuellement.

- **Filtration en dynamique :**

Lorsque le fluide est en circulation l'épaississement de cake est limité par l'action érosive de la boue en mouvement. La vitesse de filtration en dynamique est donc plus uniforme qu'en statique, cela signifie que l'invasion en conditions dynamiques sera plus importante.

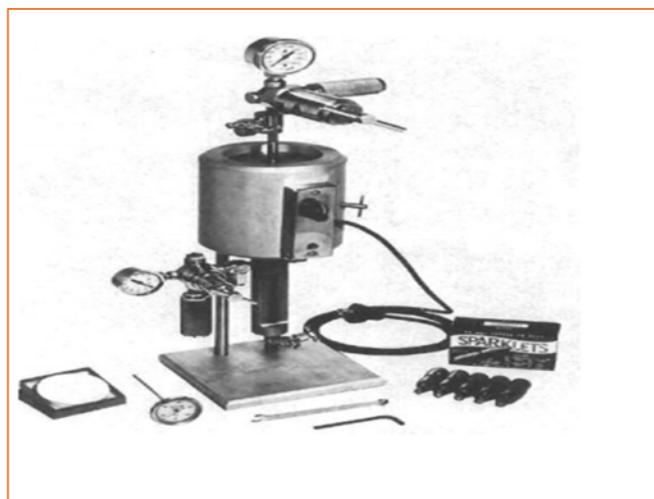


Figure.12 : Filtre-presse HP/HT

Les propriétés de filtration souvent évaluées par le filtre-presse et qui ne donne qu'un aperçu sur le phénomène, vu le point préalablement cité, les résultats de test restent toujours relatifs même avec l'invention des filtres-presses HP/HT.

5.2. Caractéristiques rhéologiques

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des matériaux (cas des solides) ou leurs écoulements (cas des liquides) sous l'effet d'une contrainte.

5.2.1. Termes rhéologiques

-Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) shear rate

C'est le rapport entre la différence de vitesse et la distance de deux lames voisines [20].

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dr} \tag{eq. III. 1}$$

dV : Différence de vitesse entre deux lames voisines [m/s].

dr : La distance entre les deux lames [m].

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement [s^{-1}].

-Tension de cisaillement (τ) shear stress

Lors de l'écoulement d'un fluide, les forces existantes s'opposent au déplacement. Ces forces connues sous le terme tension de cisaillement sont d'origine frictionnelle apparaissant lors de glissement des lames fluides les uns sur les autres. La tension de cisaillement est donc défini comme étant la force (df) par unité de surface de la lame (ds), qui provoque le cisaillement [20] :

$$\tau = \frac{df}{ds} \tag{eq. III. 2}$$

τ : s'exprime souvent en lb/100ft²

-Nombre de Reynolds

Le passage d'un régime à un autre est une fonction des caractéristiques du fluide et du débit, et pour déterminer le régime d'écoulement, On calcule un nombre numérique et sans dimensions appelé le nombre de Reynolds (Re) ; ce qui indique si le fluide est dans l'écoulement laminaire ou turbulent, sa formule générale est [20] :

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \tag{eq. III. 3}$$

Avec :

V : vitesse de déplacement [m/s].

D : diamètre [m].

ρ : masse volumique [Kg/m^3].

μ : viscosité dynamique [Pa.s].

-Viscosité (cP ou Pa.s)

Elle est définie comme le rapport d'effort de cisaillement à taux de cisaillement correspondant elle décrit la résistance à l'écoulement des substances. Dans le domaine pétrolier ce terme est utilisé pour définir la viscosité des fluides de forage ainsi que leurs propriétés rhéologiques. Quatre types sont [18] [20] :

Viscosité Marsh

La viscosité Marsh est utilisée comme indication relative au changement d'un fluide de forage, elle ne peut pas fournir des informations suffisantes pour déterminer les propriétés rhéologiques ou les caractéristiques de l'écoulement d'un fluide.

Elle est surtout utilisée pour évaluer rapidement les contaminations éventuelles qui pouvant modifier d'une manière importante les caractéristiques de fluide. Dans son principe elle mesure le temps d'écoulement d'un volume déterminé d'un liquide à travers un alésage calibré d'un entonnoir dit «viscosimètre Marsh ».



Figure.13 : Viscosimètre Marsh

Viscosimètre Fann

Le Fann est l'appareil qui permet de déterminer le rhéogramme d'un fluide de forage, c'est-à-dire sa loi d'écoulement représentée par la fonction [23] :

$$\tau = f(\dot{\gamma})$$

τ : Tension de cisaillement [lb/100ft²],

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement [s⁻¹].

Le principe du viscosimètre est très simple :

C'est un appareil à cylindres coaxiaux où l'échantillon de boue à mesurer remplit l'annulaire entre les deux cylindres.

Le cylindre extérieur (rotor) peut tourner aux vitesses : 3, 6, 100, 200,300, 600 tr/min.

Pour chaque vitesse on lit le couple transmis par le fluide sur le cylindre intérieur (stator). Ces six points de mesure permettent de tracer le rhéogramme.



Figure.14: Viscosimètre fann Model 35A 6 Speed V-G Meter

Viscosité effective

La viscosité d'un fluide non newtonien est en fonction de cisaillement, sa viscosité effective (μ_e) est la viscosité sous des conditions spécifiques incluant la vitesse de cisaillement, la pression et la température [18].

Viscosité apparente

La viscosité effective est parfois référée à la viscosité apparente (μ_{app}). La viscosité apparente est rapportée de part ou d'autre à la lecture de viscosimètre Fann (qui est un système à deux cylindre coaxiaux dont on met celui de l'extérieure en rotation à différentes vitesses ; celui de l'intérieur représente la référence de lecture car, il est relié à un cadran gradué ; par l'intermédiaire d'un système élastique), à la vitesse de rotation de 300 tr/min (L300) , ou la moitié de lecture à la vitesse 600 tr/min (L600), il est à noter que la détermination de la viscosité apparente s'effectue en appliquant la formule [18] [20] :

$$\mu_{app} = \frac{L600}{2} \quad \text{eq. III. 4}$$

μ_{app} : La viscosité apparente [cP]

L600 : Lecture Fann 600

Viscosité plastique (cP ou Pa.s)

Elle est la résistance d'une partie de boue à l'écoulement causé par frottement mécanique.

Généralement la viscosité plastique est liée à la taille, forme, et nombre des particules dans un fluide mobile [20].

$$\mu_p = L600 - L300 \quad \text{eq. III. 5}$$

L600 : Lecture Fann 600

L300 : Lecture Fann 300

La yield value (lb /100ft²)

C'est la résistance initiale à l'écoulement provoqué par les forces électrochimiques entre les particules. Cette force électrochimique est due aux charges sur la surface des particules dispersées dans la phase liquide [19] [20].

$$\tau_c = 2 * L300 - L600 \quad \text{eq. III. 6}$$

L600 : Lecture Fann 600

L300 : Lecture Fann 300

5.2.2. Régime d'écoulement

Le fluide de forage est sujet à une variété de modes d'écoulements pendant le processus de forage d'un puits, pour déterminé le régime d'écoulement on calcule le nombre de Reynolds [19] [20].

On distingue :

- Régime permanent

L'écoulement est parfaitement établi, Ceux-ci se classent en :

a) Régime laminaire (laminar flow)

Dans lequel chaque lame de fluide se déplace parallèlement l'une par rapport à l'autre dans la direction de l'écoulement avec une propre vitesse. **Re < 2100**

b) Régime turbulent (turbulent flow)

Caractérisé par la formation de petits tourbillons répartis dans toute la masse de liquide. $Re > 2100$

c) Ecoulement en bouchon (plug flow)

Où le fluide se déplace comme un bouchon le long de tube, la vitesse est uniforme sur tout le rayon.

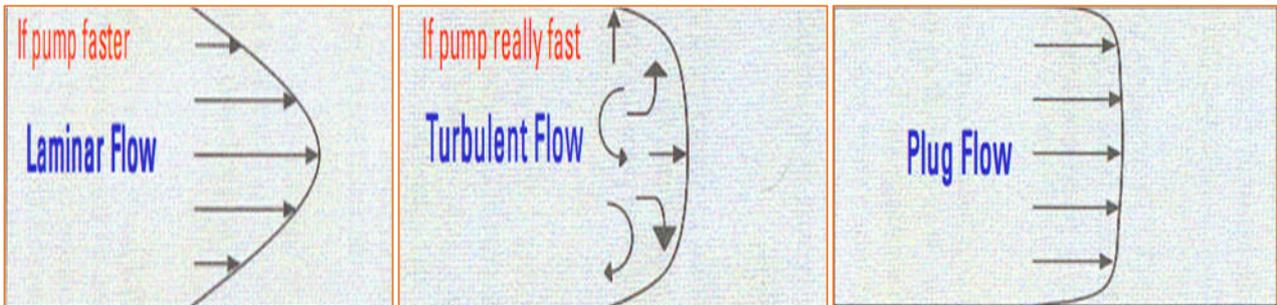


Figure.15 : Régimes d'écoulement

L'écoulement d'un fluide est caractérisé par la fonction entre une tension cisaillement et une vitesse de déformation.

5.2.3. Les modèles rhéologiques

Le modèle newtonien

La tension de cisaillement de ces fluides est directement proportionnelle au taux de cisaillement, si l'un double l'autre double également l'équation rhéologique est [20] [23] :

$$\tau = \mu * \dot{\gamma} \tag{eq. III. 7}$$

τ : tension de cisaillement [lb/100ft²].

μ : la viscosité de fluide [cp].

$\dot{\gamma}$: vitesse de déformation[s⁻¹].

Aux coordonnées cartésiennes la courbe $\tau = f(\dot{\gamma})$ est une droite passant par l'origine. Ce type de fluide est représenté par l'eau, le gasoil ...etc.

Les modèles non newtoniens

a)Le modèle de Bingham

Un fluide en plastique de Bingham est un fluide dans lequel l'écoulement se produit seulement après qu'un effort minimal, connu sous le nom yield value, soit appliqué. Après yield point a été excédé, l'effort de cisaillement est proportionnel au taux de cisaillement [20] [23].

$$\tau = \tau_c + \mu_p * \dot{\gamma} \tag{eq. III. 8}$$

τ_c : Contrainte seuil de cisaillement (yield value) [lb/100ft²].

μ_p : viscosité plastique [cp].

b) Le modèle en puissance (pseudo-plastique d’ostwald)

La tension de cisaillement n’est pas proportionnelle au taux de cisaillement, elle est proportionnelle à la puissance n^{ie}me de celui-ci, d’où l’appellation également utilisé de fluide en puissance l’équation d’écoulement est [20] :

$$\tau = k * \dot{\gamma}^n \quad \text{eq. III. 9}$$

n : indice de comportement rhéologique $n = \frac{\log \frac{\tau'}{\tau}}{\log \frac{\dot{\gamma}'}{\dot{\gamma}}}$ ou $n = 3.32 \log \frac{L600}{L300}$ eq. III. 10

K : indice de consistance en (dyne.s) $k = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n}$ ou $k = \frac{L300}{510^n}$ eq. III. 11

τ' : La lecture de tension de cisaillement au taux plus élevé de cisaillement [lb/100ft²].

τ : La lecture de tension de cisaillement au taux inférieur de cisaillement [lb/100ft²].

$\dot{\gamma}'$: Le taux plus élevé de cisaillement [tr/min].

$\dot{\gamma}$: Le taux inférieur de cisaillement [tr/min].

L600 et L300 sont des lectures de cadran de rhéomètre Fann [tr/mn].

Si :

n=1 le fluide est newtonien

n>1 le fluide est dilatant.

0<n<1 le fluide est pseudo plastique.

c) Modèle en puissance modifié (Hershel-Burkly)

Puisque la plupart des fluides de forage montrent un effort initial, le modèle de Herschel-Bulkly (loi en puissance modifié) décrit le comportement rhéologique des boues de forage plus exactement que tous les autres modèles. Ce modèle emploie l’équation suivante pour décrire le comportement d’un fluide [20] :

$$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n \quad \text{eq. III. 12}$$

Système rhéologique	Equation rhéologique	rhéogramme	Commentaire	
Fluide newtonien	$\tau = \mu \gamma$		μ viscosité apparent	
fluide non newtonien	Fluide binghamien	$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma$		τ_0 yield point μ_p viscosité plastique
	Fluide en puissance	$\tau = K\gamma^n$		K indice de consistance n indice rhéologique

Figure.16 : Modèles rhéologiques

5.2.4. Gel et thixotropie

C'est un phénomène de réversibilité et non instantané qui se traduit par l'aptitude d'un fluide plastique lissé au repos d'établir progressivement une structure le rendant plus rigide, cette structure

peut être détruite par agitation. Il est estimé par les mesures dépendant du temps de l'effort de cisaillement (l'évolution de gel) d'un fluide au repos [20].

Les forces de gel sont couramment mesurées après des intervalles de 10 secondes (Gel 0), 10 minutes (Gel 10) et 30 minutes, mais elles peuvent être mesurées toute durée désirée.

5.3. Caractéristiques électrochimiques

5.3.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

L'acidité relative ou l'alcalinité d'un liquide est conventionnellement symbolisée pH, elle est définie comme le négatif logarithmique décimal de la concentration des ions H+. Il est clair qu'il existe une inverse proportionnalité entre le pH et la concentration de l'ion d'hydrogène car une augmentation en concentration de dix unités rapporte une diminution en pH d'une seule unité. A un pH de sept (7), la concentration en ions d'hydrogène est égale à celle hydroxyde (OH -).

Dans un contexte pareil le liquide est dit neutre, c'est l'exemple de l'eau pure.

L'utilité de pH réside dans le contrôle d'efficacité de certaines boues, une boue benthonique à titre d'exemple doit avoir un pH de 8 à 9 ; une contamination avec du ciment augmente souvent le pH jusqu'à une valeur de 10 à 11, cela nécessite un traitement par acide pour rendre le milieu approprié. Autre raison, c'est pour la boue traitée à la chaux d'où le phénomène de corrosion persiste et nécessite souvent une dilution [21].

pH	[H ⁺]		[OH ⁻]	pOH
0	1	Acids	10 ⁻¹⁴	14
1	10 ⁻¹		10 ⁻¹³	13
2	10 ⁻²		10 ⁻¹²	12
3	10 ⁻³		10 ⁻¹¹	11
4	10 ⁻⁴		10 ⁻¹⁰	10
5	10 ⁻⁵		10 ⁻⁹	9
6	10 ⁻⁶		10 ⁻⁸	8
7	10 ⁻⁷	Neutral	10 ⁻⁷	7
8	10 ⁻⁸		10 ⁻⁶	6
9	10 ⁻⁹		10 ⁻⁵	5
10	10 ⁻¹⁰		10 ⁻⁴	4
11	10 ⁻¹¹		10 ⁻³	3
12	10 ⁻¹²		10 ⁻²	2
13	10 ⁻¹³		10 ⁻¹	1
14	10 ⁻¹⁴	Bases	1	0

"Echelle de pH"

Figure.17 : Echelle de PH

La mesure de pH est habituellement effectuée, soit par un papier pH suivant un changement de couleur par suite d'immersion en se référant au couleur standard. Par contre si la solution est hautement saline ou trop coloré (tannin, lignite). La méthode chlorométrique devienne insatisfaisante, en passant obligatoirement à la méthode électro-métrique on utilise un pH mètre à électrode composite (si la concentration en Na+ est très élevée, une électrode spéciale sera nécessaire)



Figure.18 : PH mètre



Figure.19 : Papier PH

5.3.2. Alcalinité

L'alcalinité détermine la concentration en ions OH⁻, HCO₃⁻ et CO₃⁻ par la mesure de la quantité d'acide nécessaire pour réduire le pH [23].

Dans l'Engineering de boue de forage, l'alcalinité de phénophtaléine (P) est considérée comme étant le volume de H₂SO₄ à 0.02 N nécessaire pour titrer un millimètre de filtrat (Pf), ou de boue (Pm), pour ramener le pH à 8,3.

L'alcalinité de filtrat par le méthyle orange (Mf) mesure la quantité d'acide nécessaire pour ramener le pH à 4.3.L'alcalinité et le pH sont deux choses distinctes. Néanmoins, ils s'écoulent dans le même sens.

Une base forte telle que la soude caustique ajoutée à l'eau pure illustre la corrélation entre l'alcalinité et le pH (voir le tableau).

pH	NaOH (lb/bbl)	Pf (cc 0.02N H ₂ SO ₄)	OH ⁻ (ppm)
7	0.0000014	0.000005	0.0017
8	0.000014	0.00005	0.017
9	0.00014	0.0005	0.17
10	0.0014	0.005	1.7
11	0.014	0.05	17
12	0.14	0.5	170
13	1.4	5	1,700
14	14	50	17,000

Tableau 5 : Relation entre le PH et l'alcalinité pour l'eau pure

5.3.3. Capacité d'échange cationique

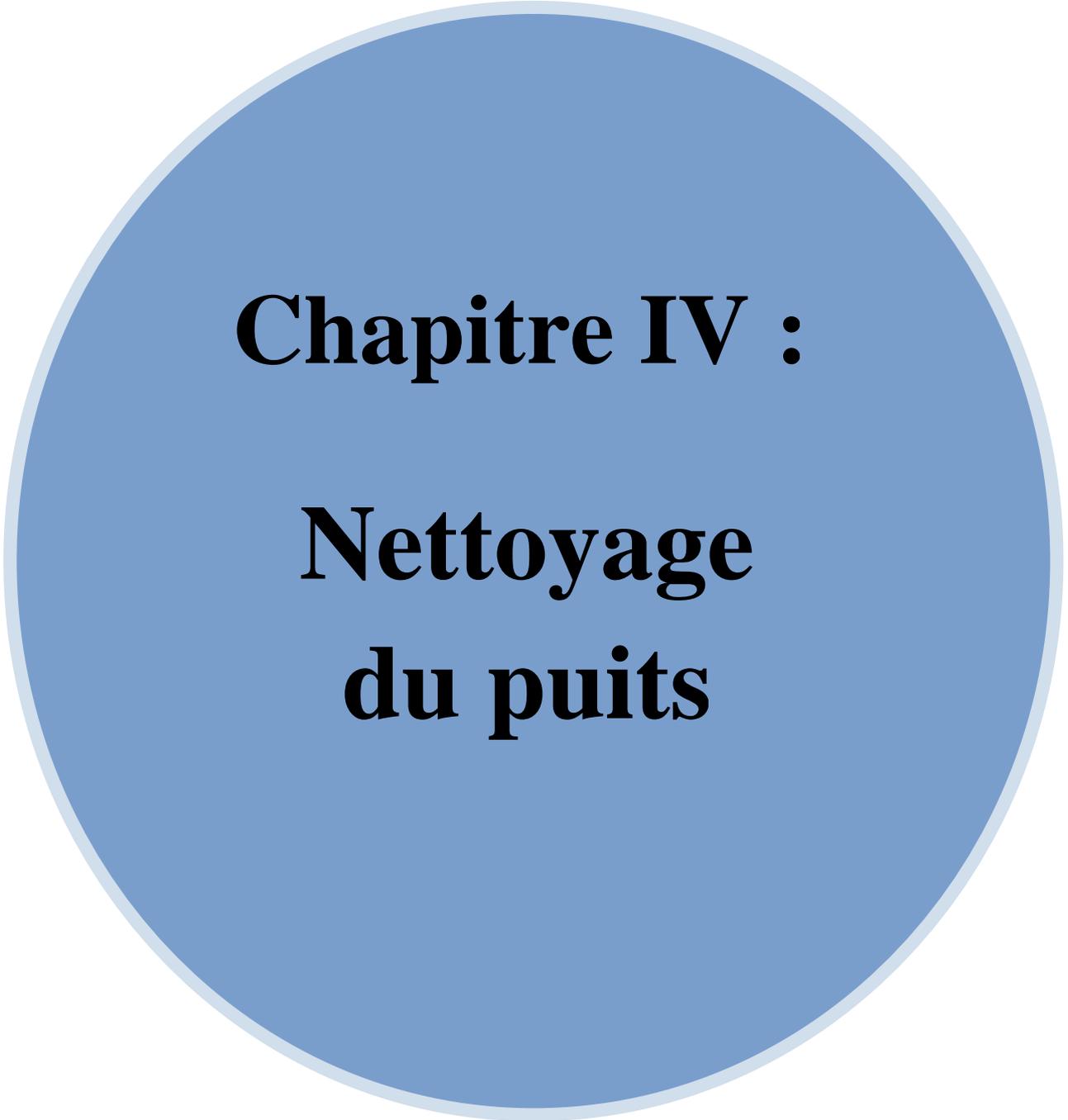
L'essai de bleu de méthyle sert à indiquer la quantité d'argile active dans un système boue ; l'essai mesure la capacité totale d'échange cationique des argiles, et êtes utile en même temps, que la détermination des solides contenus comme indication des caractéristiques colloïdale du minerais d'argile. Autrement, la phase argileuse peut être caractéristique et quelques estimations peuvent être déduites concernant la stabilité de puits [20] [23].

5.3.4. La conductivité électrique

La résistivité de l'eau de fabrication de la boue doit être mesurée et contrôlée, pour permettre l'évaluation régulière des caractéristiques de formation en vers les enregistrements électriques. Un test de stabilité électrique est utilisé comme indication de stabilité des émulsions d'eau dans l'huile (boues à l'huile). L'opération consiste à immerger une sonde adaptée dans l'échantillon en question. En imposant un courant électrique et en mesurant la conductivité du milieu par la suite [23].

5.3.5. Autres caractéristiques :

Aptitude à la lubrification, la corrosion ...etc. Doivent être pris en considérations.



Chapitre IV :

**Nettoyage
du puits**

1. Introduction

Le nettoyage du puits est l'une des principales fonctions du fluide de forage. Cela consiste en l'évacuation des cuttings générés par l'outil de forage, les retombés de formations, jusqu'en surface. Cependant, toute défaillance de nettoyage peut résulter de sérieux problèmes. Entre autre : collage par pression différentielle, excessivité de torque et drag, éboulement des formations, perte de circulation, augmentation de viscosité et de gels, faible vitesse d'avancement etc.

Dans les puits fortement dévier ou horizontaux, le problème de nettoyage est accentué par la tendance des cuttings à s'accumuler par effet de gravité surtout en l'absence de circulation. En effet, les cuttings n'ont à parcourir qu'une petite distance avant de s'accumuler et former un « lit des cuttings » pratiquement appelé « cuttings bed ».

2. Les conséquences d'un mauvais nettoyage

Le mauvais nettoyage de puits provoque plusieurs problèmes [16] [17] :

2.1. Augmentation des torques, drags avec perte de couple(en rotary) et de WOB(en sliding) successive

Le torque est la résistance à la rotation de la garniture de forage, et le drag est la résistance à la remontée ou à la descente de la garniture de forage.

Le mauvais nettoyage joue un rôle primordial dans l'augmentation des torques et drags pendant le forage des puits fortement déviés et horizontaux, par le coefficient de friction (f). Ces pertes de tractions et de rotation sont dues aux accumulations des déblais dans les différentes sections du puits. De fait, leur persévérance causera la fatigue des éléments de la garniture, d'où d'important risque de rupture.

2.2. Difficultés de mouvement de la garniture et risque de coincement

L'accumulation des cuttings dans le trou peut augmenter les paramètres rhéologiques et physiques de la boue de forage (viscosité, densité,...). Ceci aura pour conséquence une augmentation des forces de frottement pouvant conduire au collage par pression différentielle. Cette difficulté de maniabilité de la garniture aura pour conséquence un découlement très lent des opérations de manœuvres.

2.3. Instabilité des parois du puits et pertes de circulations

En plus de la pression hydrostatique de la colonne de boue, la descente et la remonté de la garniture créent une surpression et dépression peuvent conduire à des fracturations des formations fragiles et la pénétration des déblais de dimensions assez réduites dans les pores.

Il s'en suivra un colmatage des pores et une réduction de la productivité du puits. Ces pertes sont d'autant plus importantes que les caractéristiques rhéologiques de la boue sont modifiées par la teneur en solides. La densité de la boue est un facteur majeur pour le contrôle du puits, en général, plus l'inclinaison du puits augmente, plus la densité de la boue à exiger pour stabiliser les parois augmente. Il devrait être note que pour les puits fortement déviés il y a une convergence entre le gradient de fracturation et ECD (Equivalent circulating density).

Le gradient de fracturation est en fonction de TVD (True vertical depth), mais ECD est en fonction de MD (Measured depth).

2.4. La mauvaise cimentation

Pendant la descente du casing, l'accumulation des cuttings peut créer des frottements excessifs et empêcher d'atteindre le fond. Pendant la cimentation, le lit de cuttings s'opposera d'une part à la rotation/réciproquassions du tubage, et créera un canal des solides dans l'enveloppe de ciment, nuisant ainsi à l'étanchéité et la résistance à la compression de l'ensemble.

2.5. Difficultés de contrôle du puits

Lors des venues, une augmentation significative de pression annulaire est liée aux forces de friction, donc la quantité des déblais dans la boue. Un mauvais nettoyage peut conduire à une usure rapide de la Duse hydraulique au cours de contrôle de venue.

2.6. Influence sur le mode d'écoulement de la boue

Un lit de cuttings tapissant la paroi inférieure d'un puits incliné peut avoir un impact sur le type d'écoulement et causer différents écoulements de types stationnaire, hétérogène ou pseudo homogène.

La vitesse annulaire « critique » pour le nettoyage du trou est la vitesse requise pour induire un régime d'écoulement pseudo homogène.

2.7. Bourrage de l'outil

C'est important de limiter la concentration des cuttings dans l'espace annulaire. Quand les grands volumes des particules solides ou des cuttings sont produits dans un volume spécifique de boue de forage, ces cuttings adhèrent, rassemblent et s'accrochent aux surfaces du métal de l'outil et BHA. Si ces cuttings ne sont pas enlevés rapidement de la surface de l'outil, l'attraction électrochimique des argiles pour le métal causera le bourrage de l'outil.

Les hautes concentrations des solides contenant dans la boue et des cuttings forés mènent au bourrage de l'outil, ce sont fonction de la composition de la boue, ROP et taux de débit. La pénétration excessive relative aux taux de débit réduit peut créer une concentration massive de solides réactif dans l'annulaire. Par conséquent, lors du forage de la formation argileuse, la basse concentration des solides dans la boue devrait être maintenue aussi basse que possible (5% en volume ou moins).

2.8. Coût de revient élevé

Le compromis que doit remplir la boue est d'autant plus difficile que les formations traversées sont complexes. Aussi une mauvaise évacuation des déblais aura pour conséquence l'intervention supplémentaire de boues légères ou visqueuses selon les problèmes, ce qu'est une dépense supplémentaire au coût du puits.

L'efficacité du transport des solides peut être améliorée en optimisant les paramètres suivants [17] :

- Régime d'écoulement,
- Vitesse annulaire moyenne (V_a),
- Rhéologie du fluide de forage,
- paramètre de forage (Rotation, Reciprocation, Wiper trips, Vitesse d'avancement, traitement des solides).
- Densité du fluide de forage.

3. Régime d'écoulement

Des expériences de laboratoire et l'observation pendant le forage ont montré que le régime d'écoulement requis pour un nettoyage optimal du puits est fonction de l'inclinaison

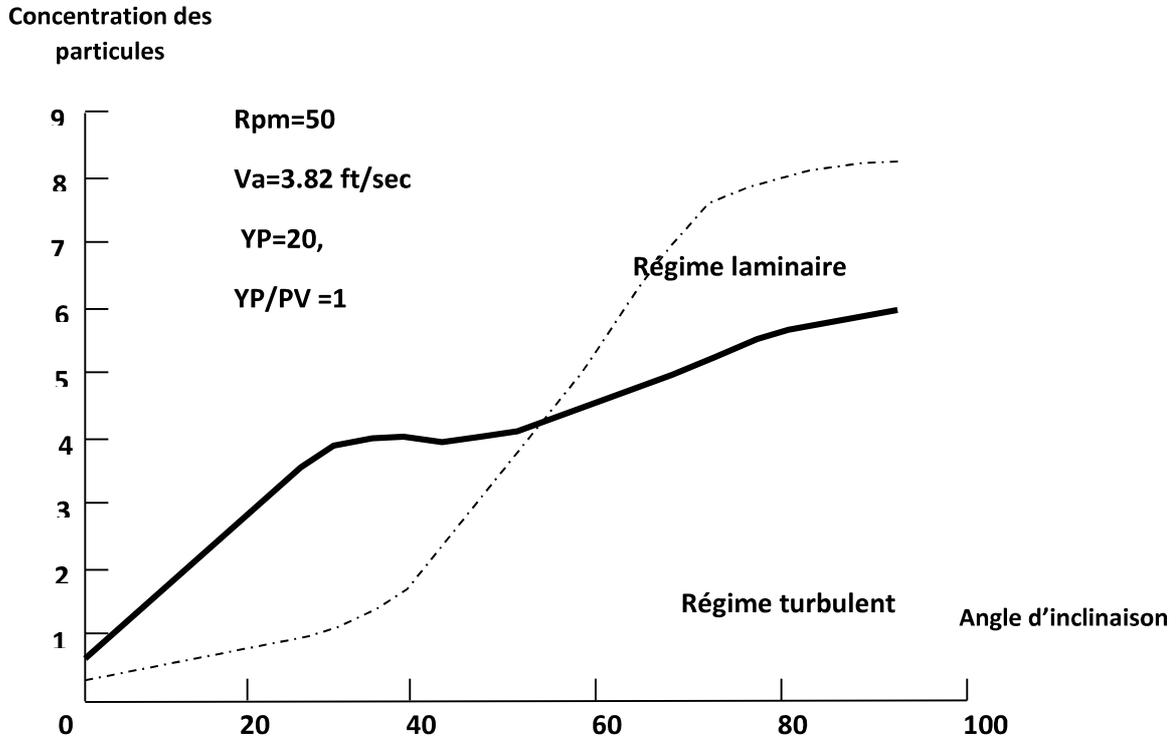


Figure.20 : Effet du régime d'écoulement sur la concentration annulaire des cuttings

Pour les angles de 0° à 45° degré on remarque que le régime laminaire donne des meilleurs résultats car la concentration des cuttings dans l'espace annulaire est inférieure à celle avec le régime turbulent ;

Pour les angles de 45° à 55° degré on remarque que les deux régimes d'écoulement donnent des résultats plus ou moins identiques. L'un ou l'autre de ces deux régimes est satisfaisant ;

Plus de 55°degré le régime turbulent donne des meilleurs résultats car la concentration des cuttings est plus faible qu'avec le régime laminaire.

Soit :

- V_a : vitesse annulaire moyenne [m/s] ;
- V_{max} : vitesse maximum dans un annulaire donné [m/s] ;
- V_{pr} : vitesse près des parois à une distance de $d = \frac{(D_{trou} - D_{pipe})}{10}$ [m/s]
- τ_c : yield point [N/m²] et μ_p : viscosité plastique [Pa.s].

3.1. Ecoulement en bouchon (Plug flow)

La vitesse ascendante du fluide est constante pratiquement à travers tout l'annulaire jusqu'au voisinage des parois.

Ce type d'écoulement se produit uniquement pour des caractéristiques de boue particulières (thixotropie) associée à une faible vitesse annulaire moyenne V_a .

- $\tau_c / \mu_p > 2$ eq. IV. 1

- $V_a = V_{max} = V_{Pr}$ eq. IV. 2

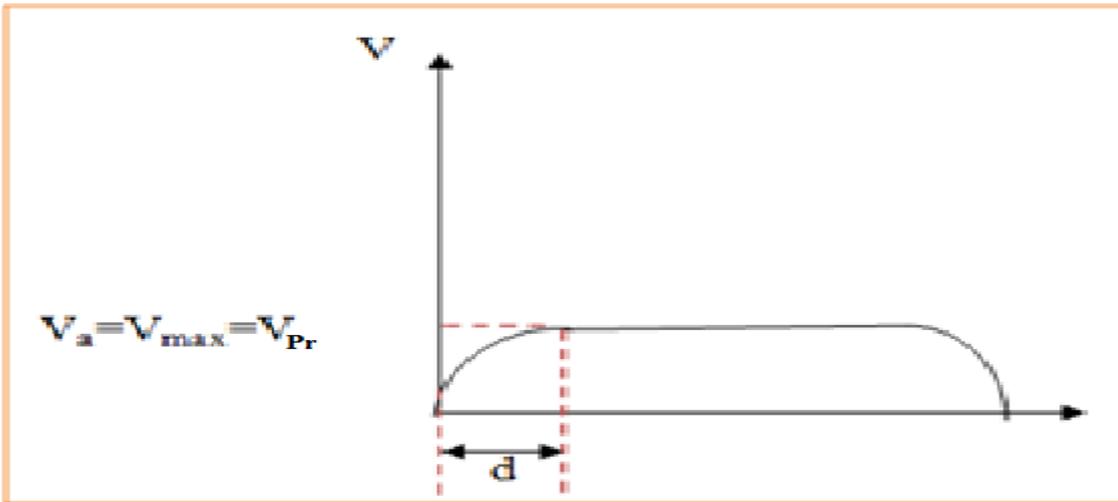


Figure. 21 : Profil de vitesse en Plug flow

3.2. Écoulement intermédiaire entre le plug flow et le laminaire (Plug laminar flow)

Ce profil peut être obtenu avec une vitesse annulaire moyenne V_a compatible avec des débits usuels et une rhéologie appropriée. (Figure. 22)

Plus le rapport τ_c / μ_p est grand, plus la part plug flow est grande.

Ce type de profil permet à la vitesse aux parois V_{Pr} d'augmenter tout en ayant une vitesse moyenne V_a relativement faible (V_{max} aussi proche de V_a que possible).

- $\tau_c / \mu_p > 1$ eq. IV. 3

- $V_{max} > V_a > V_{Pr}$ eq. IV. 4

- $V_{max} < 2 V_{Pr}$ eq. IV. 5

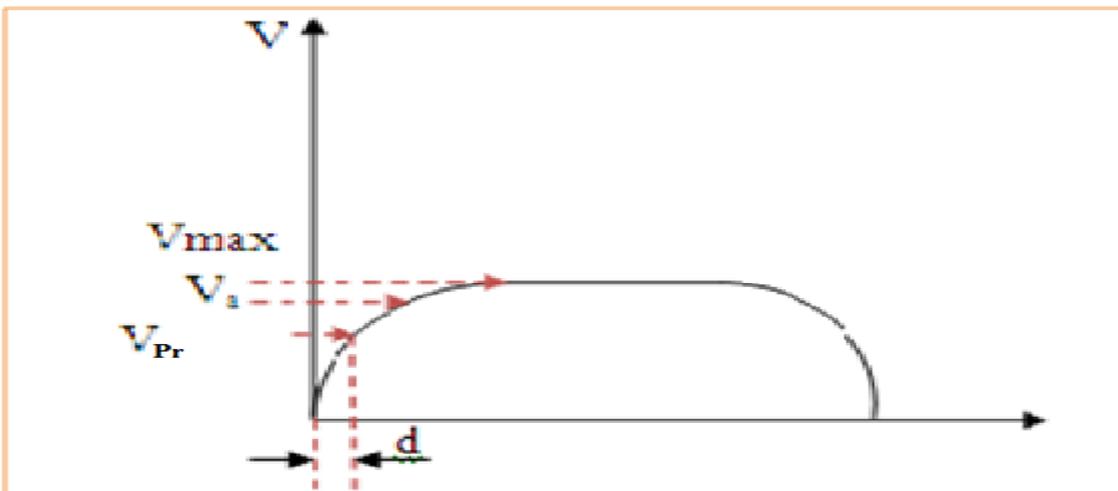


Figure. 22 : Profil de vitesse en Plug laminar flow

3.3. Régime laminaire

C'est le profil le plus fréquent. V_{max} peut être très supérieur à V_a .

Il a été prouvé expérimentalement que certains cuttings étaient transportés à une vitesse supérieure à V_a , alors que d'autres l'étaient à une vitesse inférieure ou pas du tout.

La vitesse aux parois V_{pr} peut être inférieure à la vitesse de sédimentation des cuttings.

- $\tau_c / \mu_p < 0.5$ eq. IV.6

- $V_{max} > 2 V_{pr}$ eq. IV.7

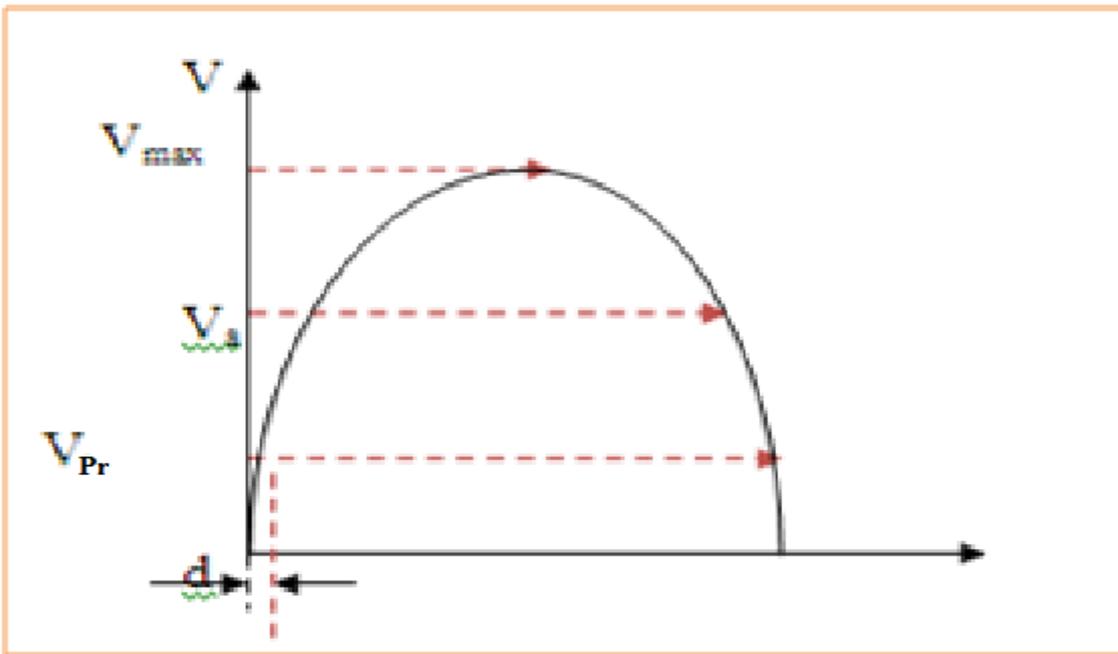


Figure.23 : Profil de vitesse en régime laminaire

3.4. Régime turbulent

D'après les observations, avec ce régime tous les cuttings sont transportés, mais généralement à des vitesses inférieures à V_a .

Il semble que les vitesses de la boue soient supérieures à la vitesse de sédimentation des cuttings dans la plupart des annulaires, mais que la résultante ascendante appliquée à certains cuttings puisse localement être inférieure à V_a .

En pratique le régime turbulent est capable de bien nettoyer un annulaire, mais le temps de transport pour la totalité des cuttings sera plus long que le lag time théorique.

Ce type d'écoulement requiert à la fois une vitesse annulaire moyenne V_a élevée et des caractéristiques de boue faibles, les deux étant automatiquement liés.

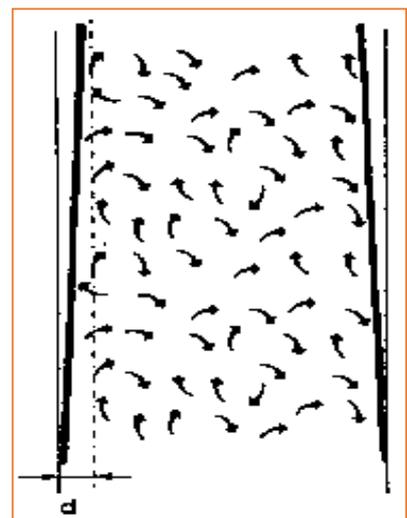


Figure.24 : Profil de vitesse en Régime turbulent

Si les conditions pour le régime turbulent ne sont pas établies, alors se produit le pire des cas de régime laminaire (profil de vitesse très pointu avec une V_{max} très grande, mais aussi avec une large part de l'annulaire soumise à des vitesses de boue ascendantes faibles).

$$- \quad V_a = V_{max} = V_{pr} \quad \text{eq. IV.8}$$

4. Vitesse annulaire

L'efficacité du nettoyage et du transport est principalement fonction du taux de sédimentation des solides et de la vitesse annulaire.

Quand la boue est circulée dans l'annulaire d'un puits horizontal ou très dévié, un lit de cuttings tend à se former sur la paroi inférieure. Si la vitesse annulaire diminue, le lit de cuttings va épaisir jusqu'à ce que la restriction de l'espace annulaire ainsi créée entraîne une augmentation de la vitesse annulaire jusqu'à une valeur, "vitesse critique", où les cuttings sont remis en suspension et transportés. A ce moment-là l'épaisseur du lit de déblais devient stable.

L'augmentation de la vitesse annulaire de la boue améliore le nettoyage du trou :

- Quelle que soit l'inclinaison ;
- Quel que soit le régime.

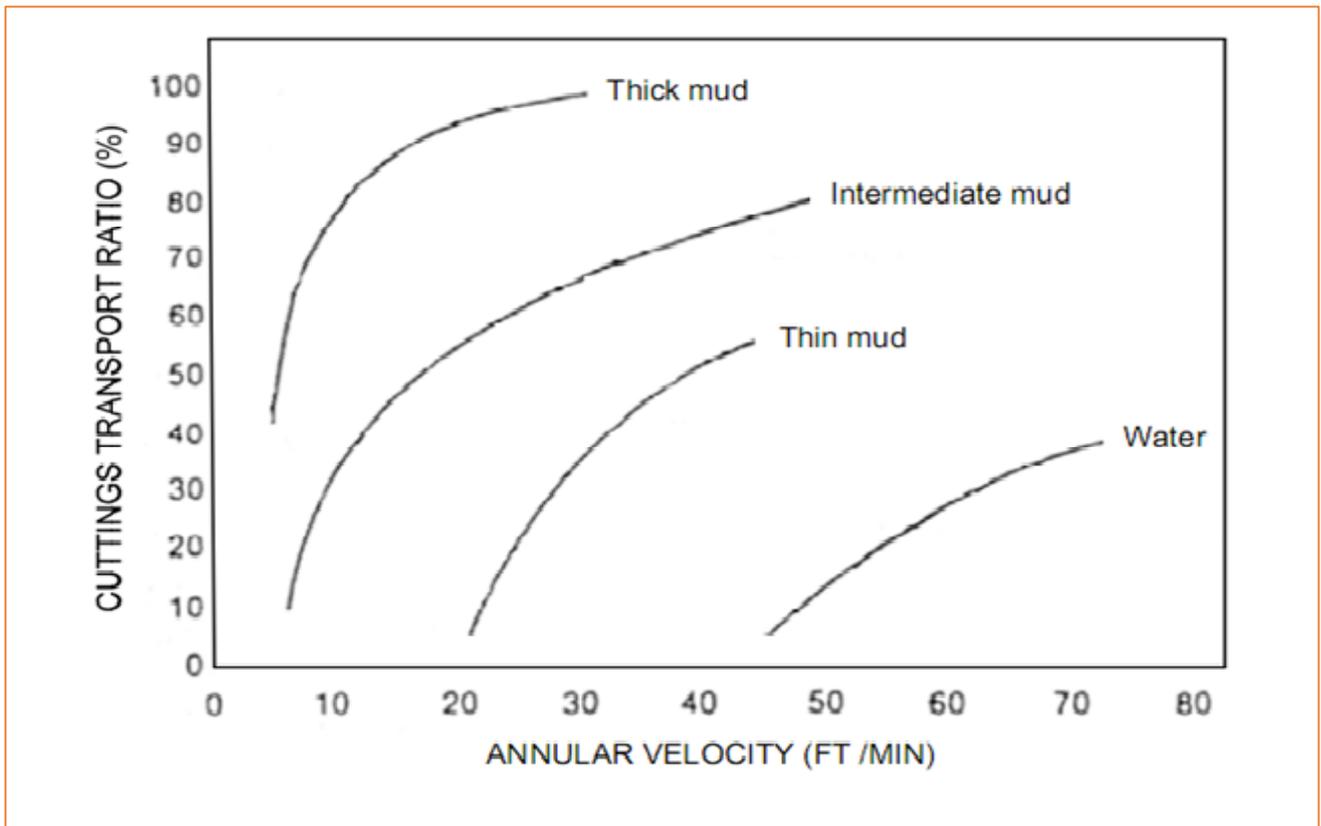


Figure.25 : Efficacité du nettoyage en fonction de la vitesse annulaire

Remarque : Ne pas confondre cette "vitesse critique" avec la vitesse critique caractérisant le passage du régime laminaire au régime turbulent.

- Si le débit est supérieur à la valeur "critique", l'épaisseur du lit de cuttings est pratiquement nulle.
- La vitesse annulaire nécessaire à la remise en suspension de cuttings déjà sédimentés peut être plus ou moins 50% supérieure à la vitesse requise pour transporter les cuttings et les empêcher de sédimenter ;
- Les propriétés rhéologiques de la boue n'ont qu'un petit impact sur le débit "critique" nécessaire pour nettoyer le puits.

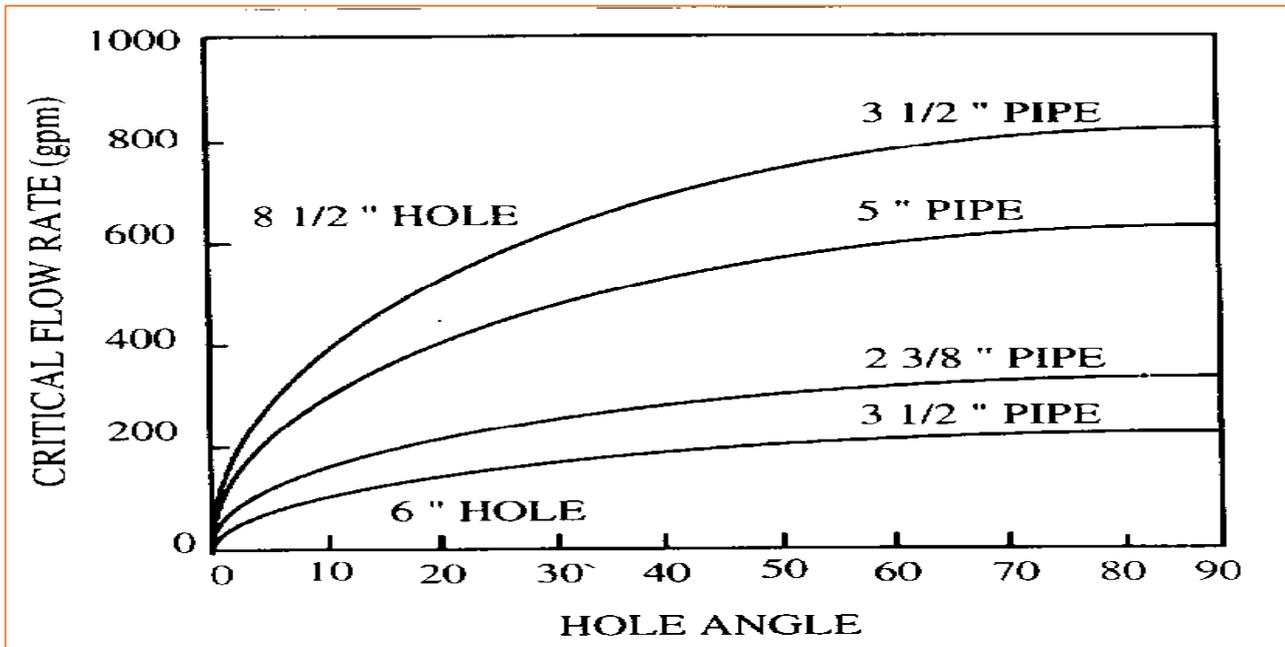


Figure.26 : Débit « critique » en fonction de l'inclinaison

5. Rhéologie du fluide

Quel que soit le type de fluide de forage et la loi à laquelle il obéit (Bingham, puissance ou ses dérivées), les caractéristiques prises en compte en dynamique pour optimiser le transport des déblais seront le yield point τ_c et la viscosité plastique μ_p . Cette référence généralisée à la loi de Bingham est due à la difficulté d'interprétation des facteurs n (indice de comportement rhéologique) et K (indice de consistance) de la loi en puissance.

La rhéologie de la boue détermine le débit auquel elle doit être pompée pour maintenir le régime d'écoulement souhaité (généralement le régime turbulent pour la section horizontale).

Le débit requis et la vitesse annulaire peuvent entraîner une érosion de la paroi du trou si la rhéologie de la boue n'est pas optimisée.

D'autre part, du fait de la différence entre les mécanismes maintenant les cuttings en suspension dans les conditions statiques et dans les conditions dynamiques, il y a quelque confusion au sujet des valeurs optimales respectives du yield point τ_c , de la viscosité plastique μ_p et des gels pour optimiser le nettoyage du trou et empêcher la sédimentation des solides pendant le forage, tel que il est préférable d'avoir une boue légère avec une LSRV et LSYP (respectivement Low Shear Rate Viscosity et Low Shear Yield Point) élevées qu'une boue visqueuse avec des faibles caractéristiques rhéologique (LSRV et LSYP).

5.1. Gels (thixotropie) :

5.1.1. Thixotropie diminue avec l'efficacité du transport des solides.

C'est un facteur très défavorable au transport efficace des cuttings dans un puits, et tout particulièrement si la garniture de forage n'est pas en mouvement (forage avec moteur en orienting mode).

La boue gelée forme sur la paroi inférieure du trou une couche pratiquement immobile qui retient les fines (cuttings de petites dimensions), c'est la raison pour laquelle les solides de la formation (LGS) présents dans la boue ne doivent pas excéder 10 %, de façon à minimiser la thixotropie.

En fait, comme on utilise généralement un moteur de navigation et un MWD pour le forage des puits horizontaux, les valeurs maximales à ne pas dépasser sont

LGS < 4 % et sable < 2 %

Ceci implique pour les puits horizontaux ou fortement déviés des moyens de traitement mécanique des solides à la fois importants et efficaces.

5.1.2. Gel 10 sec (gel 0) vs gel 10 min

Pour l'efficacité du nettoyage, le gel 0 a plus d'importance que le gel 10 min.

L'emploi d'outils diamant (naturel, TSP, PDC) génère des fines (particules) plus faciles à maintenir en suspension que les cuttings des tricônes (1/8 à 1/4"). Cependant la quantité importante de fines tend à augmenter le gel (thixotropie) de la boue, nécessitant une vitesse annulaire pour nettoyer le trou, plus grande que pour les cuttings plus gros (figure 25).

En effet, la boue gelée située sur la génératrice inférieure du trou piège les fines, nécessitant un débit "critique" pour les remettre en suspension plus élevé que pour les gros cuttings non recouverts par la couche de boue gelée, et qui sont poussés par le courant de boue.

Une boue visqueuse ayant un gel élevé génère un cake mou et épais qui accroît les chances de collage par pression différentielle, ainsi que le torque et les frottements en forage.

6. Paramètres de forage

Un strict contrôle des paramètres de forage améliore sensiblement le transport des solides, la géométrie du trou et son nettoyage. Aussi l'utilisation du top drive quasi indispensable pour le forage de puits horizontaux facilite grandement les opérations de forage.

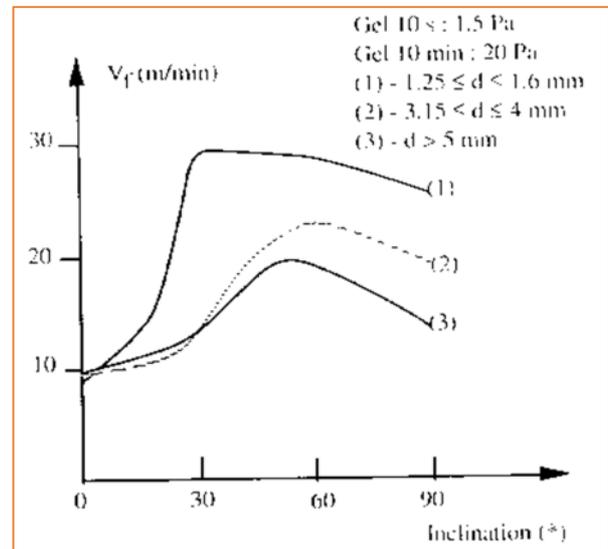


Figure.27 : Vitesse annulaire requise en fonction de la taille " d " des particules

6.1. Rotation/ Reciprocation

6.1.1. Rotation et régime d'écoulement :

En régime turbulent, la rotation du train de tiges n'a pratiquement aucune influence sur l'enlèvement des cuttings.

En régime laminaire, la rotation du train de tiges est manifestement bénéfique, tout spécialement dans les sections où repose un lit de cuttings. L'augmentation de la vitesse de rotation tend à remuer le lit de cuttings d'une part, et à introduire des turbulences localement dans la boue d'autre part, contribuant ainsi à un meilleur nettoyage (figure 26).

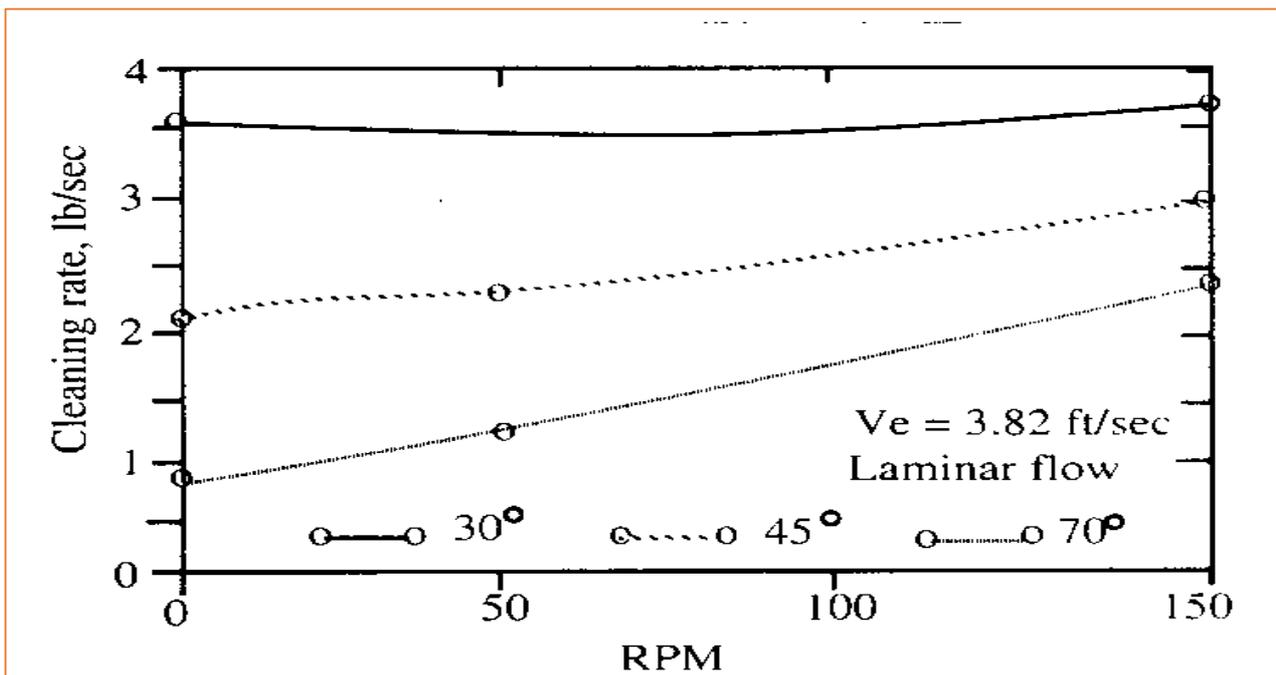


Figure. 28 : Effet de la vitesse de rotation sur l'enlèvement des cuttings

La rotation diminuerait également l'ECD (equivalent circulating density) .

6.1.2. Rotation et Débit :

Il est préférable de faire tourner la garniture à grande vitesse que de circuler avec un grand débit. En effet la rotation de la garniture favorise la déstabilisation des cuttings pour les mettre dans le courant de la boue même à débit réduit mieux encore, la conjugaison d'une grande rotation avec un débit réduit n'érode pas les parois du puits

La reciprocation périodique contribue nettement à remuer les cuttings qui se trouvent dans le puits surtout au droit de protecteurs (placés sur les tiges de forage) des casings très inclinés.

Si la réciprocation n'est pas possible, la rotation du train de tiges doit être impérativement très lente pour éviter la formation de key seats ou de saillies (dog legs).

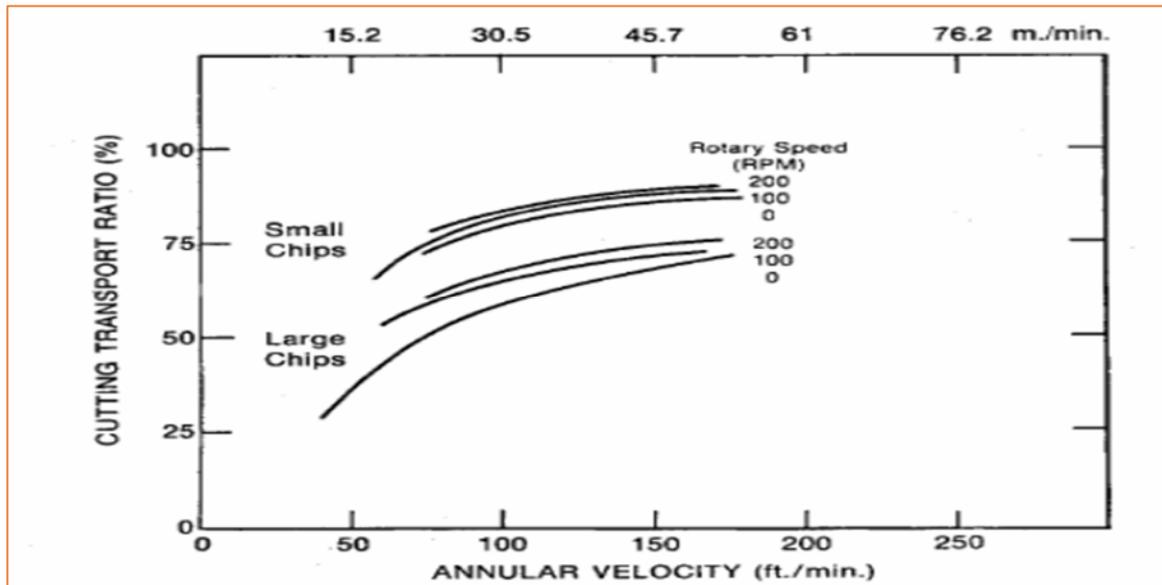


Figure. 29 : Effet de la vitesse de rotation et celle d'annulaire sur l'enlèvement des cuttings

6.2. Wiper trips

L'expérience à montrer que les wiper trips fréquents, contribuent à mettre les cuttings en agitation et à les placer sur la trajectoire du flot.

A nouveau ceci est très important à considérer quand on fore avec un moteur en mode sliding dans la section très inclinée ou horizontale.

6.3. Vitesse d'avancement

6.3.1. Concentration de cuttings dans l'annulaire

Quand la vitesse d'avancement augmente sans une augmentation comparable du débit, la difficulté de maintenir en suspension et transporter les cuttings augmente avec leur concentration croissante dans l'annulaire.

La concentration croissante peut provoquer une agglutination des cuttings qui ont à l'origine une tendance à s'entre coller.

L'intensité du phénomène dépend de la capacité inhibitrice de la boue ;

6.3.2. Capacité inhibitrice de la boue

Les boues à l'eau inhibées (KCl, NaCl, CaSO₄, Ca (OH)₂ etc.) se comportent mieux que les boues ordinaires. Toutefois les boues ayant une phase huile continue, et donc une capacité inhibitrice plus ou moins parfaite, permettent des vitesses d'avancement plus élevées car elles peuvent supporter des concentrations de cuttings plus importantes ;

6.3.3. Contrôle de l'avancement

Le contrôle de l'avancement associé à une augmentation du débit peut améliorer le nettoyage. En fait, compte tenu de la capacité de traitement en surface, on peut gagner finalement du temps en réduisant l'avancement : meilleur nettoyage du puits signifie moins de problèmes dans le trou, donc gain de temps.

6.4. Capacité de traitement mécanique des solides

Des équipements supplémentaires de capacité de traitement adéquate sont essentiels pour maintenir les caractéristiques de la boue. Sachant bien que la concentration de cuttings dans l'annulaire augmente avec l'inclinaison. Parmi ces équipements nous avons entre autre :

- Tamis vibrant (ou shale shakers) : assure à la fois le volume et le type de cuttings qui sont des indicateurs importants des conditions de trou. (Cuttings ,Cavings)
- Dessableur : pour un diamètre $> 74\mu\text{m}$
- Dessilteur : pour un diamètre $< 74\mu\text{m}$
- Centrifugeuse pour éliminer les fines afin de mieux contrôler les gels.

Aussi il est recommandé d'avantage de temps de circulation.

7. Densité

La densité est l'un des paramètres boue agissant sur le transport des cuttings que l'on peut éventuellement modifier si les circonstances le permettent

La différence de densités ($\Delta d = \text{densité boue} - \text{densité cuttings}$) est un paramètre déterminant dans l'enlèvement des cuttings : plus d_{boue} est grand, plus Δd augmente, plus la capacité de transport de la boue est importante.

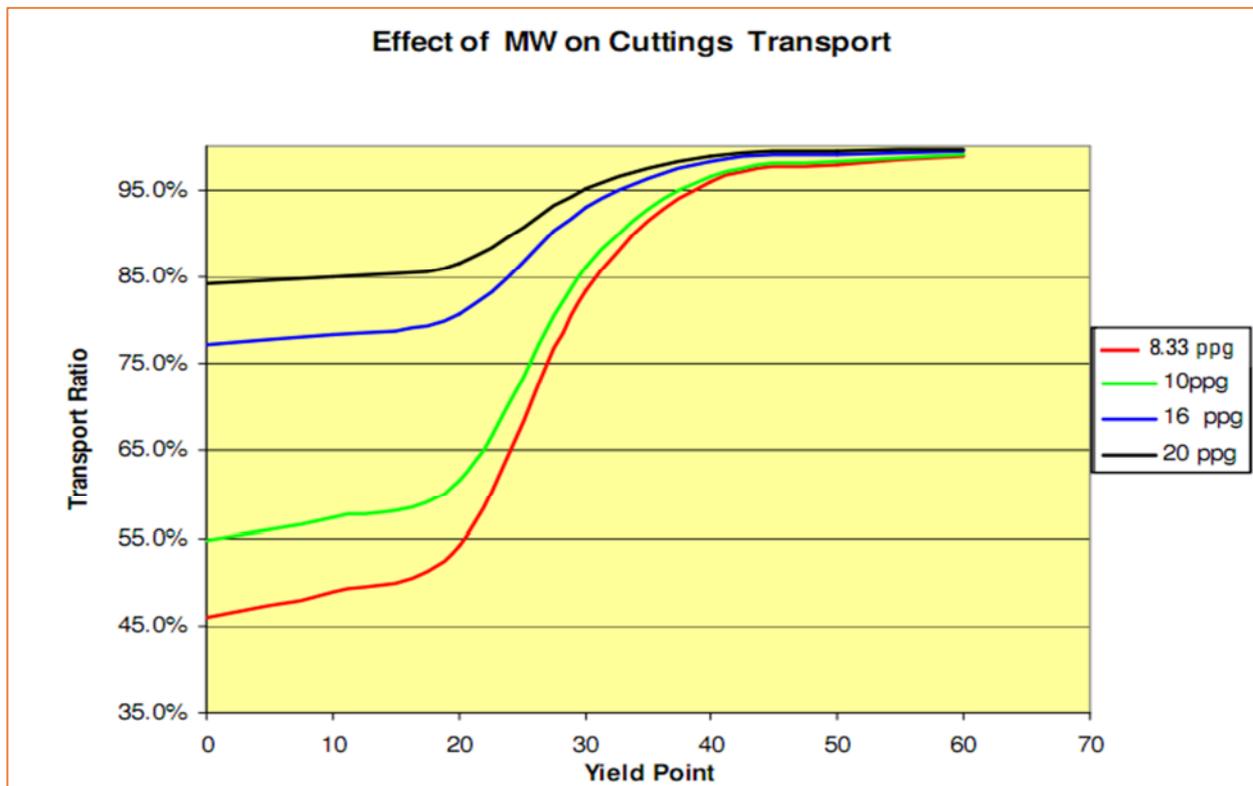
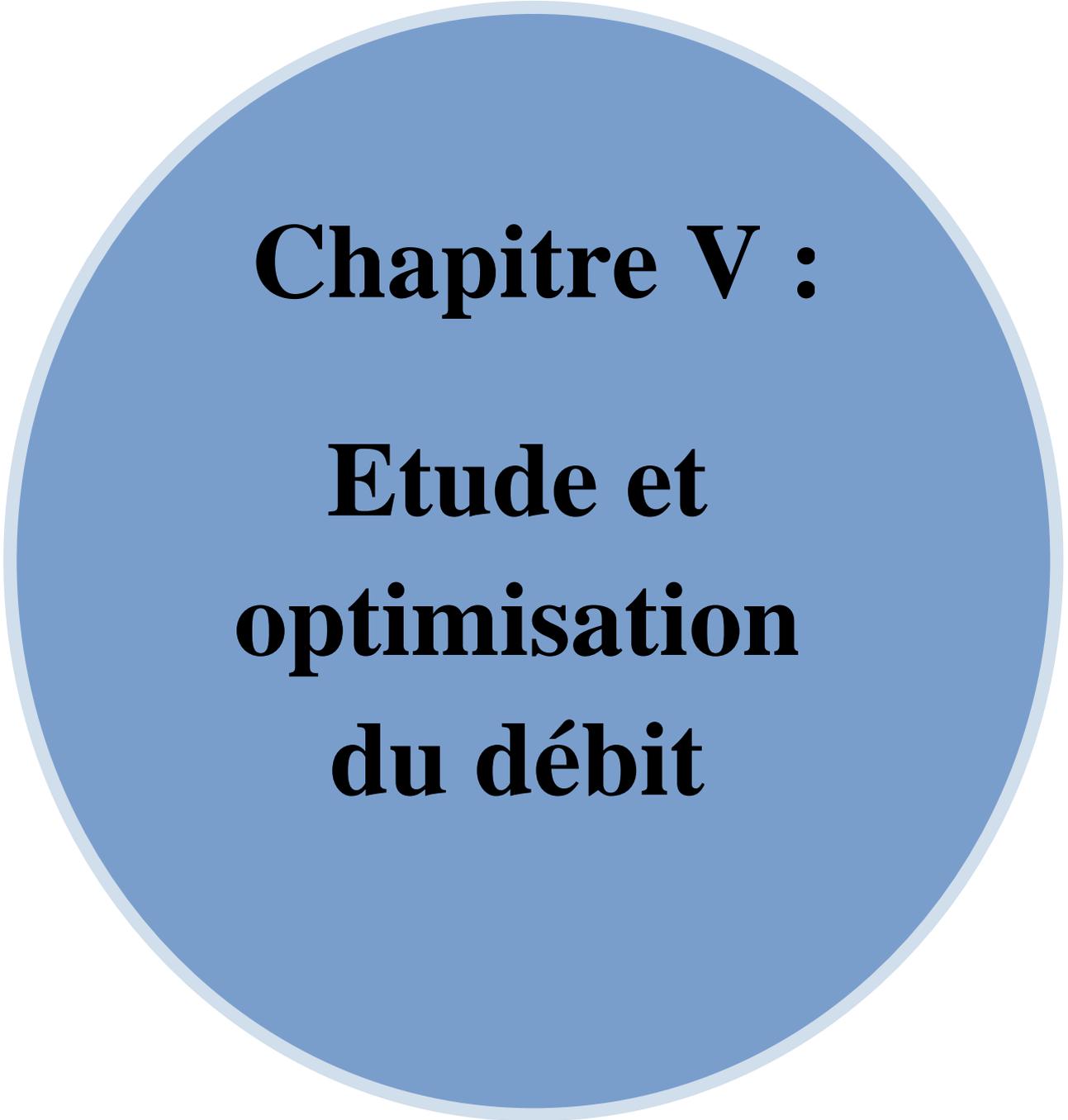


Figure. 30 : Influence de la densité sur l'enlèvement des cuttings



Chapitre V :

**Etude et
optimisation
du débit**

1. Introduction

Plusieurs chercheurs ont proposé des corrélations empiriques pour estimer la vitesse de sédimentation des particules lors des opérations de forage. Les corrélations de Moore et Chien sont le plus couramment utilisé.

L'efficacité du transport des cuttings dans les puits verticaux est généralement analysée en calculant la vitesse de sédimentation, qui dépend de plusieurs facteurs tels que :

- propriété de particules : Densité, la forme et la taille.
- Propriétés des fluides de forage : rhéologie, la densité et la vitesse.
- Configuration de trou : Pente et la taille.
- Paramètres opérationnels : rotation de la garniture et l'excentricité.

2. Calcul des paramètres hydraulique

2.1. Vitesse annulaire

Elle est calculée par :

$$Va = \frac{24.5 * Q}{d_{OH}^2 - d_1^2} [ft/mn] \quad \text{eq. V. 1} \quad \text{ou} \quad Va = \frac{0.408 * Q}{d_{OH}^2 - d_1^2} [ft/s] \quad \text{eq. V. 2}$$

Va : vitesse annulaire [ft/mn] ou [ft/s].

Q: débit [gpm].

d_{OH} : diametre de puits [in].

d₁ : diametre des tige ou masse tige [in].

2.2. Nombre de Reynolds des particules

$$N_{Re} = \frac{928\rho_f v_s d_c}{\mu} \quad \text{eq. V. 3}$$

ρ_f : masse volumique de fluide de forage [ppg]

v_s : vitesse de sédimentation des cuttings [ft/mn].

d_c : diametre des cutting [in].

μ : viscosité du fluide de forage [cp].

2.3. Efficacité de transport

L'efficacité de transport ET ou le rapport de nettoyage est le paramètre qui détermine le pourcentage des déblais évacué jusqu'en surface donc l'efficacité de nettoyage du puits, il est donné par la formule suivante :

$$E_T = \left(1 - \frac{v_s}{v_a}\right) 100 \quad \text{eq. V. 4}$$

Il permet de faire une comparaison entre la vitesse de sédimentation et celle de l'annulaire lors de forage

- Si la vitesse de sédimentation $V_s < V_a$ (la vitesse d'annulaire) alors ET est proche de 1 cela veut dire que l'énergie hydraulique injectée dans l'annulaire est suffisante à transporter les cuttings hors du puits.
- Si la vitesse de sédimentation $V_s > V_a$ (la vitesse d'annulaire) alors ET est inférieure de 0 cela veut dire que l'énergie hydraulique injectée dans l'annulaire n'est pas suffisante à transporter les cuttings hors du puits.

2.4. Concentration des déblais dans l'annulaire

Est un facteur qui permet de connaître le volume des déblais dans l'espace annulaire par rapport au volume de puits, il est calculé par la formule suivante :

$$C_a = \frac{ROP * d_c^2}{14.71 * E_T * Q} * 100 \quad \text{eq. V.5}$$

ROP : La vitesse d'avancement [ft/hr]

2.5. Vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation est la vitesse de décantation des déblais à travers le fluide de forage, elle dépend de :

- La rhéologie et la densité de la boue de forage.
- La densité, la forme et la dimension des déblais.

Loi de Stokes

Le modèle présenté dans cette étude vise à expliquer le principe de base de la loi de Stokes. Cette loi peut être décrite comme un phénomène, dans lequel une particule sphérique d'une densité et taille connue reste stable à travers un fluide stagnant dans un étendu infini.

La particule atteint sa vitesse de sédimentation constante, dès qu'elle commence à se déplacer. Connaissant les propriétés rhéologiques, la densité et la taille de la particule, la loi de Stokes peut être utilisée pour calculer la vitesse de glissement de la particule.

Comme il a été mentionné ci-dessus, les particules commencent à se déplacer dans le liquide visqueux, elles atteignent leur vitesse constante, de sorte que la somme des forces agissant sur une particule est égale à zéro. Cela signifie que la somme des forces agissant dans la direction vers le haut en raison de la flottabilité F_b et F_d la résistance du fluide qui est précisément contrebalancé par la force de gravité F_g

La loi générale des somme des forces vertical sont exprimer par :

$$F_g - F_b = F_d \quad \text{eq. V.6}$$

En définissant toutes les forces, l'équation ci-dessus est résolue :

$$(\rho_c - \rho_f) \left(\pi \frac{d_c^3}{6} \right) g = 3\pi d_c \mu v_s \quad \text{eq. V.7}$$

ρ_c : masse volumique des cuttings [ppg]

g : accélération de la gravité [ft/s²]

En arrangeant les équations on trouve :

$$v_s = \frac{d_p^2 g (\rho_c - \rho_f)}{18\mu} \quad \text{eq. V.8}$$

Les modèles de calcul de la vitesse de sédimentation des cuttings sont :

a) Modèle de Chien [25]

Chien a présenté deux corrélations empiriques pour la vitesse de sédimentation des déblais de forage pour les opérations de forage rotatif : une pour la détermination de la vitesse de sédimentation des déblais dans tous les régimes et l'autre une version simplifiée pour le régime turbulent

Pour les mélanges de bentonite et d'eau, la viscosité plastique peut être utilisée comme viscosité apparente, tandis que pour des fluides de forage de type polymère ; la viscosité apparente est calculée comme le montre au-dessous :

$$\mu_a = \mu_p + 300 \frac{\tau_c d_{dp}}{v_a} \quad \text{eq. V.9}$$

μ_a : viscosité apparente [cp].

μ_p : viscosité plastique [cp].

τ_c : yeild point [lb/(100ft²)].

d_{dp} : diametre de la tige de forage [in].

La vitesse de sédimentation à lequel les particules solides coulent vers le bas à travers le liquide. L'équation empirique a tenté de corrélér des facteurs tels que la taille et la densité de déblais, la densité la boue et de la viscosité de la boue.

L'équation empirique de la vitesse de sédimentation :

$$v_{slip} = \begin{cases} 1.44 \sqrt{d_c \frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f}} & , N_{Re} > 100 \\ 0.0075 \left(\frac{\mu_a}{\rho_f d_c} \right) \left(\sqrt{\frac{36800 d_c (\rho_c - \rho_f)}{\left(\frac{\mu_a}{\rho_f d_c} \right)^2} + 1} - 1 \right) & , N_{Re} \leq 100 \end{cases} \quad \text{eq. V.10}$$

Toutes les corrélations sont données en unités de terrain et ρ_c représente la densité des déblais.

b) Corrélation de Moore [25] [26]

La procédure proposée par Preston Moore pour prédire la vitesse de sédimentation, le coefficient de frottement conventionnel et le rapport des nombres de particules Reynold pour une sphère tombe à travers un fluide Newtonien. Afin de tenir compte du comportement non Newtonien du fluide de forage, Moore suggère d'utiliser une viscosité Newtonien apparente obtenue en égalisant les pertes de pression par frottement avec un écoulement laminaire dans le modèle fluide Newtonien avec les pertes de charge par friction dans le modèle fluide loi de puissance .

La viscosité apparente est données par :

$$\mu_a = \frac{K}{144} \left(\frac{60(d_2 - d_1)}{v_a} \right)^{1-n} \left(\frac{2 + \frac{1}{n}}{0.0208} \right)^n \quad \text{eq.V.11}$$

La viscosité apparente est utilisée pour calculer le nombre de Reynolds :

$$N_{Re} = \frac{928\rho_f v_s d_c}{\mu_a} \quad \text{eq.V.12}$$

- Si le nombre de Reynolds est supérieur à 2000 on aura la vitesse de sédimentation :

$$v_s = 92.4 \sqrt{d_c \frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f}} \quad \text{eq.V.13}$$

Et le facteur de friction est $f = 1.5$

- Si le nombre de Reynolds inférieur ou égale à 1 l'écoulement est considéré comme laminaire

$$v_s = 4972 \frac{d_c^2}{\mu_a} (\rho_c - \rho_f) \quad \text{eq.V.14}$$

Et le facteur de friction est $f = \frac{40}{N_{Re}}$

- Si le nombre de Reynolds entre 1 et 2000

$$v_s = \frac{174 d_c (\rho_c - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} \mu_a^{0.333}} \quad \text{eq.V.15}$$

Et le facteur de friction est $f = \frac{22}{\sqrt{N_{Re}}}$

c) Corrélation de Walker et Mayes [25] [28]

Dans cette corrélation, les déblais de forage sont supposés être en forme de disque circulaire, à la différence des deux cas ci-dessus où les particules sont supposées sphériques. Par conséquent, les particules tomberont à travers le fluide avec la face plane horizontale couchée. Le taux de cisaillement, appelé le taux de cisaillement limite, à laquelle le mouvement d'une particule passe de laminaire à turbulent, est calculé par :

$$\gamma_b = \frac{186}{d_c \sqrt{\rho_f}} \quad \text{eq. V. 16}$$

La contrainte de cisaillement développé par les particules lorsqu'elles passent à travers le fluide de forage est donnée par :

$$\tau_p = 7.9 \sqrt{T_c (\rho_c - \rho_f)} \quad \text{eq. V. 17}$$

T_c : épaisseur de la particule [in]

Une fois que la contrainte de cisaillement est déterminée, le taux de cisaillement correspondant est déterminé en utilisant des constantes de la loi de puissance annulaires :

$$\gamma_p = \frac{\tau_p^{na}}{k_a} \quad \text{eq. V. 18}$$

- Si $\gamma_p < \gamma_b$ ou $Re_p < 100$ alors la vitesse de sédimentation de la particule se situe dans la zone laminaire elle est déterminé par :

$$V_s = 0.02 \tau_p \left(\frac{\gamma_p d_c}{\sqrt{\rho_f}} \right)^{0.5} \quad \text{eq. V. 19}$$

- Si $\gamma_p > \gamma_b$ ou $Re_p > 100$ alors la vitesse de sédimentation de la particule se situe dans la zone turbulente elle est déterminé par :

$$V_s = 0.28 \frac{\tau_p}{\sqrt{\rho_f}} \quad \text{eq. V. 20}$$

2.6. Calcul des pertes de charge et de l'ECD [28] [29]

2.6.1. Calcul de l'indice de consistance dans l'annulaire

$$n_a = 0.5 * \log \left(\frac{l300}{l3} \right) \quad \text{eq. V. 21}$$

2.6.2. Calcul de l'indice de comportement dans l'annulaire

$$K_a = \frac{5.11 * l300}{511^{n_a}} \quad \text{eq. V. 22}$$

2.6.3. Calcul de la viscosité dans l'annulaire

$$\mu_{ea} = 100K_a \left[\frac{144v_a}{D_2 - D_1} \right] \quad \text{eq. V. 23}$$

2.6.4. Calcul de nombre de Reynolds dans l'annulaire

$$Re_a = \frac{928v_a(D_2 - D_1)d_f}{\mu_{ea} \left(\frac{2n_a + 1}{3n_a} \right)^{n_a}} \quad \text{eq. V. 24}$$

Limite des nombres de Reynolds

$$Re_L = 3470 - 1370n_a \quad \text{eq. V. 25}$$

$$Re_T = 4270 - 1370n_a \quad \text{eq. V. 26}$$

Re_L : Nombre de Reynolds pour le régime laminaire

Re_T : Nombre de Reynolds pour le régime turbulent

2.6.5. Calcul du facteur de friction

Le facteur de friction est le coefficient adimensionné f qui dépend de :

- Le régime d'écoulement
- Le nombre de Reynolds « Re »
- Le type de fluide

- Si $Re_a < Re_L$ donc

$$f_a = \frac{24}{Re_a} \quad \text{eq. V. 27}$$

- Si $Re_L < Re_a < Re_T$ donc

$$f_a = \left[\frac{Re_a - Re_L}{800} \right] \left[\frac{\frac{\log(n_a) + 3.93}{50}}{Re_T^{\left(\frac{[1.75 - \log(n_a)]}{7} \right)}} - \frac{24}{Re_L} \right] + \frac{24}{Re_L} \quad \text{eq. V. 28}$$

- Si $Re_a > Re_T$ donc

$$f_a = \frac{\frac{\log(n_a) + 3.93}{50}}{Re_a^{\left(\frac{[1.75 - \log(n_a)]}{7} \right)}} \quad \text{eq. V. 29}$$

2.6.6. Calcul des pertes de charge dans une section

L'écoulement du fluide dans le puits provoque des pertes de charges dues à la dissipation des forces de frictions qui sont :

- Les forces de friction interne dues à la viscosité.
- Les forces de friction externe due à la rugosité des tiges et des parois du trou.

Ces pertes de charge se produisent :

- Dans les équipements de surface
- A l'intérieur des tiges et les masse tiges
- A travers les événements de l'outil
- Dans l'espace annulaire entre la paroi du puits et la garniture

Les pertes de charge sont en fonction de :

- la rhéologie de fluide de forage
- Régime d'écoulement (laminaire /turbulent)
- Géométrie du puits et la garniture de forage

Dans notre étude, on s'intéresse aux pertes de charges à travers les événements de l'outil et à travers les masses tiges et les tiges.

$$P_a = \frac{f_a v_a^2 d_f}{25.81(D_2 - D_1)} * L \quad \text{eq. V. 30}$$

2.6.7. Calcul des pertes de charge total dans l'annulaire

$$P_{aT} = \sum P_a \quad \text{eq. V. 31}$$

2.6.8. Calcul de la densité équivalente de circulation ECD

C'est l'équivalent circulating density qui est la somme de la densité de la boue et les pertes de charge dans l'espace annulaire converti en termes de densité, elle doit être inférieure à la densité de fracturation, elle est calculée par la formule suivante :

$$ECD = \frac{P_{aT}}{0.052 * TVD} + d_f \quad \text{eq. V. 32}$$

2.7. Calcul hydraulique au niveau de l'outil [28] [30]

2.7.1. Calcul de la surface des duses

$$TFA = n * \left(3.14 \frac{\left(\frac{J}{32}\right)^2}{4} \right) \quad \text{eq. V. 33}$$

n : nombre de duses.

J : diamètre des duses en (1/32) [in]

2.7.2. Perte de charge au niveau de l'outil

On calcule les pertes de pression pour un débit Q de fluide de densité ρ_f par

$$\Delta P_b = \frac{156.5 * Q^2 \rho_f}{10858 * TFA^2} \quad \text{eq. V. 34}$$

Dans un circuit hydraulique donné, si l'on augmente le débit la puissance dépensé en pertes de charge augmente et par conséquence la puissance restant disponible à l'outil va diminuer et vice-versa. On conçoit donc qu'il y ait un débit optimum permettant de transmettre à l'outil la puissance maximum.

Deux concepts sont utilisés pour définir les conditions optimales de travail de la boue à l'outil :

Puissance Hydraulique optimal (HHP)

La puissance hydraulique au niveau de l'outil peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$HHP = \frac{\Delta P_b * Q}{1714} \quad \text{eq. V. 35}$$

Q: le débit de la boue [gpm].

ΔP_b : les pertes de charge à travers l'outils.

$$HSI = \frac{HHP * 1.27}{d_{OH}^2} \quad \text{eq. V. 36}$$

La puissance hydraulique au front de taille doit être comprise entre 2 et 5 HP/in² afin d'assurer un meilleur nettoyage du puits, au-dessus de cet intervalle on risque d'éroder l'outil et de l'user et en dessous le nettoyage est insuffisant ce qui implique la formation d'un lit de déblais réduisant les performances de l'outil et risquant de bourrer les éléments de coupe.

L'impact de jet de fluide IF (lbf)

Il représente la force exercée par la boue à la sortie des événements de l'outil, il est défini par :

$$IF = \frac{V_n * Q * \rho_f}{1930} \quad \text{eq. V. 37}$$

Avec

$$V_n = \frac{0.32086 * Q}{TFA} \quad \text{eq. V. 38}$$

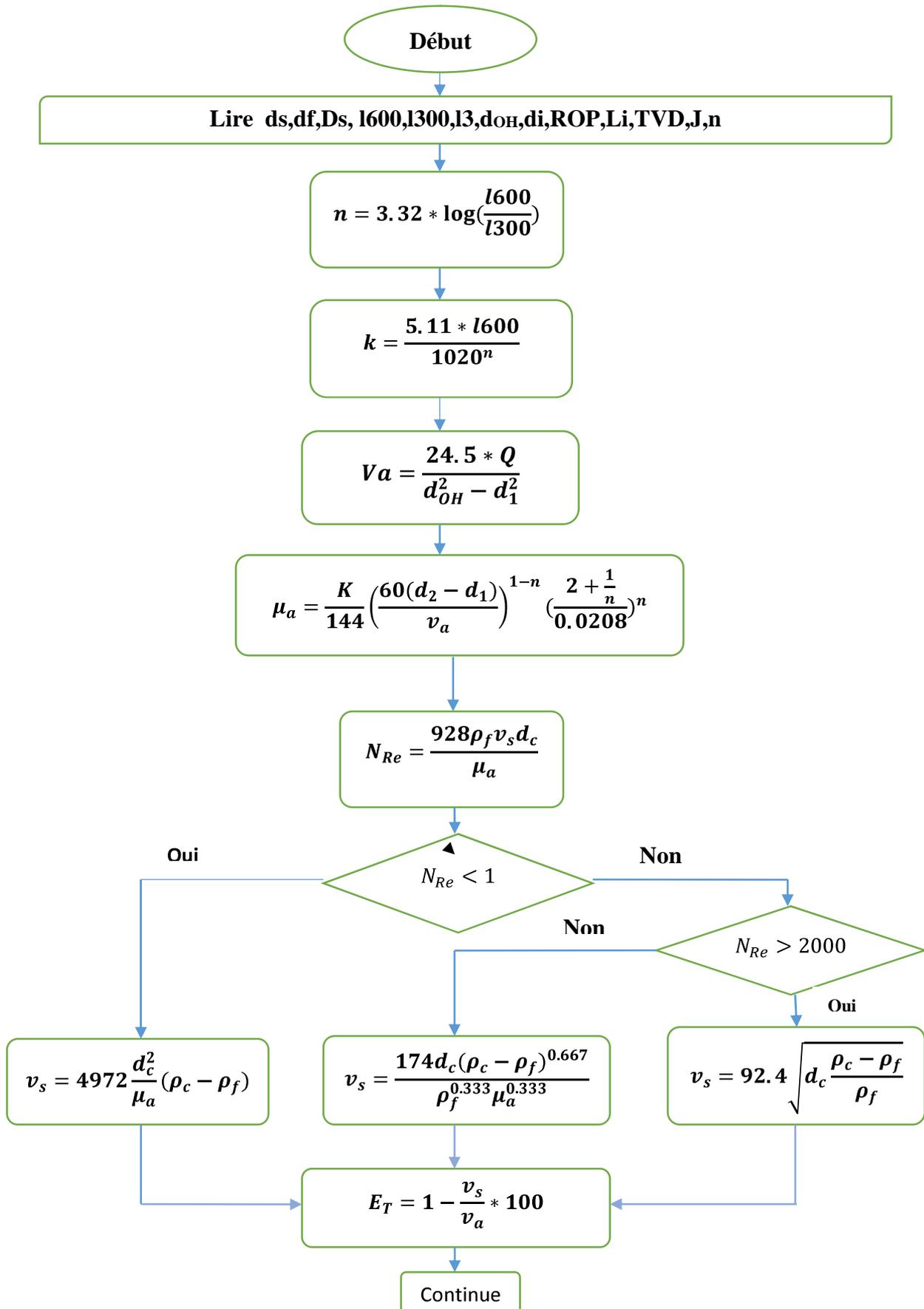
V_n : La vitesse de jet de fluide [ft/s]

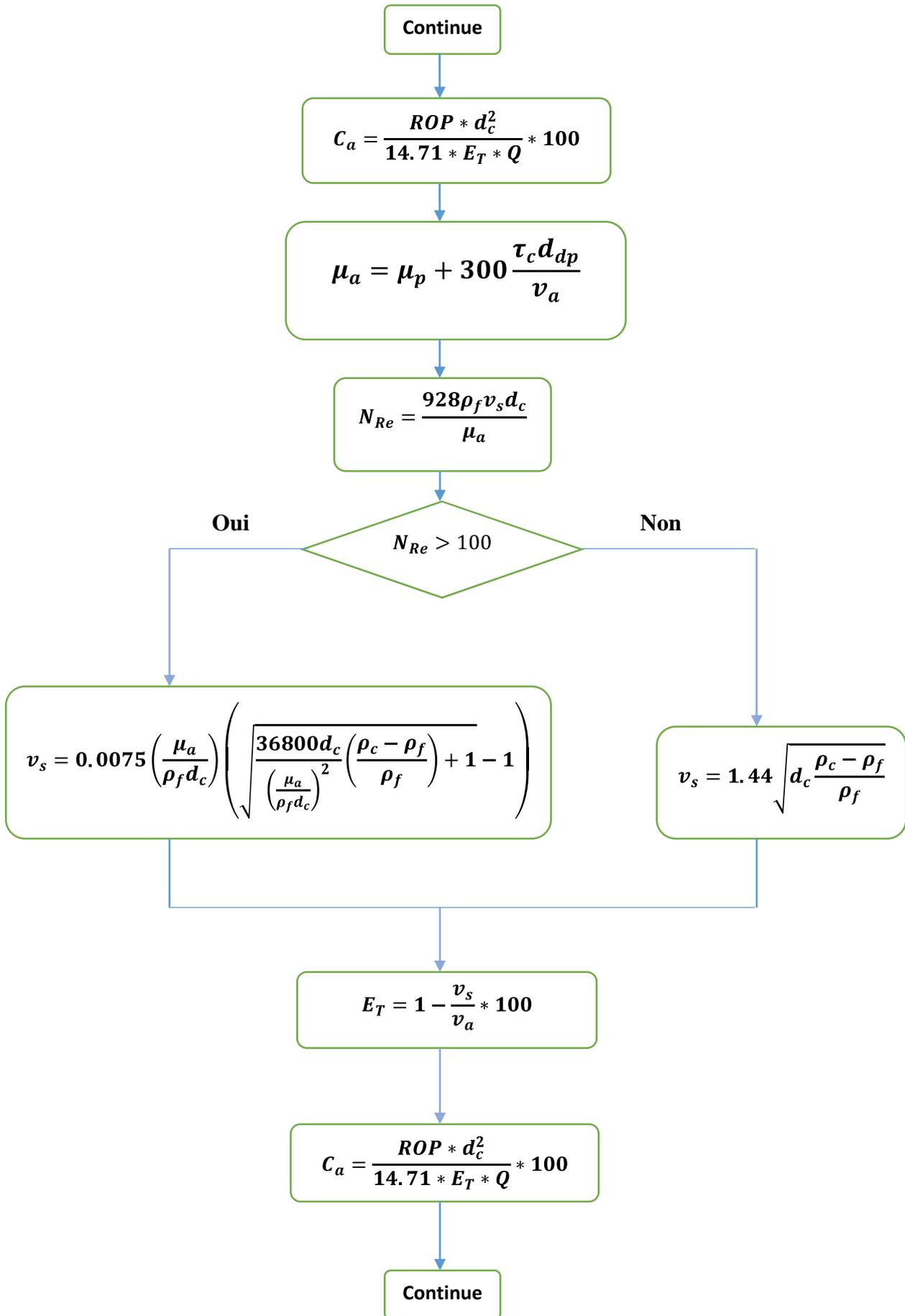
$$IF / in^2 = \frac{IF * 1.27}{d_{OH}^2} \quad \text{eq. V. 39}$$

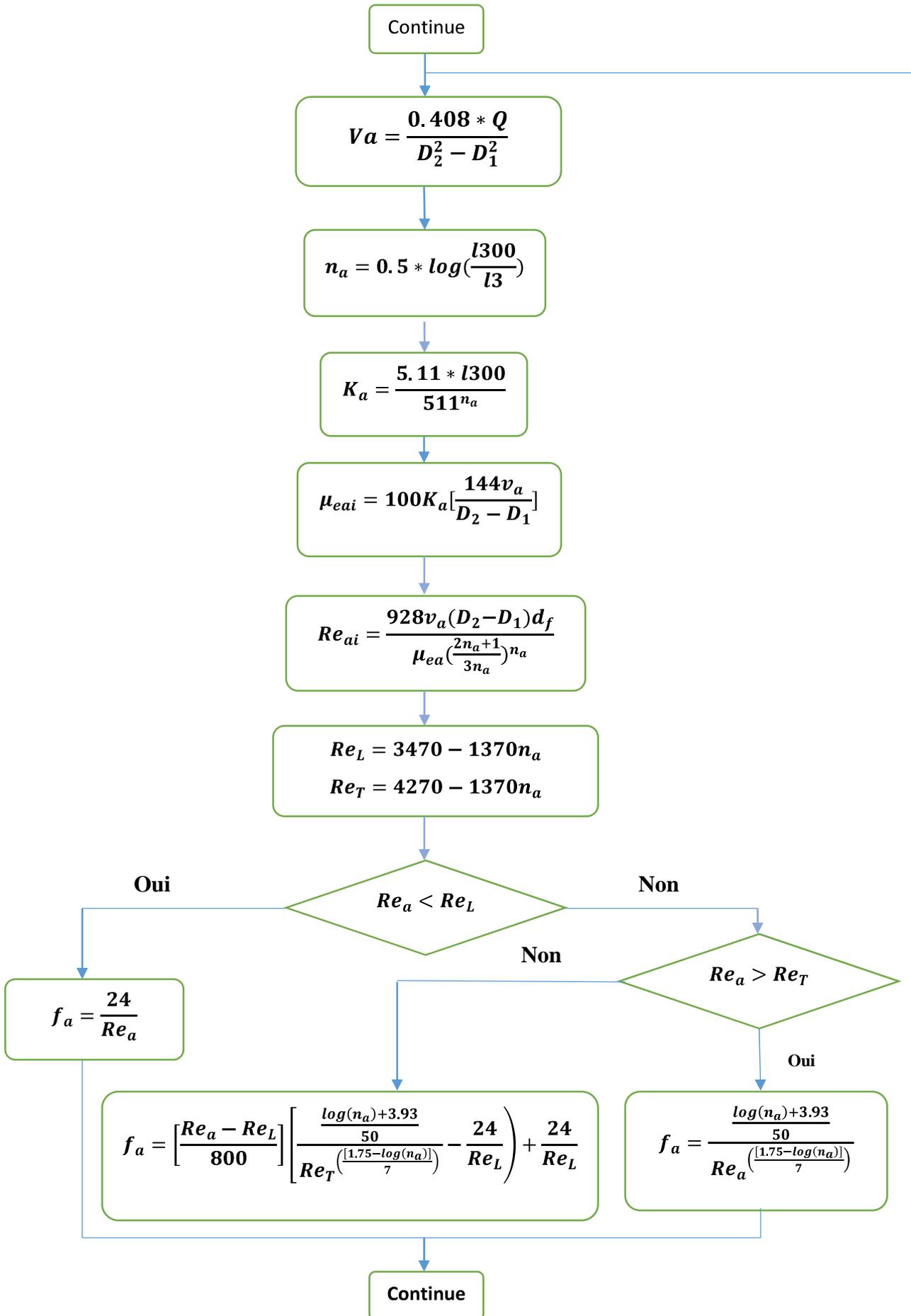
Remarque

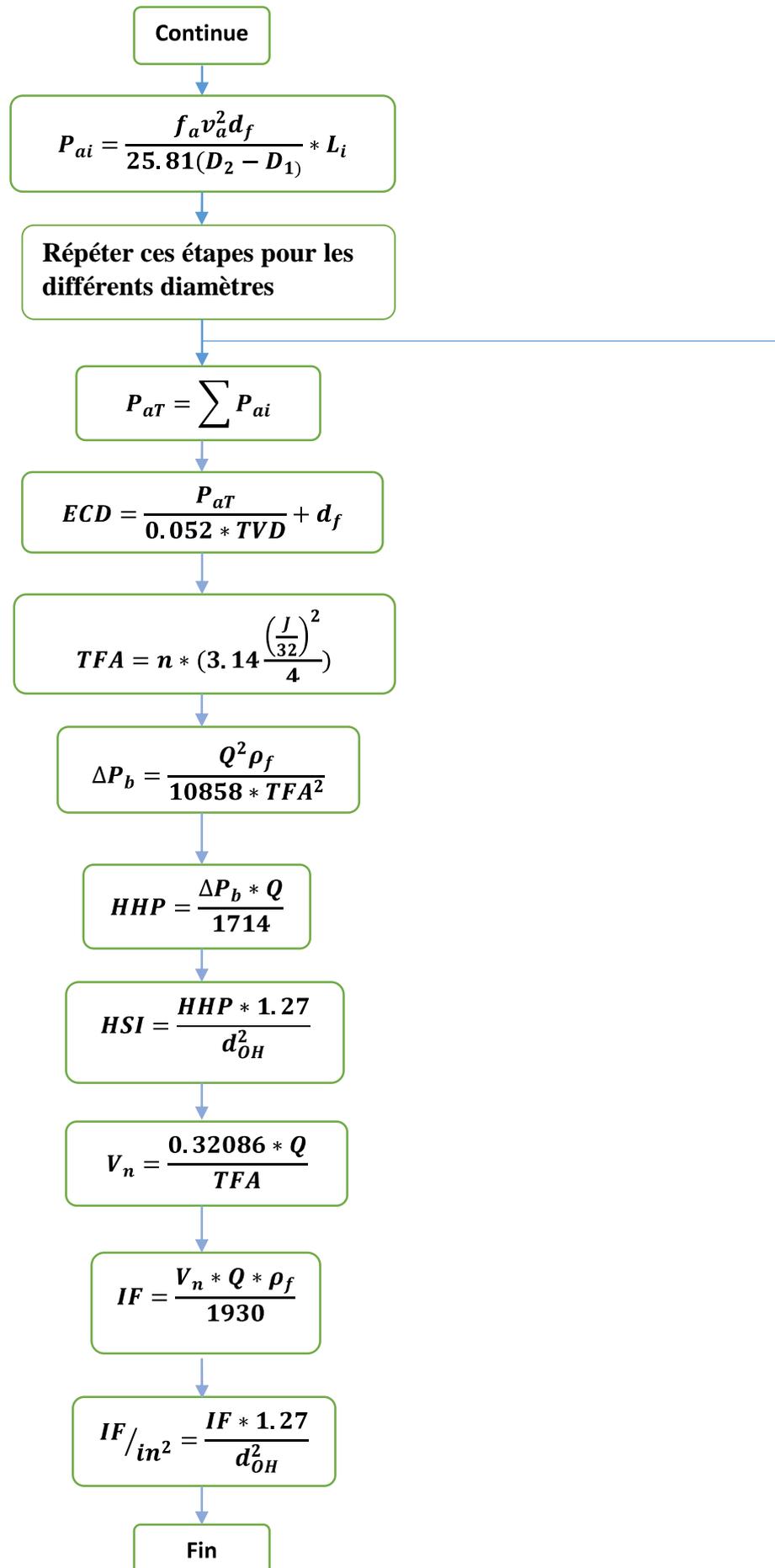
La puissance hydraulique et les pressions maximales utilisées sont limitées pour un circuit donné (tiges, masses tiges, outil), il y a lieu d'optimiser les grandeurs **HHP** et **IF**, en jouant sur le débit et le diamètre des événements compte tenu des pertes de charge à l'outil et en dehors de l'outil

3. L'organigramme de calcul des paramètres hydraulique









4. Les données du puits BKNEP-1

Variable	Valeur	Variable	Valeur
Densité de fluide (sg)	1,4	Diamètre de casing (in)	9 ^{5/8}
Densité de déblais (sg)	2,55	Longueur des DP (m)	3557 - 1116,55
Diamètre des déblais (in)	0,5	Longueur des DC (m)	206,2
Lecture 600	46	TVD (m)	4880
Lecture 300	30	Cote du dernier sabot (m)	3330
Lecture 3	8	Diamètre des duses (32nd")	16
Diamètre des DP (in)	5 - 5 ^{1/2}	Nombre des duses	4
Diamètre des DC (in)	6 ^{1/2}	X (%)	10
Diamètre d'outils (in)	8 ^{1/2}	Y (%)	90

Tableau 7 : Données du puits BKNEP-1

NB :

La densité des déblais D_s a été estimée par la formule suivante :

$$D_s = (D_{arg} * X) + (D_{gr} * Y) \quad \text{eq.V.40}$$

Avec

D_{arg} : La densité d'argile, $D_{arg} = 1,7$ sg

D_{gr} : La densité des grés , $D_{gr} = 2,65$ sg

X, Y : le pourcentage d'argile et de grés dans la formation forée respectivement.

5. Etude et optimisation du débit

Pour optimiser le débit on doit vérifier :

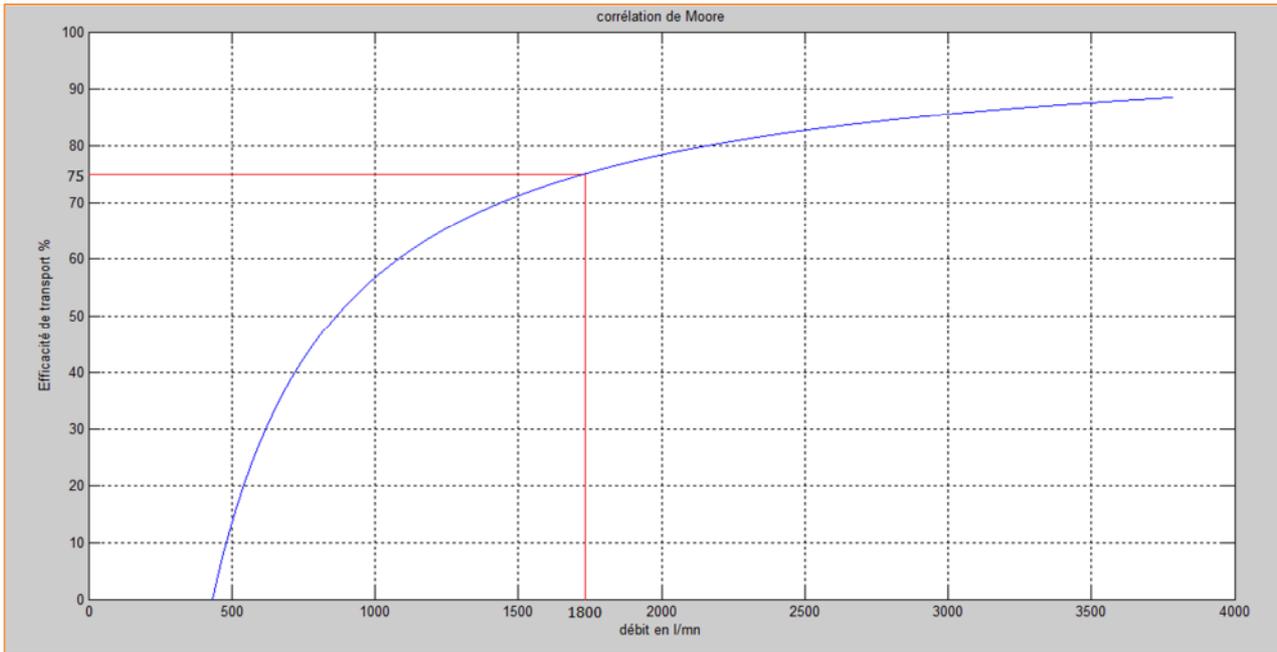
- L'étude de la variation de l'efficacité de transport ET en fonction du débit
- L'étude de la variation d'ECD en fonction du débit
- Les pertes de charge, l'impact et la puissance hydraulique

5.1. Variation de l'efficacité de transport (ET) en fonction de Débit

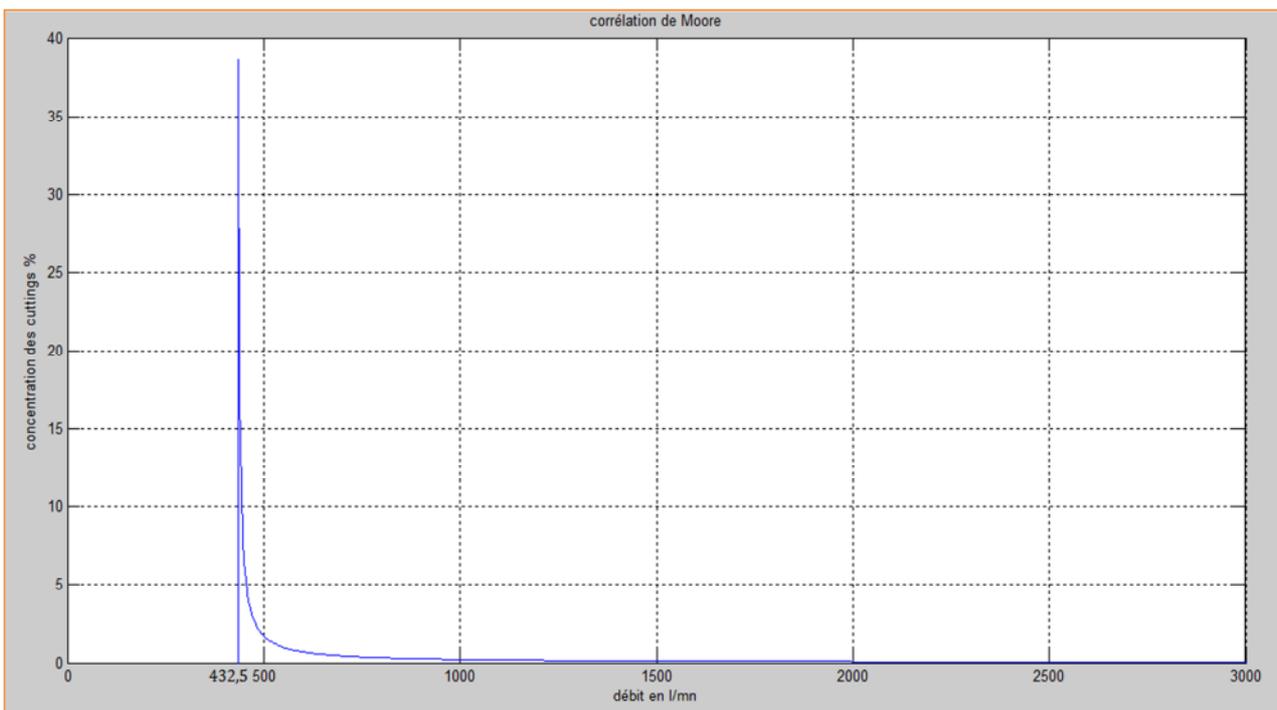
5.1.1. Corrélation de Moore

Q (L/m)	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Va (ft/mn)	38,529	77,059	154,117	231,176	308,234	385,292	462,351
Vs Moore (ft/mn)	59,216	59,216	59,216	59,216	59,216	59,216	59,216
ET Moore(%)	-72,903	13,545	56,778	71,182	78,387	82,703	85,593
Ca Moore(%)	-0,639	1,719	0,205	0,109	0,074	0,056	0,0454

Tableau 8 : Variation de Va et Vs en fonction du débit « corrélation de Moore »



Graphe 01 : Efficacité de transport en fonction de Débit« corrélacion de Moore »



Graphe 02 : Concentration des cuttings en fonction de Débit

Interprétation

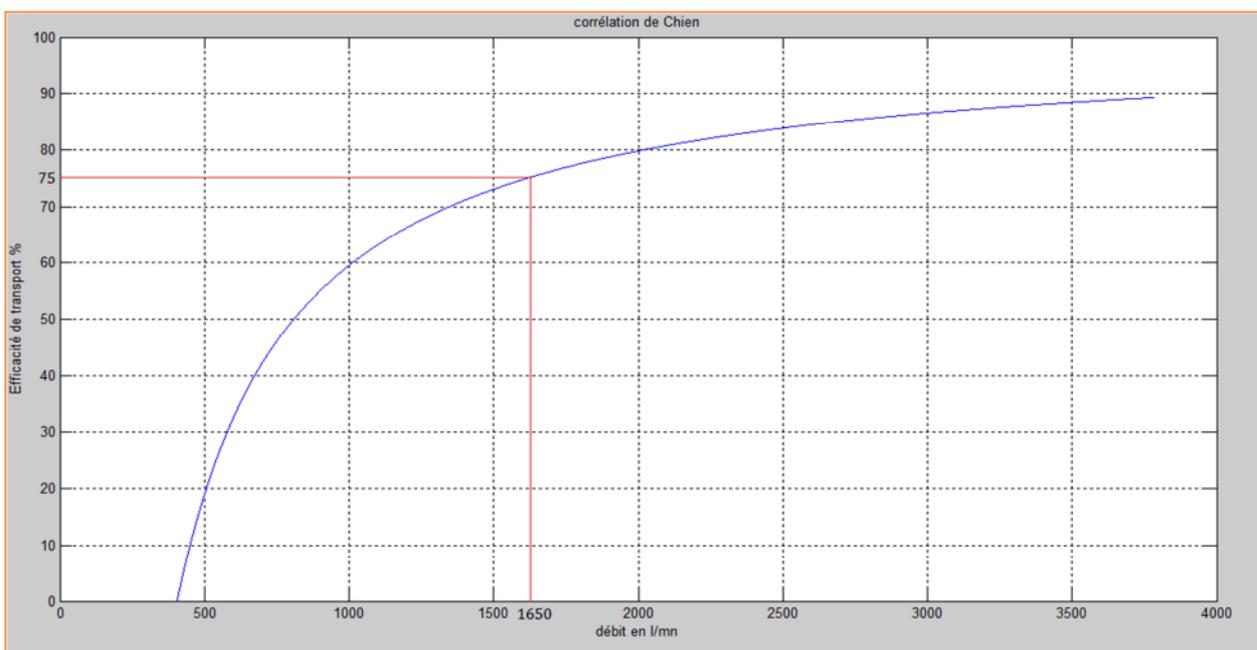
- Le tableau montre l'augmentation de la vitesse annulaire qui est proportionnelle à l'augmentation du débit de circulation ;

- Les graphes 1et 2 représentent respectivement la variation de ET et la concentration des cuttings en fonction du débit (L/m) ;
- on remarque que l’augmentation du débit (vitesse annulaire) accroît considérablement l’efficacité de transport des débris et décroît la concentration des cuttings dans l’annulaire (plus que la concentration des déblais est réduite plus que le rapport de nettoyage est bon) ;
- on peut remarquer aussi que l’augmentation du rapport de nettoyage ET est lente jusqu’il atteint un pourcentage de 88,3% (pour un débit égal à 3500 L/min) qui correspond à un très bon nettoyage ;
- la concentration des cuttings dans l’annulaire augmente pour les faibles débits (elle tend vers l’infini lorsque ET tend vers zéro vu que la concentration des débris est indirectement proportionnelle a ET) puis elle diminue rapidement jusqu'elle atteint une valeur proche de 0% pour les grands débits ;
- la vitesse d’avancement (ROP) influe considérablement sur le pourcentage des cuttings Sur chantier, elle était d’environ 1,9m/h donc on ne risque pas d’avoir un volume de déblais important dans l’espace annulaire (la vitesse annulaire est supérieure à la vitesse de sédimentation des cuttings) ;
- Selon la corrélation de Moore, pour avoir un rapport de nettoyage ET supérieur à 75% il nous faut un débit optimal $Q_{opt} > 1800$ L/min ;

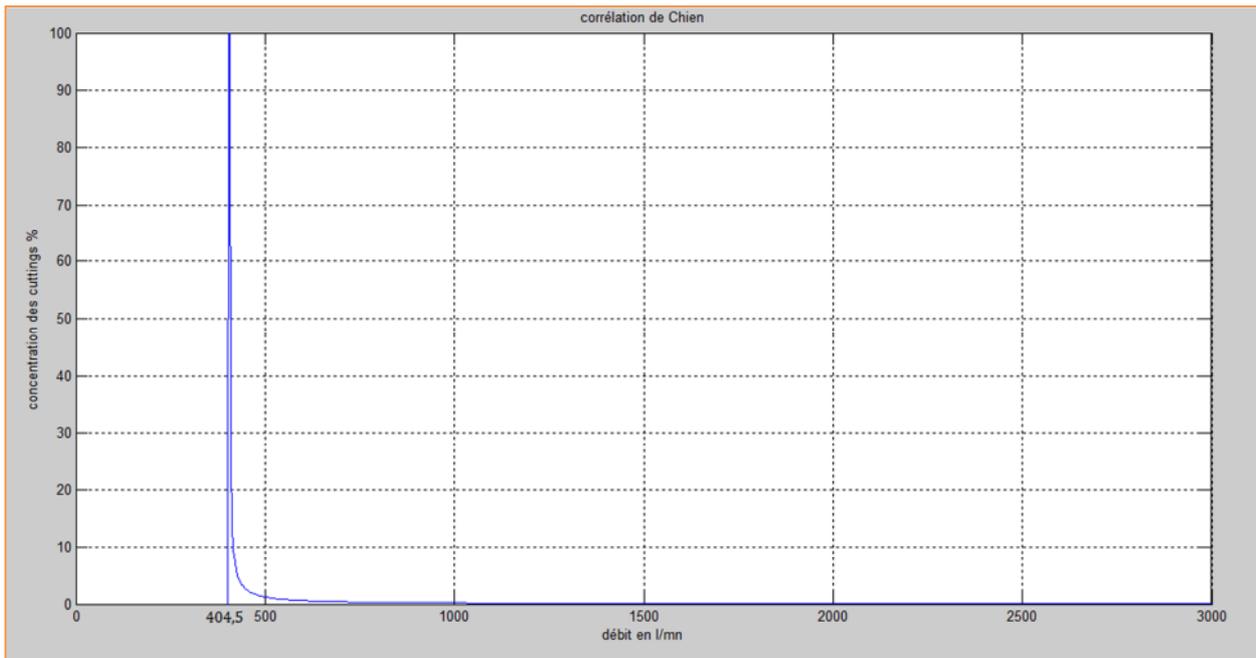
5.1.2. Corrélation de Chien

Q (L/m)	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Va (ft/mn)	38,529	77,059	154,117	231,176	308,234	385,292	462,351
Vs chien (ft/mn)	55,3712	55,3712	55,3712	55,3712	55,3712	55,3712	55,3712
ET chien(%)	-61,674	19,167	59,581	73,054	79,790	83,832	86,524
Ca chien(%)	-0,755	1,216	0,192	0,106	0,073	0,056	0,0449

Tableau 9 : Variation de Va et Vs en fonction du débit « corrélation de Chien »



Graph 03 : Efficacité de transport en fonction de Débit« corrélation de Chien »



Graph 04 : Concentration des déblais en fonction de Débit

Interprétation

- Le tableau montre l'augmentation de la vitesse annulaire qui est proportionnelle à l'augmentation du débit de circulation ;
- Les graphes 1et 2 représentent respectivement la variation de ET et la concentration des cuttings en fonction du débit (L/m) ;
- a partir de $Q=404,5$ L/min on remarque l'augmentation du débit (vitesse annulaire) accroît considérablement l'efficacité de transport des débris et décroît la concentration des cuttings dans l'annulaire (plus que la concentration des déblais est réduite plus que le rapport de nettoyage est bon) par contre si on utilise un débit inférieur à 404 L/min on aura un problème de nettoyage (nettoyage insuffisant et le rapport de nettoyage ET est négatif) a cause de la vitesse de sédimentation qui est supérieure a la vitesse d'annulaire ;
- on peut remarquer aussi que le rapport de nettoyage ET augmentation lentement jusqu'il atteint un pourcentage de 88,5% (pour un débit égal à 3500l/min) qui correspond à un très bon nettoyage ;
- la concentration des cuttings dans l'annulaire augmente pour les faibles débits (Ca Chien tend vers l'infini lorsque ET tend vers zéro vu que la concentration des débris Ca est indirectement proportionnelle a ET) puis elle diminue rapidement jusqu'elle atteint une valeur proche de 0% ;
- D'après la corrélation de Chien, à partir de $Q=1650$ L/min l'efficacité de transport des déblais est supérieur à 75%, donc il nous faut un débit optimal $Q_{opt}>1650$ L/min ;

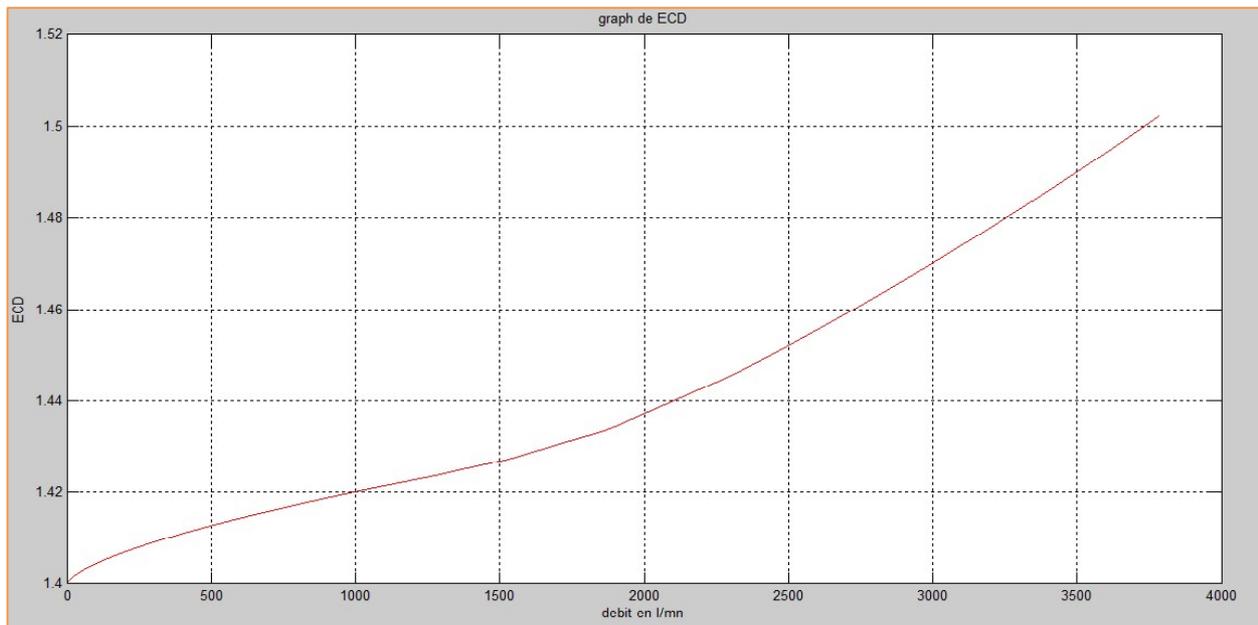
Conclusion

Pour les fluides de forage à base d'huile (modèle d'Ostwald), il est préférable d'utiliser la corrélation de Chien que celle de Moore. Elle assure un bon nettoyage avec un faible débit ($Q_{opt}>1650$ L/min) contrairement à celle de Moore.

5.2. La variation de l’ECD en fonction du débit

Q (L/m)	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
ECD	1,412	1,419	1,430	1,440	1,459	1,486	1,515

Tableau 10 : Variation de l’ECD en fonction du débit



Graph 05 : Variation de l’ECD en fonction de Débit

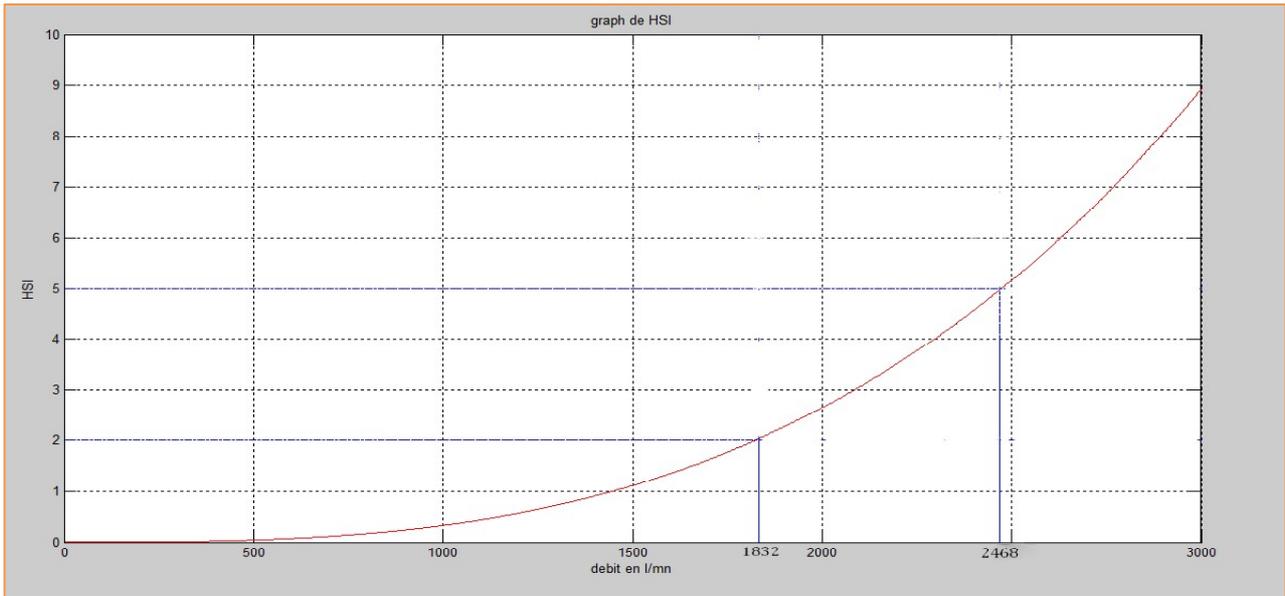
Interprétation

- Le graphe représente la variation de la densité équivalente en fonction du débit, tel que l’augmentation de ce dernier entraîne une augmentation de l’ECD donc il faudra toujours veiller à ce que sa valeur n’atteint pas une valeur limite qui dépend de la pression de fracturation ;
- Dans notre cas, quel que soit l’augmentation du débit l’ECD n’atteint pas la densité de fracturation ($d_{fracturation} = 2,01$) à cause de la roche silurien qui est compact et très dure ;

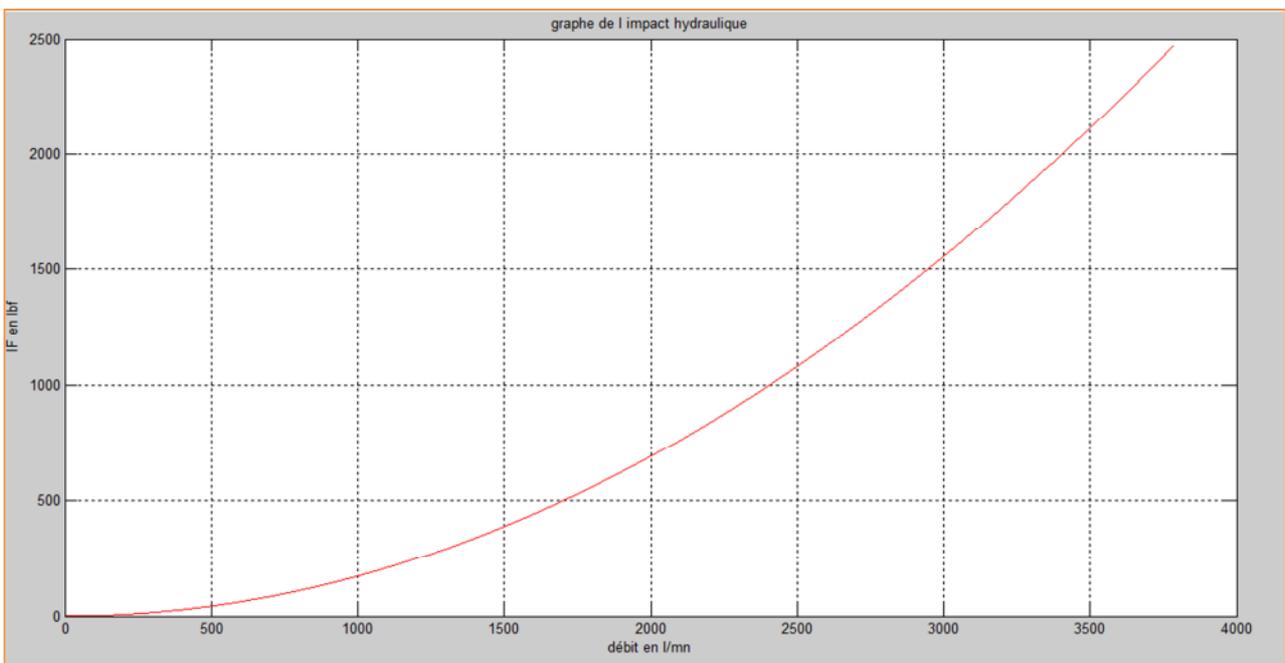
5.3. La Puissance et l’impact hydraulique au niveau de l’outil

Q (L/m)	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
HSI (HP/in²)	0,005	0,041	0,330	1,114	2,642	5,160	8,916
IF (lbf)	10,81	43,18	172,72	388,61	690,80	1079,41	1554,32

Tableau 11 : Variation de la puissance et l’impact hydraulique en fonction du débit



Graphe 06 : Variation de HSI en fonction de Débit



Graphe 07 : Variation de l'impact hydraulique IF en fonction de Débit

Interprétation

- Le graphe montre que l'augmentation du débit accroît la puissance hydraulique au front de taille ;
- Pour un débit inférieur à 1832 l/min le nettoyage est insuffisant ;
- Pour un débit supérieur à 2468 l/min on risque l'érosion des terrains et l'usure d'outil ;
- Le débit optimal est entre $1832 < Q_{opt} < 2468 \text{ L/min}$;
- L'augmentation du débit entraîne une augmentation de l'impact hydraulique IF ;

6. Résultats obtenus par le logiciel MUDWERE

Soit :

CCI : (cuttings carrying index) : est un indice qui a été développé de manière empirique pour fournir une méthode rapide pour déterminer si un trou vertical (<35 degrés) a été nettoyé suffisamment pour éviter les problèmes. L'indice devrait être égal ou supérieur à 1,0 pour éviter les ennuis.

Va : La vitesse annulaire du fluide

Pa : Les pertes de charge

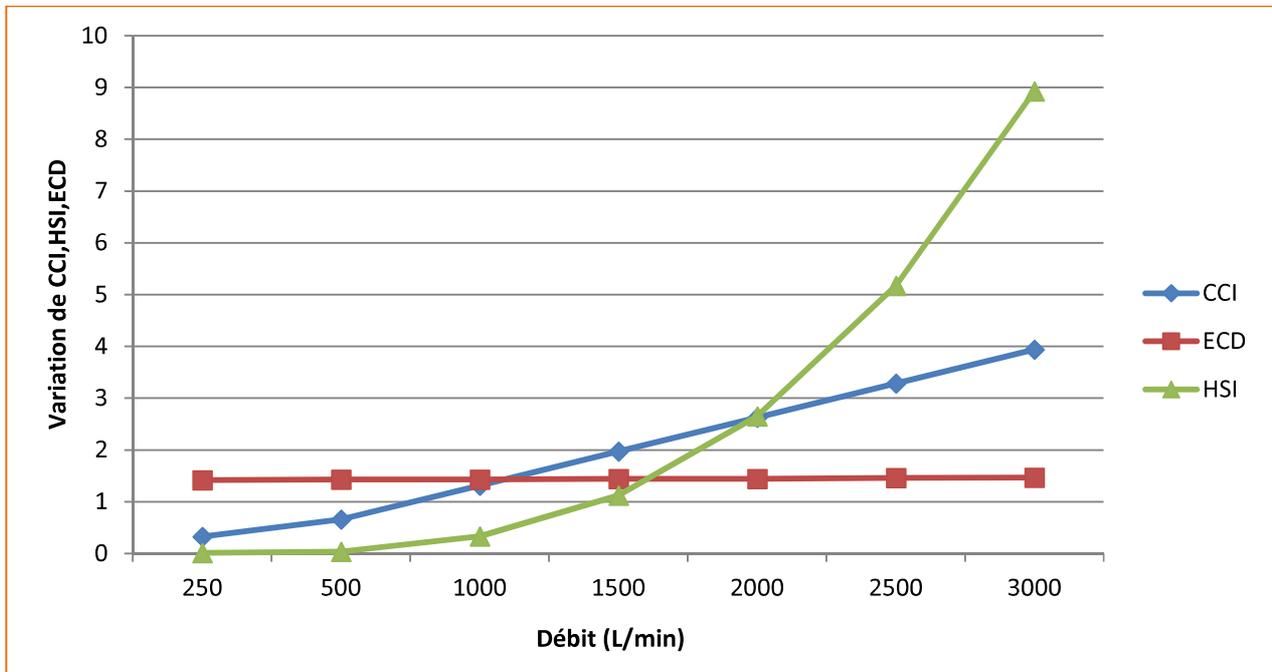
ECD : La densité équivalente

HSI : La puissance hydraulique/diamètre de puits

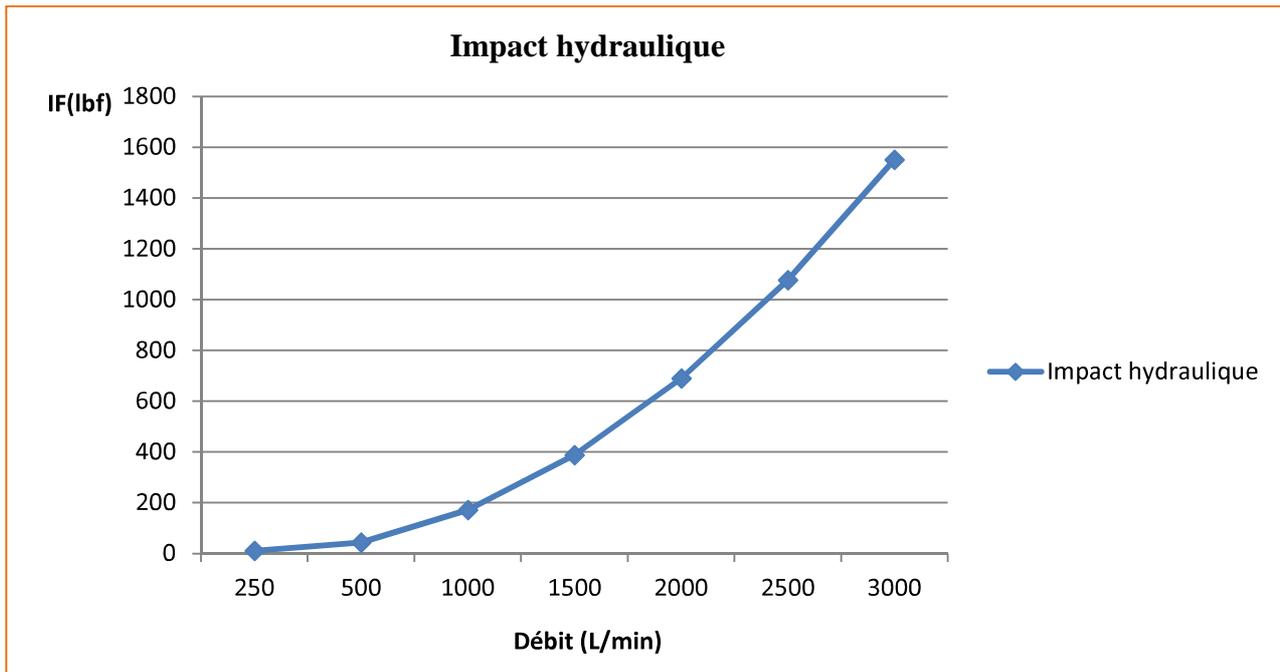
IF : L'impact hydraulique

Q (L/mn)	250	500	1000	1500	2000	2500	3000
Va (ft/mn)	38,5	77,1	154,2	231,3	308,4	385,4	462,5
CCI	0,328	0,657	1,314	1,971	2,628	3,285	3,942
Pa (psi)	167,6	188,8	224,5	256,1	302,3	385,1	504,8
ECD (sg)	1,42	1,43	1,43	1,44	1,44	1,46	1,47
HSI(HP/in ²)	0,01	0,04	0,33	1,12	2,65	5,17	8,93
IF (lbf)	11	43	172	388	690	1077	1551

Tableau 12 : Variation des paramètres Va, ECD, HSI, CCI et Pa en fonction du débit



Graph 08 : Variation de CCI, ECD, HSI en fonction du débit



Graph09 : Variation de l'impact hydraulique en fonction du débit

Interprétation

- Le tableau 12 montre que l'augmentation de la vitesse annulaire est proportionnelle à l'augmentation du débit de circulation ;
- On observe qu'avec l'augmentation du débit, il y a une augmentation du CCI ;
- Pour un débit de 761 L/min, le fluide de forage montre un nettoyage de puits (pour un CCI=1, $Q=761\text{L/min}$) ;
- La vitesse annulaire de 115 ft/min est suffisante pour le transport des déblais ;
- Lors des augmentations du débit, les pertes de charge augmentent ;
- Le paramètre ECD montre une faible augmentation d'une façon qu'il ne dépasse pas la densité de fracturation ($d_{\text{fracturation}}=2,01$) quel que soit le débit de circulation ;
- Pour avoir une puissance hydraulique HSI entre 2 et 5 (HP/in^2), il faut un débit entre 1821,83 et 2472,6 L/min ($1831,83 < Q_{\text{opt}} < 2472,6 \text{ L/min}$) ;
- L'augmentation du débit entraîne une augmentation de l'impact hydraulique IF ;

Récapitulatif des résultats :

- La comparaison des résultats calculés par le programme Matlab élaboré avec ceux calculés par le logiciel Mudware nous montre une légère erreur sur les paramètres hydrauliques ;
- Le débit optimal obtenu par le programme Matlab est compris entre 1832 et 2468 L/min ;
- Le débit optimal calculé par le logiciel Mudware est compris entre 1831,83 et 2472,6 L/min ;
- Le débit utilisé sur le chantier est $Q=1800\text{L/min}$ Sachant qu'ils ont utilisé des bouchons de nettoyage (sweeps) ;

7. Etude économique

Le volume total de boue utilisé est 460 m³ (les prix sont pris de la référence [32])

PRODUIT	Unité	Prix unitaire \$/T	concentration kg/m ³	Quantité m ³ ou T	Prix total \$
OBM 90/10 d=1.20 sg weighted with CaCo3	m ³	420.000		40.000	16 800.000
Diesel	m ³	212.313	0.686	164.640	34 955.130
EMEC MUL NT	T	7 000.000	2.860	0.723	5 057.684
EMEC CON NT	T	6 000.000	5.720	0.953	5 720.000
FLR 170	T	8 500.000	21.45	5.148	43 758.000
EMECTHIN	T	2 800.000		0.300	840.000
EMEC VIS NT	T	6 500.000	18.60	4.464	29 016.000
EMECWETNT	T	6 100.000	2.86	0.798	4 868.651
LIME	T	257.984	25.75	6.180	1 594.343
SALT	T	81.469	25.74	6.178	503.281
Calcium carbonate	T	149.310	480.48	30.000	4 479.300
EMEC CARB F/C/M	T	230.000		4.000	920.000
DYNA RED M LCM	T	3 400.000		1.000	3 400.000
DYNA RED F LCM	T	3 400.000		1.000	3 400.000
Prix total de la boue					155 312.39
Barite ajoutée /3m ³ (High dense 2.10sg)	T	244.9		4.500	1 102.050
EMEC VIS NT ajouté/3m ³ (High vis)	T	6 500.000		0.0750	487.500
Prix total avec les bouchons					156 901.94

Tableau 13 : Coût de la boue de forage

Durant ce mémoire on a pu optimiser le débit de circulation d’une façon qu’il soit compris entre 1832 et 2468 l/min sans utiliser les bouchons de nettoyage qui coûte cher à l’industrie pétrolière.

Ce travail nous a permis de ne plus utiliser les bouchons de nettoyage extrêmement coûteux.

Le débit choisi est relativement élevé par rapport à celui utilisé sur site (la différence est 32l/min et plus qu’on augmente le débit plus que la consommation d’énergie et le cout augmente aussi), mais la différence du cout reste quand même inférieur à celui occulté à l’utilisation des bouchons de nettoyage.

L'envoi des bouchons s'effectue après chaque forage de 15m, sachant que la longueur de la phase 8^{1/2} est de 1550m, donc cette dernière demande 100 bouchons de densité élevée, viscosité élevée (High density, High viscosity) afin d'améliorer le nettoyage.

En outre, le prix de ces bouchons est 1589.550 \$ (d'après les résultats du tableau 13), en le multipliant par 100, on trouve un prix de 158 900.550 \$ [32].

Conclusion Générale

Dans ce mémoire nous avons présenté des généralités sur le nettoyage des puits qui jouent un rôle primordiale dans le bon déroulement des opérations de forage, la prise en charge par une optimisation minimise et évite plusieurs problèmes tel que le coincement, l'augmentation des torques ainsi que la mauvaise cimentation, qui coûtent cher à l'industrie pétrolière (milliards de dollars par an).

Au cours de ce travail, nous avons pu étudié l'optimisation du débit pour assurer un bon nettoyage du puits BKNEP-1 en se basant sur les modèles de Chien et de Moore qui restent un moyen d'approche qui ne reflète plus au moins la réalité des puits forés. En outre, la méthode classique (expérimentale) qui consiste à faire un bilan massique des solides qui sont évacués hors des puits, reste le moyen le plus fiable pour un calcul probable de l'efficacité de transport des débris hors du puits. L'établissement des corrélations via les deux méthodes permet d'atteindre l'objectif d'une manière optimale basée sur un bon modèle mathématique validé par des données expérimentales.

En effet, nos calculs ont montré que le débit optimal est compris entre 1832 et 2468 l/min , il est primordial de pomper des bouchons visqueux à intervalle régulier (Low viscosity, High density, High viscosity).

Recommandation

D'après notre petite étude et afin de bien réussir le nettoyage des puits nous recommandons ce qui suit :

- ✚ Utiliser un débit (vitesse annulaire) aussi grand que possible de façon à assurer une meilleure évacuation des déblais sans dépasser la limite au-dessus de laquelle on risque de fracturer la formation, l'érosion des terrains et les équipements de forage (outils, garniture) ;
- ✚ Opter une rhéologie adéquate au fluide de forage pour assurer le transport et la bonne suspension des débris lors des manœuvres (augmenter le rapport YP/PV et la LSYP low shear yield point) ;
- ✚ Surveiller la vitesse d'avancement ROP afin d'éviter la grande quantité des débris dans l'annulaire ;
- ✚ Minimiser le forage en mode sliding ;
- ✚ Faire un back reaming (remonter la garniture de forage avec rotation) après forage d'une dizaine de mètre afin d'améliorer la géométrie du trou ;
- ✚ Faire une géométrie annulaire concentrique (minimiser l'excentricité et l'inclinaison) ;
- ✚ Faire de wiper trips après le forage pour détruire les lits de débris et agiter les déblais
- ✚ Faire des rotations et réciprocactions afin de perturber le lit de cuttings ramenant ainsi ces derniers dans le courant de la boue de forage ;
- ✚ Assurer que les puits soient propres avant les manœuvres (vérifier au tamis vibrant) ;
- ✚ Assurer le bon fonctionnement des équipements de circulation et de contrôle des solides ;
- ✚ Pomper des bouchons visqueux à intervalle régulier (Low viscosity, High density, High viscosity) afin de créer la turbulence, augmenter la capacité de transport et de suspension des cuttings dans la boue de forage ;
- ✚ Faire une étude de granulométrie (taille, forme) des déblais récoltés en surface pour voir l'efficacité de transport de ces derniers lors de l'application des données de forages ;

- [1] Tomren, P. H., Iyoho, A. W., and Azar, J. J. (1986). Experimental study of cuttings transport in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1(01), 43-56.
- [2] Piroozian, A., Ismail, I., Yaacob, Z., Babakhani, P., and Ismail, A. S. I. (2012). Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2(3), 149-156.
- [3] Yu, M., Melcher, D., Takach, N., Miska, S. Z., and Ahmed, R. (2004, January). A new approach to improve cuttings transport in horizontal and inclined wells. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [4] Ford, J. T., Peden, J. M., Oyenevin, M. B., Gao, E., and Zarrouh, R. (1990, January). Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [5] Hareland, G., Azar, J. J., and Rampersad, P. R. (1993, January). Comparison of cuttings transport in directional drilling using low-toxicity invert emulsion mineral-oil-based and water-based muds. In *Low Permeability Reservoirs Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- [6] Okrajni, S., and Azar, J. J. (1986). The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1(04), 297-308.
- [7] Sifferman, T. R., and Becker, T. E. (1992). Hole cleaning in full-scale inclined wellbores. *SPE Drilling Engineering*, 7(02), 115-120.
- [8] Hussaini, S. M., and Azar, J. J. (1983). Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(01), 11-20.
- [9] Sifferman, T. R., Myers, G. M., Haden, E. L., and Wahl, H. A. (1974). Drill cutting transport in full scale vertical annuli. *Journal of Petroleum Technology*, 26(11), 1-295.
- [10] Gavignet, A. A., and Sobey, I. J. (1989). Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 41(09), 916-921.
- [11] Ford, J. T., Peden, J. M., Oyenevin, M. B., Gao, E., and Zarrouh, R. (1990, January). Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [12] Clark, R. K., and Bickham, K. L. (1994, January). A mechanistic model for cuttings transport. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [13] Duan, M., Miska, S. Z., Yu, M., Takach, N. E., Ahmed, R. M., and Zettner, C. M. (2009). Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells. *SPE Drilling & Completion*, 24(02), 229-238.
- [14] Zeidler, U. H. (1972). An experimental analysis of the transport of drilled particles. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 12(01), 39-48.

- [15] Nguyen, D., and Rahman, S. S. (1996, January). A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells. In SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology. Society of Petroleum Engineers.
- [16] Mitchell, R. F., and Miska, S. Z. (2011). Fundamentals of drilling engineering.
- [17] Bourgoyne Jr, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., and Young Jr, F. S. (1986). Applied Drilling Engineering Chapter 8 Solutions.
- [18] Nguyen, J. P. (1993). Forage (Le). Editions OPHRYS.
- [19] ASME Shale Shaker Committee. (2011). Drilling fluids processing handbook. Elsevier.
- [20] MI- Engineering Manual
- [21] Gucuyener, I. H. (1983, January). A rheological model for drilling fluids and cement slurries. In Middle East Oil Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [22] ENSPM -Formation Industrie "les fluides de forage». (2006)- IFP Training, France.
- [23] Manuel Technique des Fluides de Forage Tome1. (1990).Milpark.
- [24] Manuel Technique des Fluides de Forage Tome2. (1990).Milpark.
- [25] Sample, K. J., and Bourgoyne, A. T. (1977, January). An Experimental Evaluation of Correlations Used for Predicting Cutting Slip Velocity. In SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [26] Moore, P. L. (1974). Drilling practices manual.
- [27] Inteq, B. H. (1995). Drilling engineering workbook. Baker Hughes INTEQ, Houston, TX, 77073.
- [28] Fluid Facts: Engineering Handbook.'1998. Baker Hughes INTEQ.
- [29] API Recommended Practice 13D "Rheology and hydraulics of oil". (2009). Well drilling fluids API
- [30] IADC Drilling Manual. (2000). International Association of Drilling Contractors.
- [31] www.slb.com
- [32] Documents fourni par le Superviseur (programme de puits).

ANNEXE 1 : Equation qui régissent dans un écoulement annulaire concentrique

Dans un espace annulaire concentrique, l'écoulement laminaire d'un fluide non newtonien est décrit par des équations de Navier-Stokes (le comportement dynamique de fluide), des équations d'énergie (comportement thermique (chaleur)) et des équations de transfert de masse (la diffusion massique).

1. Equation de conservation de la masse (équation de continuité) :

Dans le cadre de la physique classique, le principe de conservation de la masse stipule qu'il n'y a ni destruction ni création de la masse. On note que dans ce cadre les deux concepts : masse et énergie ne sont pas encore unifiées. C'est la célèbre relation d'Einstein ($E=mc^2$) qui les a unifiés dans le cadre de la théorie de la relativité (restreinte ou générale).

D'autre part, au niveau d'un milieu fluide (ou continu en général), L'hypothèse de continuité vérifiée dans ce milieu impliquent que les particules fluides qui forment à l'instant initial un ensemble continu forment encore à tout instant un ensemble continu. Il en résulte que les particules qui se trouvent à l'instant initial dans une surface matérielle fermée continuent à être piégées dans la surface transformée à tout instant. Ou

On note par surface matérielle une surface constituée par les mêmes particules matérielles au cours du temps. On déduit alors que la masse contenue dans une surface matérielle fermée reste constante au cours du temps.

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{Ou} \quad m = \int_v \rho dV \quad \text{donc} \quad \frac{d}{dt} \int_v \rho dV = 0 \quad \text{eq. A. 1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho * \mathbf{u}) = 0 \quad \text{Ce qui implique que} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} * \nabla \rho + \rho * \nabla \mathbf{u} = 0 \quad \text{donc :}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho * (\nabla \mathbf{u}) = 0 \quad \text{eq. A. 2}$$

Avec

ρ : la masse volumique (Kg/m^3).

\mathbf{u} (u,v,w) : la vitesse suivant les directions (m/s).

Dans le cas d'un fluide incompressible $\frac{d\rho}{dt} = 0$ car $\rho = \text{constante}$

L'équation de continuité devient $\nabla \mathbf{u} = 0$ c'est-à-dire $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

2. Equation de conservation de quantité de mouvement (équation de mouvement)

Avant d'établir les équations de bilans de quantité de mouvement pour un fluide, il est nécessaire de décrire les différents types de forces qui peuvent agir sur ces milieux. Nous connaissons en physique qu'il existe dans la nature quatre types de forces : les interactions gravitationnelles, les interactions électromagnétiques, les interactions faibles et les interactions fortes, et que l'un des défis majeurs des physiciens consiste à l'unification de ces quatre forces.

Cependant, pour la mécanique des milieux continus, et en raison du spectre des échelles caractéristiques d'observation de la matière considérées, une autre classification des forces agissant sur ces milieux est adoptée. Les forces sont classées selon leur portée en deux catégories.

La force de gravité, qui s'exerce sur des distances extrêmement grandes par rapport aux dimensions moléculaires, agit en tout point du milieu continu et, de ce fait, la force de gravité agissant sur un élément de volume est proportionnelle à son volume. Cette force est dite en mécanique des milieux continus force à distance ou force de volume.

Les interactions intermoléculaires qui assurent la cohésion de la matière, bien qu'elles soient d'origine électromagnétique, ont une portée à peine plus grande que les dimensions moléculaires et par conséquent pour un élément de volume ces interactions ne vont concerner qu'une mince couche externe de matière qui l'enveloppe. La force globale exercée par ces interactions à courte portée est proportionnelle à l'aire de la surface délimitant cet élément de volume indépendamment de son volume. Elle est appelée en mécanique des milieux continus force de contact ou force de surface.

Les interactions faibles et fortes, qui agissent sur des distances extrêmement faibles par rapport aux dimensions moléculaires (échelle de longueur nucléaire), restent invisibles à l'échelle d'observation de la mécanique des milieux continus.

On applique la loi de Newton à un élément de fluide

$$\sum \mathbf{F}_{ext} = m\vec{a} = \frac{d}{dt}(m\vec{u}) \quad \text{eq. A.3}$$

\vec{u} étant la vitesse et \vec{a} étant l'accélération

Les forces qui peuvent agir sur cet élément de fluide sont :

- Force de volume : forces gravitationnelles, forces électromagnétiques ;
- Force de surface : forces de pression ou force de viscosité ;

La loi de Newton nous permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho \vec{u} dV = \int_s \mathbf{P} ds + \int_v \rho \vec{f} dV \quad \text{eq. A.4}$$

Avec

$\frac{d}{dt} \int_v \rho \vec{u} dV$: Quantité de mouvement de la masse du fluide dans le volume

$\int_s \mathbf{P} ds$: Force agissant sur toute la surface (P : résultante des forces par unité de surface)

$\int_v \rho \vec{f} dV$: Force agissant sur toute la masse (\vec{f} : résultante des forces de volume par unité de masse)

D'où

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho u_j dV = \int_s \sigma_{ij} n_i dS + \int_v \rho f_j dV \quad \text{eq. A.5}$$

On aura

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad \text{eq. A.6}$$

En général il y a 9 composantes de contraintes :

- Les composantes tangentielles de la contrainte visqueuse sont proportionnelles aux vitesses de déformation :

$$\begin{aligned}\sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \sigma_{xz} &= \sigma_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \sigma_{yz} &= \sigma_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad \text{eq. A. 7}$$

- les composantes normales des contraintes visqueuses sont définies par :

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} + P &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \sigma_{yy} + P &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \sigma_{zz} + P &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)\end{aligned}\quad \text{eq. A. 8}$$

Avec μ : viscosité dynamique (pa.s)

On substitue les expressions des contraintes visqueuses eq.A.8 dans l'équation de mouvement :

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \vec{f} - \operatorname{div} P + \mu \Delta \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{u}) \quad \text{eq. A. 9}$$

Avec

$\rho \frac{du}{dt}$: Force d'inertie.

$\rho \vec{f}$: Force de volume.

$\operatorname{div} P$: Force de pression.

$\mu \Delta \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{u})$: Force de viscosité.

Dans le cas d'un fluide incompressible ($\rho = \text{constante}$ donc $\operatorname{div} \vec{u} = 0$) l'équation de mouvement eq.A.9 prendra la forme :

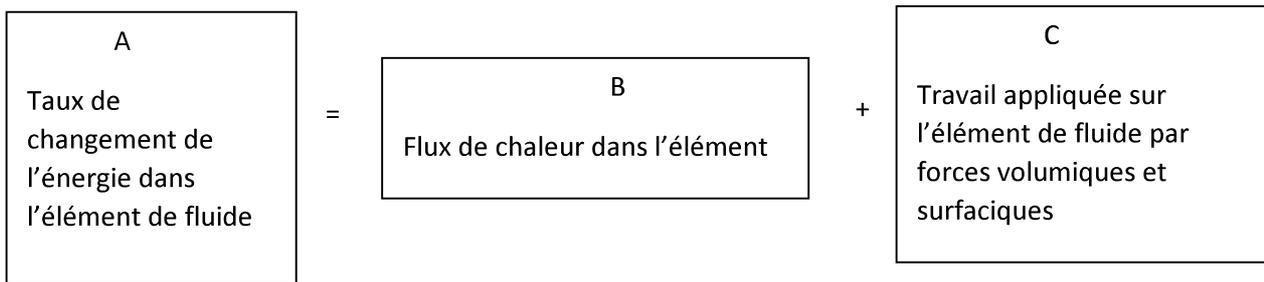
$$\begin{aligned}\text{ox)} \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \text{oy)} \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \text{oz)} \quad \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad \text{eq. A. 10}$$

3. Equation de conservation d'énergie :

Un milieu fluide est susceptible d'échanger de l'énergie au cours de son écoulement avec un milieu extérieur .Cette grandeur extensive se manifeste à l'échelle macroscopique sous plusieurs forme telles que : la chaleur, le travail mécanique (de forces), l'énergie cinétique ou l'énergie électrique.

Selon le premier principe de la thermodynamique qui est un principe de conservation, l'énergie totale d'un système fluide est conservée au cours de sa transformation mais elle change de forme

On appliquant le 1^{er} principe de la thermodynamique on obtient :



➤ Taux de changement de l'énergie dans l'élément de fluide :

$$A = \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{v^2}{2} \right) dx. dy. dz \quad \text{eq. A. 11}$$

➤ Flux de chaleur dans l'élément :

$$B = \left(\rho q - \left(\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} \right) \right) dx. dy. dz \quad \text{eq. A. 12}$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{eq. A. 13}$$

Substituant l'équation eq.A.13 dans eq.A.12 :

$$B = \left(\rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) dx. dy. dz \quad \text{eq. A. 14}$$

➤ Travail appliquée sur l'élément de fluide par forces volumétriques et surfaciques :

$$\begin{aligned}
C = & \left[-\frac{\partial}{\partial x}(uP) - \frac{\partial}{\partial y}(vP) - \frac{\partial}{\partial z}(wP) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{zx}) \right. \\
& + \frac{\partial}{\partial x}(v\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(v\tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial x}(w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(w\tau_{yz}) \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial z}(w\tau_{zz}) \right] dx \cdot dy \cdot dz \\
& + \rho F v \cdot dx \cdot dy \cdot dz
\end{aligned} \tag{eq. A.15}$$

Après quelques arrangements l'équation de l'énergie peut être écrite comme :

$$\begin{aligned}
\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{v^2}{2} \right) = & \left(\rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left[-\frac{\partial}{\partial x}(uP) - \right. \\
\frac{\partial}{\partial y}(vP) - \frac{\partial}{\partial z}(wP) + \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial x}(v\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\tau_{yy}) + \\
\left. \frac{\partial}{\partial z}(v\tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial x}(w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(w\tau_{zz}) \right] + \rho F u
\end{aligned} \tag{eq. A.16}$$

L'équation d'énergie eq.A.16 simplifier s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \tag{eq. A.17}$$

Avec k : coefficient de conductivité thermique (Btu / hr. °F)

4. Equation de transfert de masse :

Dans le cadre la thermodynamique des processus irréversibles il faut introduire un nouvel effet qui est le mélange de plusieurs espèces. Soit c_1 le rapport de la masse d'une des espèces par rapport à l'ensemble des espèces $c_1 = \rho_1 / \sum \rho_i$.

Bien entendu la somme de toutes les concentrations vaut un : $\sum c_i = 1$. S'il n'y a aucun effet de mélange (c_i distingue certains éléments fluides qui sont en fait strictement identiques aux autres), on a simplement :

$$\frac{\partial \rho c_1}{\partial t} + \nabla(\rho c_1 u) = 0 \tag{eq. A.18}$$

C'est à dire que le transfert est passif. Si maintenant on admet qu'il y a un effet de mélange (les particules ne suivent plus les lignes de courant), il faut ajouter un nouveau terme de flux j_1 (de diffusion) à l'équation de conservation ainsi qu'un terme de création volumique (par exemple par réaction chimique, ou désintégration radioactive...) :

$$\frac{\partial \rho c_1}{\partial t} + \nabla(\rho c_1 u + j_1) = w_1 \tag{eq. A.19}$$

Cette équation est la nouvelle équation de conservation. On aura de même une telle équation de conservation pour chaque constituant du mélange.

Remarque

Cette relation peut se retrouver en faisant un bilan de masse pour chaque constituant c_i animée de la vitesse u_i :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i \mathbf{u}_i) = w_i \quad \text{eq. A. 20}$$

En posant par définition de la vitesse barycentrique et par définition des concentrations :

$$\rho \mathbf{u} = \sum_{i=1}^n \rho_i \mathbf{u}_i, c_i = \frac{\rho_i}{\rho} \text{ avec } \sum_{i=1}^n \rho_i = \rho \text{ et } \sum_{i=1}^n c_i = 1$$

L'écart entre la quantité de mouvement de chaque espèce et la vitesse barycentrique permet de construire ce vecteur j_i qui traduit bien l'écart du mouvement du constituant i par rapport à la moyenne :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i \mathbf{u}) + \nabla j_i = w_i \quad \text{eq. A. 21}$$

Définissant j_i comme :

$$j_i = (\rho_i \mathbf{u}_i - \rho_i \mathbf{u}) \quad \text{eq. A. 22}$$

La forme de l'équation de la masse pour le constituant écrite avec la concentration :

$$\frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \nabla(\rho c_i \mathbf{u}) + \nabla j_i = w_i \quad \text{eq. A. 23}$$

Retenons que l'effet prépondérant est la loi de Fick écrite ici pour un mélange binaire :

$$\mathbf{j} = -\rho D \nabla c \quad \text{eq. A. 24}$$

Avec

D : coefficient de diffusion.

On peut en première approximation, si le mélange est très dilué, prendre D constant et ρ constant (le fluide porteur conserve alors toutes ses caractéristiques pures : ρ , μ , k , c_p ... identiques malgré le mélange).

Application immédiate, l'équation d'évolution du constituant considérée est :

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \nabla(\rho c \mathbf{u}) + j_1 = w_1 \quad \text{eq. A. 25}$$

$$\rho \frac{dc}{dt} - \nabla(\rho D \nabla c) = 0 \quad \text{eq. A. 26}$$

Et en multipliant eq.A.26 par $\frac{1}{\rho}$:

$$\frac{dc}{dt} - D \nabla^2 c = 0 \quad \text{eq. A. 27}$$

En développant l'eq.A.27 :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad \text{eq. A. 28}$$

ANNEXE 2 : programme Matlab

Le script suivant représente le programme que nous avons élaboré pour évaluer et optimiser le débit de circulation afin d'assurer un bon nettoyage du puits BKNEP-1 (La phase 8^{1/2}).

```
Clear all %pour effacer les données enregistrées dans l'espace du travail%
clc % pour effacer l'écran%
```

```
disp('le programme Matlab élaboré par le binôme BOUALLAG et BOUDAUD pour optimiser le
débit de circulation afin d'assurer un bon nettoyage du puits BKNEP-1');
```

```
%entrer les données du puits %
ds=input ('entrer la masse volumique du cutting en sg' );
df=input ('entrer la densité du fluide de forage en sg' );
Ds=input ('entrer le diamètre estimer du cutting en inch' );
l600=input ('donner la lecture 600' );
l300=input ('donner la lecture 300' );
l3=input ('donner la lecture 3' );
doh=input ('entrer le diamètre du trou en inch' );
```

```
% dans le forage d'un puits des fois on utilise une garniture mixte (le diamètre et/ou le grade des
tiges est différents) donc on divise notre train de sonde sur 4 sections d'une façon tel que : %
%La 1er section représente l'ensemble des masses tiges qui se trouve dans le découvert.%
%La 2eme section représente l'ensemble des tiges de type 2 qui se trouve dans le découvert.%
%La 3eme section représente l'ensemble des tiges de type 2 qui se trouve dans le casing. %
%La 4eme section représente l'ensemble des tiges de type 1 qui se trouve dans le casing.%
```

```
disp('entrer les diamètres et les longueurs de chaque section pour calculer les perte de charge' );
disp('entrer les diamètres et les longueurs de la 1er section de puits' );
D11=input('entrer le diamètre de puits en inch ' );
D12=input('entrer le diamètre des masses tiges en inch ' );
L1=input('entrer la longueur de la section 1 en m ' );
disp('entrer les diamètres et les longueurs de la 2eme section de puits' );
D21=input('entrer le diamètre de puits en inch ' );
D22=input('entrer le diamètre des tiges type 2 en inch ' );
L2=input('entrer la longueur de la section 2 en m ' );
disp('entrer les diamètre et les longueur de la 3eme section de puits' );
D31=input('entrer le diamètre du casing en inch ' );
D32=input('entrer le diamètre des tiges type 2 en inch ' );
L3=input('entrer la longueur de la section 3 en m ' );
disp('entrer les diamètres et les longueurs de la 4eme section de puits' );
D41=input('entrer le diamètre du casing en inch ' );
D42=input('entrer le diamètre des masses tiges en inch' );
L4=input('entrer la longueur de la section 4 en m ' );
ddp=input ('entrer le diamètre des tiges type 1 en inch ' );
ROP=input('entrer la vitesse davancement en m/hr ' );
TVD=input('entrer la profondeur de forage en m' );
```

```

J=input('entrer le diamètre des duses' );
n1=input ('entrer le nombre de duses' );
% calcul d'indice de comportement rhéologique%
n=3.32*log(1600/1300);
% calcul d'indice de consistance%
K=(5.11*1600)/1020^n;
%calcul de la viscosité plastique%
up=1600/2;
%calcul de la contrainte seuil de cisaillement %
Tc=2*1300-1600;
%calcul de la surface des duses%
TFA=n1*(3.14*((J/32)^2)/4);

%initialisation des vecteurs pour le stockage des données%
X=[0];
Y=[0];
Z=[0];
Caamor=[0];
Caachien=[0];
ECDmat=[0];
IF_som=[0];
HSI_som=[0];

%convertisseur d'unité %
% convertir l'unité de densité « sg » en « ppg »
ds=8.345*ds;
df=8.345*df;
%convertir l'unité «m/hr » en «ft/hr »
ROP=ROP/0.3048;
%convertir l'unité de longueur « m »en « ft »
L1=3.28083*L1;
L2=3.28083*L2;
L3=3.28083*L3;
L4=3.28083*L4;
TVD=3.28083*TVD;

for Q=1:1000
Va=(24.5*Q/(((doh^2)-(ddp^2))));

%La corrélation de Moore %
ua= (((K/144)*(((60*doh-ddp)/Va)^(1-n))*(((2+(1/n))/0.0208)^n)));

%pour un régime laminaire la vitesse de sédimentation et le nombre de Reynolds sont%
Vs_lam1= (((4972*(ds^2)/ua)*(ds-df));
NRe_lam1= ((15.47*ds*Vs_lam1*D_s)/ua);

```

%pour un régime transitoire la vitesse de sédimentation et le nombre de Reynolds sont %

$Vs_trans1 = (((174 * Ds * (ds - df)^{0.667}) / (ds^{0.333} * ua^{0.333})));$

$NRe_trans1 = (((15.47 * ds * Vs_trans1 * Ds) / ua));$

%pour un régime turbulent la vitesse de sédimentation et le nombre de Reynolds sont %

$Vs_turb1 = ((92.4 * \sqrt{Ds * ((ds - df) / df)});$

$NRe_turb1 = (((15.47 * ds * Vs_turb1 * Ds) / ua));$

%choix de la vitesse de sédimentation par rapport au nombre de Reynolds%

if $NRe_lam1 < 1$

$Vs_moor = Vs_lam1;$

elseif $NRe_turb1 > 2000$

$Vs_moor = Vs_turb1;$

else

$Vs_moor = Vs_trans1;$

end

%calcul de l'efficacité de transport%

$f_moor = (1 - Vs_moor / Va) * 100;$

%calcul de la concentration des cutting%

$Caamoor = ((ROP * (doh)^2) / (14.71 * f_moor * Q)) * 100;$

% La corrélation de Chien%

$ua = up + 300 * (Tc * Ds / Va);$

%pour un régime laminaire la vitesse de sédimentation et le nombre de Reynolds sont %

$Vs_lam2 = 0.45 * (ua / df * Ds) * ((\sqrt{(36800 * Ds / (ua / df * Ds)^2 * ((ds - df) / df) + 1}) - 1);$

$NRe_lam2 = ((15.47 * ds * Vs_lam2 * Ds) / ua);$

%pour un régime turbulent la vitesse de sédimentation et le nombre de Reynolds sont %

$Vs_turb2 = 86.4 * \sqrt{Ds * (ds - df) / df};$

$NRe_turb2 = ((15.47 * ds * Vs_turb2 * Ds) / ua);$

%choix de la vitesse sédimentation par rapport au nombre de Reynolds%

if $NRe_lam2 \leq 100$

$Vs_chien = Vs_lam2;$

elseif $NRe_turb1 > 100$

$Vs_chien = Vs_turb2;$

end

%calcul de l'efficacité de transport%

$f_chien = (1 - Vs_chien / Va) * 100;$

%calcul de la concentration des cutting%

$Cachien = ((ROP * (doh)^2) / (14.71 * f_chien * Q)) * 100;$

%calcul des perte de charge dans la 1^{er} Section

$na = 0.5 * \log(1300 / 13);$

```

ka=(5.11*1300)/((511)^na);
Va1=((0.408*Q)/(((D11)^2)-((D12)^2)));
uea1=((100*(ka))*(((144*(Va1))/((D11)-(D12)))^(na-1)));
Rea1=(928*Va1*(D11-D12)*df)/(uea1*((2*na+1)/(3*na))^na);
Rel=3470-1370*na;
Ret=4270-1370*na;
if Rea1<Rel
fa=24/Rea1;
elseif Rea1>Ret
fa=((log10(na)+3.93)/50)/Rea1^((1.75-log10(na))/7);
else
fa=((Rea1-Rel)/800)*(((log10(na)+3.93)/50)/(Ret^((1.75-log10(na))/7)))-(24/Rel)+(24/Rel);
end
Pa1=((fa*(Va1^2)*df)/(25.81*(D11-D12)))*L1;

```

%calcul des pertes de charge dans la 2^{ème} Section%

```

na=0.5*log(1300/13);
ka=(5.11*1300)/((511)^na);
Va2=((0.408*Q)/(((D21)^2)-((D22)^2)));
uea2=((100*(ka))*(((144*(Va2))/((D21)-(D22)))^(na-1)));
Rea2=(928*Va2*(D21-D22)*df)/(uea2*((2*na+1)/(3*na))^na);
Rel=3470-1370*na;
Ret=4270-1370*na;
if Rea2<Rel
fa=24/Rea2;
elseif Rea2>Ret
fa=((log10(na)+3.93)/50)/Rea2^((1.75-log10(na))/7);
else
fa=((Rea2-Rel)/800)*(((log10(na)+3.93)/50)/(Ret^((1.75-log10(na))/7)))-(24/Rel)+(24/Rel);
end
Pa2=((fa*(Va2^2)*df)/(25.81*(D21-D22)))*L2;

```

%calcul des perte de charge dans la 3^{ème} Section%

```

na=0.5*log(1300/13);
ka=(5.11*1300)/((511)^na);
Va3=((0.408*Q)/(((D31)^2)-((D32)^2)));
uea3=((100*(ka))*(((144*(Va3))/((D31)-(D32)))^(na-1)));
Rea3=(928*Va3*(D31-D32)*df)/(uea3*((2*na+1)/(3*na))^na);
Rel=3470-1370*na;
Ret=4270-1370*na;
if Rea3<Rel
fa=24/Rea3;
elseif Rea3>Ret
fa=((log10(na)+3.93)/50)/Rea3^((1.75-log10(na))/7);
else
fa=((Rea3-Rel)/800)*(((log10(na)+3.93)/50)/(Ret^((1.75-log10(na))/7)))-(24/Rel)
+(24/Rel);
end

```

```
Pa3=((fa*(Va3^2)*df)/(25.81*(D31-D32)))*L3;
```

```
% calcul des perte de charge dans la 4eme Section%
```

```
na=0.5*log(1300/13);
```

```
ka=(5.11*1300)/((511)^na);
```

```
Va4=((0.408*Q)/(((D41)^2)-((D42)^2)));
```

```
uea4=((100*(ka))*(((144*(Va4))/((D41)-(D42)))^(na-1)));
```

```
Rea4=(928*Va4*(D41-D42)*df)/(uea4*((2*na+1)/(3*na))^na);
```

```
Rel=3470-1370*na;
```

```
Ret=4270-1370*na;
```

```
if Rea4<Rel
```

```
fa=24/Rea4;
```

```
elseifRea4>Ret
```

```
fa=((log10(na)+3.93)/50)/Rea1^((1.75-log10(na))/7);
```

```
else
```

```
fa=((Rea4-Rel)/800)*(((log10(na)+3.93)/50)/(Ret^((1.75-log10(na))/7)))-(24/Rel)+(24/Rel);
```

```
end
```

```
Pa4=((fa*(Va4^2)*df)/(25.81*(D41-D42)))*L4;
```

```
Pa=Pa1+Pa2+Pa3+Pa4;
```

```
%calcul de l'ECD%
```

```
ECD=(Pa/(0.052*TVD))+df;
```

```
%calcul hydraulique au niveau de l'outil%
```

```
Pb=(((Q^2)*df)/((10858*(TFA)^2)); %perte de charge au niveau de l'outil%
```

```
HHP=((Pb*Q)/1714); % puissance Hydraulique%
```

```
HSI=((HHP*1.27)/(doh^2));
```

```
Vn=((0.32086*Q)/(TFA)); %La vitesse de jet%
```

```
IF=((Vn*Q*df)/(1930)); %La force d'impact%
```

```
IFin=IF*1.27/(doh^2);
```

```
%stockage des données%
```

```
Y(Q)=f_moor; %facteur de transport avec la corrélation de Moore%
```

```
Caamoore(Q)=Camoor; %La concentration des cutting avec la corrélation de Moore
```

```
Z(Q)=f_chien; %facteur de transport avec la corrélation de Chien%
```

```
Caachien(Q)=Cachien; %La concentration des cutting avec la corrélation de Chien
```

```
ECDmat(Q)=ECD/8.345; %ECD%
```

```
HSI_som(Q)=HSI; %bit hydraulic howse power%
```

```
IF_som(Q)=IFin; %La force d'impact de jet%
```

```
X(Q)=3.785*Q; %La conversion et le stockage du débit en l/mn%
```

```
end
```

```
%Affichage des résultats sous forme de graphes%
```

```
subplot(4,2,1),plot(X,Y, 'r'),title('corrélation de Moore'),xlabel('débit en l/mn'), ylabel('efficacité de transport'),axis([0,3000,0,100]),grid
```

```
subplot(4,2,2),plot(X,CaaMoore, 'b'),title('corrélation de Moore'),xlabel('débit en l/mn'),ylabel('concentration des cutting'),axis([0,3000,0,100]),grid
```

```
subplot(4,2,3),plot(X,Z, 'r'),title('corrélation de chien'),xlabel('débit en l/mn'), ylabel('efficacité de
```

```
transport' ),axis([0,3000,0,100]),grid
subplot(4,2,4),plot(X,Caachien, 'b' ),title('corrélation de chien' ),xlabel('débit en l/mn'
),ylabel('concentration des cutting' ),axis([0,3000,0,100]),grid
subplot(4,2,5),plot(X,HSI_som, 'r' ),title('graph de HSI' ),xlabel('débit en l/mn' ), ylabel('HSI' ),grid
subplot(4,2,6),plot(X,ECDmat, 'r' ),title('graph de l ECD' ),xlabel('débit en l/mn' ), ylabel('ECD'
),grid
subplot(4,2,7),plot(X,IF_som, 'r' ),title('graph de l'impact de jet' ),xlabel('débit en l/mn' ),ylabel('IF'
),grid
```

ANNEXE 3 : Le logiciel MUDWARE

Présentation du logiciel

Le logiciel MUDWARE est un Programme d'ingénierie de M-I SWACO conçu pour une grande variété d'applications de forage. C'est une collection de fluide de forage et des programmes d'ingénierie liés au forage et informations techniques fournies gratuitement à l'industrie pétrolière.

Il offre des calculs informatique et des différents paramètres de forage tel que la rheologie et l'hydraulique.

Ce logiciel contient la plupart des calculs généralement utilisés dans le domaine pendant le forage et l'achèvement d'un puits. il permet de donner une valeur exacte du débit optimal à partir des entrées données ainsi que la densité équivalente de circulation et CCI(cutting carrynig index), il est basé sur les recommandation API sur les paramètre hydraulique et rheologique des fluide utilisé pour le forage des puits petrolier [29]



Figure 31 : Logiciel Mudware