

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique



MÉMOIRE

DE FIN D'ÉTUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER ACADEMIQUE EN GENIE MECANIQUE

OPTION : Master énergétique

Thème

SIMULATION NUMERIQUE D'UN ECOULEMENT DE BOUE DE FORAGE DANS UN Puits

Dirigé par :
Mr: HADID Med Rachid

Etudié par :
Mr: HASSENA HAKIM

PROMOTION: 2011/2012

Remerciements

Nombreux sont ceux qui m'ont aidé pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Je tiens en premier lieu à exprimer mes vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Je remercie mes deux encadreurs, Mr. *HADID Med RACHID*, pour m'avoir dirigé tout le long de ce travail et Mr. *HASSENA MOHAMED*, pour m'avoir aidé avec ses conseils précieux durant mon stage pratique. Je les remercie aussi pour leur extrême gentillesse et leurs remarques qui m'ont beaucoup aidé.

Ma reconnaissance et mes remerciements vont également à Mr. *MERAR KARIM* pour avoir veillé sur moi à chaque étape de mon stage pratique, sans oublier Mr. *GHALEB BOUALEM* qui a été présent à chaque étape de mon travail.

Enfin je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études ainsi que tous mes ami(e)s qui m'ont soutenu durant ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Ø Mes parents.
- Ø Ma grand-mère.
- Ø Mes frères.
- Ø Ma tante et tous les membres de sa famille.
- Ø Mes ami(e)s.
- Ø Tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

PARTIE THEORIQUE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE FORAGE.	3
I.1. Introduction à la géologie	4
I.2. Le Forage.	4
I.3. L'appareil de forage (rotary rig).	6
I.4. Architecture d'un puits.	7
I.5. L'outil de forage (Bit).	8
I.6. Le système d'énergie d'un appareil de forage (Power system).	9
I.7. Le système de circulation d'un appareil de forage (Circulating system).	9
I.7.1. But de la circulation.	10
I.7.2. La boue de forage (drilling Mud)	11
I.7.2.1. Les types des fluides de forage	11
I.7.3. Les bacs à boue.	13
I.7.3.1. Fonctions des bacs à boue.	13
I.7.3.2. Types de bacs à boue.	13
I.7.4. Les pompes à boue.	14
I.7.4.1. Présentation.	14
I.7.4.2. Pompe double effet (DUPLEX)	14
I.7.4.3. Pompe simple effet (TRIPLEX)	15
I.7.4.4. Comparaison entre la pompe duplex et la pompe triplex.	16
I.7.5. Pompe centrifuge.	16
I.7.5.1. Présentation d'une pompe centrifuge.	16
I.7.5.2. Rôle des pompes centrifuges.	17
I.7.6. Tamis vibrant (shale shakers)	17
I.7.7. Désableurs (Desanders) et Désilteurs (Desilers)	18
I.7.8. Centrifugeuses.	20
I.7.9. Dégazeurs.	20
I.8. Système de levage (hoisting system)	21
I.8.1. La structure de la tour de forage (derrick) et le mât (mast)	21
I.8.1.1. Derrick.	21
I.8.1.2. Le mât.	22
I.8.2. Le treuil de forage (Drawworks) et ses accessoires.	23
I.8.2.1. Définition.	23
I.8.2.2. Le Système de freinage du treuil	23
I.8.3. Le mouflage	24
I.8.3.1. Moufle fixe (Crown-block)	25
I.8.3.2. Moufle mobile (travelling block)	25
I.8.3.3. Câble de forage.	25
I.8.3.4. Brin mort et point d'ancrage.	25
I.9. Le système de rotation (rotating system)	26
I.9.1. La table de rotation	26
I.9.1.1. Définition et rôle de la table de rotation.	26

I.9.1.2.	Composition de la table de rotation.	27
I.9.1.3.	Le Top Drive.	28
I.9.1.4.	La tige d'entraînement.	28
I.9.1.5.	Le raccord d'usure (Kelly saver sub)	29
I.9.1.6.	La tête d'injection (SWIVEL)	29
I.9.1.7.	La tête d'injection motorisée.	30
I.10.	Conclusion	31
CHAPITRE II : LA RHEOLOGIE ET LES PERTES DE CHARGE.		32
II.1.	La rhéologie.	33
II.2.	Les régimes d'écoulement.	33
II.2.1.	Les régimes permanents.	33
II.2.1.1.	Le régime laminaire (Laminar Flow)	33
II.2.1.2.	Le régime turbulent (Turbulent Flow)	34
II.2.1.3.	L'écoulement en bouchon (Plug flow)	34
II.2.2.	Les régimes transitoires.	34
II.3.	Les caractéristiques rhéologiques.	35
II.4.	Détermination expérimentale des caractéristiques rhéologiques.	37
II.4.1.	Le viscosimètre Marsh	37
II.4.2.	Le viscosimètre Fann	37
II.4.2.1.	Les formules du viscosimètre Fann	38
II.5.	Les équations rhéologiques.	39
II.5.1.	Les fluides newtoniens	40
II.5.2.	Les fluides non newtoniens	40
II.5.2.1.	Les fluides binghamiens	40
II.5.2.2.	Les fluides D'OSTWALD (Modèle en puissance)	43
II.6.	Application aux fluides de forage et aux laitiers de cimentation	45
II.6.1.	Les propriétés des fluides	45
II.6.2.	La géométrie.	46
II.6.3.	La complexité des mouvements.	46
II.7.	Choix du modèle rhéologique	47
II.8.	Détermination du régime d'écoulement	47
II.9.	Calcul des pertes de charge.	48
II.10.	Organigramme de la méthode de calcul des pertes de charge	52
II.11.	Conclusion	53

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III : CALCUL DES PERTES DE CHARGE.		57
III.1.	Calcul des pertes de charge dans le puits REJ-01.	58
III.1.1.	Données générales du puits	58
III.1.2.	Calcul type des pertes de charge pour la phase 12"1/4...	59
III.1.2.1.	Données rhéologiques	59
III.1.2.2.	Détermination des taux de cisaillement ...	59
III.1.2.3.	Détermination des vitesses de cisaillement.	60
III.1.2.4.	Détermination du modèle rhéologique.	60
III.1.2.5.	Détermination des paramètres rhéologiques (n et K).	61
III.1.2.6.	Détermination du régime d'écoulement.	62
III.1.2.7.	Détermination des pertes de charge..	64

III.1.3	Données rhéologiques de la boue.	66
III.1.4.	Détermination des contraintes, des coefficients de corrélation et les paramètres rhéologiques	67
III.1.5	Détermination du régime d'écoulement dans les tiges.	68
III.1.6.	Détermination du régime d'écoulement dans l'espace annulaire.	69
III.1.7.	Calcul des pertes de charge dans les tiges.	69
III.1.8.	Calcul des pertes de charge dans l'espace annulaire.	70
III.1.9.	Calcul des pertes de charge dans les duses de l'outil.	71
III.1.10	Calcul des pertes de charge dans les équipements de surface.	71
III.1.11	Calcul des pertes de charge globales.	72
III.2.	Comparaison entre les pertes de charge et les pressions de pompage enregistrées dans l'appareil ENF #18.	72
III.3.	La puissance requise à la fonction pompage de l'appareil ENF #18.	73
III.3.1.	Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 17.1/2"	73
III.3.2.	Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 12.1/4"	74
III.3.3.	Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 8" 1/2	75
III.4.	Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge	76
III.5.	Conclusion	77
CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE D'UN ECOULEMENT DE FLUIDE DE FORAGE		78
IV.1.	Introduction	79
IV.2.	Définitions et généralités	79
IV.3.	Maillage du domaine	80
IV.3.1.	Types de maillages	80
IV.3.1.1.	Maillage triangulaire	81
IV.3.1.2.	Maillage quadratique	81
IV.3.1.3	Maillage hybride	82
IV.4.	Maillage sous "Gambit"	82
IV.5.	Création de la géométrie et maillage sous "Gambit"	82
IV.6.	Conditions aux limites	85
IV.7.	Procédures et étapes de la simulation sous Fluent	85
IV.7.1.	Démarrer la version 2ddp (double précision) du Fluent	85
IV.7.2.	Lire le fichier du maillage 2D, (Nom.msh)	85
IV.7.3	Vérification du maillage	86
IV.7.4.	Afficher le maillage	86
IV.7.5.	Définition du modèle	87
IV.7.6.	Définition du régime d'écoulement	87
IV.7.7.	Définition du matériau	88
IV.7.8.	Définition numérique des conditions opératoires	88
IV.7.9.	Déclaration des conditions aux limites	89
IV.7.10	Contrôle de la solution	89
IV.7.11	Contrôle de la convergence	90

IV7.12	Initialisation des calculs	90
IV7.13	Sauvegarder le fichier case (Nom.cas).	90
IV7.14	Le calcul itératif.	91
IV7.15	Détermination de la solution	91
IV7.15.1	Test de convergence	91
IV7.15.2	le champ des vitesses	92
IV7.15.3	la courbe de pression.	93
IV7.15.4	la turbulence.	94
IV.8.	Comparaisons entre les pressions de pompage et les résultats de la simulation numérique et les calculs analytiques	95
IV.9.	conclusion	96

Liste des tableaux

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE FORAGE

Tableau I.1:	Empilement des couches géologique dans le bassin de HASSI MESSAOUD.....	5
---------------------	---	---

CHAPITRE II : LA REOLOGIE ET LES PERTES DE CHARGE

Tableau II.1.	La correspondance entre N et $\frac{\rho g}{\mu}$	39
Tableau II.2.	L'expression du nombre de Reynolds et de sa valeur critique.....	48
Tableau II.3.	Les expressions de la viscosité équivalente.....	48
Tableau II.4.	Les équations de pertes de charges pour le modèle de NEWTON	49
Tableau II.5.	Les équations de pertes de charges pour le modèle de BINGHAM.....	50
Tableau II.6.	Les équations de pertes de charges pour le modèle d'OSTWALD...	50
Tableau II.7.	Les équations de pertes de charges dans les équipements de surface.....	51

CHAPITRE III : LE CALCUL DES PERTES DE CHARGE

Tableau III.1.	Les débits, les masses volumiques et les lectures Fann des trois premières phases du puits REJ-01.	67
Tableau III.2.	Le modèle et les paramètres rhéologiques des trois premières phases du puits REJ-01.	67
Tableau III.3.	Le régime d'écoulement dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01.	68
Tableau III.4.	Le régime d'écoulement dans l'espace annulaire pour les trois premières phases du puits REJ-01.	69
Tableau III.5.	Les résultats des pertes de charge dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01.	70
Tableau III.6.	Les résultats des pertes de charge dans l'espace annulaire pour les	71

	trois Premières phases du puits REJ-01..	
Tableau III.7.	Les résultats des pertes de charge dans les duses des outils pour les trois premières phases du puits REJ-01..	71
Tableau III.8.	Les résultats des pertes de charge dans les équipements de surface pour les trois premières phases du puits REJ-01.	71
Tableau III.9.	Les résultats des pertes de charge globales pour les trois premières phases du puits REJ-01..	72
Tableau III.10.	comparaison entre les pertes de charge dans le puits REJ-01 et la pression de pompage..	72
Tableau III.11.	les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 17.1/2"	73
Tableau III.12.	les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 12.1/4"	74
Tableau III.13.	les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 8"1/2.	75
 CHAPITRE IV : SIMULATION NUMERIQUE		
Tableau IV.1.	Comparaisons entre les pressions de pompage et les résultats de la simulation numérique et les calculs analytiques	95

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE FORAGE

Fig.I.1.	Schéma d'un appareil de forage.....	6
Fig.I.2.	Schéma d'un puits en fin de réalisation.....	7
Fig.I.3.	Schéma type d'un assemblage de train de tiges.....	7
Fig.I.4.	Outil Poly Cristal Diamant utilisé dans les phases 17"1/2 et 12"1/4.....	8
Fig.I.5.	Outil tricône à molettes utilisé dans la phase 26".....	8
Fig.I.6.	représentation du circuit de boue de forage.....	10
Fig.I.7.	Accessoire pour la pompe à boue.....	15
Fig.I.8.	Pompe triplex à simple effet.....	15
Fig.I.9.	Constituant d'une pompe centrifuge.....	17
Fig.I.10.	Mixeur en entonnoir couplé à une pompe centrifuge.....	17
Fig.I.11.	Désableur.....	18
Fig.I.12.	Désilteur.....	19
Fig.I.13.	Principe de fonctionnement de l'hydro cyclone.....	19
Fig.I.14.	Principe de fonctionnement de la centrifugeuse.....	20
Fig.I.15.	Dégaseur.....	20
Fig.I.16.	Schéma du système de freinage mécanique.....	24
Fig.I.17.	Moufle fixe.....	25
Fig.I.18.	Moufle mobile.....	25
Fig.I.19.	Le brin mort et le point d'encrage.....	26
Fig.I.20.	La table de rotation.....	27
Fig.I.21.	La Top Drive.....	28

CHAPITRE II : LA RHEOLOGIE ET LES PERTES DE CHARGE

Fig. II.1.	Représentation d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique.....	33
Fig. II.2.	Représentation d'un écoulement turbulent dans une conduite cylindrique..	34
Fig. II.3.	Représentation d'un écoulement en bouchon dans une conduite cylindrique.....	34
Fig. II.4.	Représentation schématisée d'une transition d'écoulement de régime laminaire.....	34
Fig. II.5.	Représentation schématisée des transitions de l'écoulement en bouchon vers le régime turbulent.....	35
Fig. II.6.	Représentation d'un élément de volume d'un fluide en mouvement longitudinal.....	36
Fig. II.7.	Représentation schématisée d'un viscosimètre de Marsh.....	37
Fig. II.8.	Le viscosimètre Fann et le schéma de son principe de fonctionnement.....	37
Fig. II.9.	Le rhéogramme type d'un fluide de NEWTON en coordonnées cartésiennes.....	40
Fig. II.10.	Le rhéogramme type d'un fluide de BINGHAM en coordonnées cartésiennes.....	41

Fig. II.11.	Courbe expérimentale représentative du modèle de BINGHAM.....	41
Fig. II.12.	Représentation graphique de la droite de régression linéaire pour le modèle de BINGHAM.....	42
Fig. II.13.	Le rhéogramme type d'un fluide d'OSTWALD en coordonnées cartésiennes.....	43
Fig. II.14.	Le rhéogramme type d'un fluide d'OSTWALD en coordonnées logarithmiques.....	44
Fig. II.15.	La détermination graphique des indices n et K pour un fluide d'OSTWALD en coordonnées logarithmiques.....	45
Fig. II.16.	Les courbes représentatives des comportements dynamiques des fluides.....	46

CHAPITRE III : CALCUL DES PERTES DE CHARGE

Fig.III.1.	Représentation schématisé du tain de tiges lors de la réalisation de la phase 12"1/4 et schéma du puits après la cimentation de la phase	59
Fig.III.2.	Rhéogramme de la boue de forage assimilée au fluide d'Ostwald pour la phase 12"1/4.	61
Fig.III.3.	Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge dans le puits REJ-01..	76

CHAPITRE IV: SIMULATION NUMERIQUE D'UN ECOULEMENT DE FLUIDE DE FORAGE

Fig.IV.1.	démarche de la résolution d'un problème.	80
Fig.IV.2.	Maillage triangulaire	81
Fig.IV.3.	Maillage Quadratique.....	81
Fig.IV.4.	Maillage hybride.....	82
Fig. IV.5.	Schématization de l'intérieur de train de tige et maillage	84
Fig. IV.6.	Sélection de la précision sous fluent	85
Fig. IV.7.	Lecture du fichier du maillage	85
Fig. IV.8.	Vérification du maillage.....	86
Fig. IV.9.	Affichage de la structure maillée.....	86
Fig. IV.10.	détermination du modèle axisymétrique.	87
Fig. IV.11.	choix du modèle de turbulence.	87
Fig. IV.12.	Définition du fluide dans fluent	88
Fig. IV.13.	les conditions opératoires	88
Fig. IV.14.	Les conditions aux limites	89
Fig. IV.15.	Vérification de la solution.	89
Fig. IV.16.	Définition de la précision de la convergence.	90
Fig. IV.17.	Détermination de nombre d'itération.	91
Fig. IV.18.	Test de convergence.	91
Fig. IV.19.	La vitesse relative a l'interieur des tiges.	92

Fig. IV.20.	le champ des vitesses au premier changement de section..	93
Fig. IV.21.	évolution de la pression totale à l'intérieur des tiges.	94
Fig. IV.22.	l'énergie cinétique de la turbulence.	94

Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Significations</i>	<i>Unités</i>	<i>Dimensions</i>
A	Surface totale des duses de l'outil	cm^2	L^2
D	Diamètre intérieur Garniture	cm	L
D_i	Diamètre intérieur annulaire (extérieur garniture)	cm	L
D_e	Diamètre extérieur annulaire	cm	L
h	La hauteur d'immersion des cylindres du viscosimètre de Fann	cm	L
k	Constante du ressort du viscosimètre de Fann	$dyne \cdot cm / (lbf / 100ft^2)$	L^3
K	Indice de consistance	$barye \cdot s^n$	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{n-2}$
L	La profondeur (longueur de train de tige)	m	L
P	La pression de refoulement	$pascal$	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$
P_{hy}	La puissance hydraulique	$watt$	ML^2T^{-3}
P_m	La puissance mécanique	$watt$	ML^2T^{-3}
Q	Débit	l / m	L^3T^{-1}
Q_{th}	Débit théorique de la pompe	l / m	L^3T^{-1}
Q_r	Le débit réel de la pompe	l / m	L^3T^{-1}
r_e	Rayon du cylindre extérieur du viscosimètre de Fann	cm	L
r_i	Rayon du cylindre intérieur du viscosimètre de Fann	cm	L
t	Temps	s	T
$\dot{\gamma}_t$	Taux de cisaillement	s^{-1}	T^{-1}
$\bar{\gamma}$	Moyenne des taux de cisaillement	s^{-1}	T^{-1}
$\Delta P_{Globales}$	Pertes de charges globales	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
ΔP_t	Pertes de charges à l'intérieur des tiges	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
ΔP_a	Pertes de charges dans l'annulaire	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
ΔP_o	Pertes de charges au niveau de l'outil	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
ΔP_s	Pertes de charges dans l'équipement de surface	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
m	Viscosité dynamique	$poise$	$ML^{-1}T^{-1}$
m_a	Viscosité apparente	$poise$	$ML^{-1}T^{-1}$
m_p	Viscosité plastique	$poise$	$ML^{-1}T^{-1}$
Θ	La lecture de la graduation sur l'appareil	$lbf / 100ft^2$	$ML^{-1}T^{-2}$
\bar{t}	Moyenne des tensions de cisaillement	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
t_i	Tension de cisaillement à la paroi du cylindre intérieur	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$
t_0	Tension limite de cisaillement (yield value ou yield point)	$barye$	$ML^{-1}T^{-2}$

Ω	Vitesse angulaire du rotor du viscosimètre Fann	tr / s	LT^{-1}
r	Masse volumique	g / cm^3	ML^3

Symboles des nombres adimensionnels :

Symbole	Signification
d	Densité
m	Nombre de prises de mesures
n	Indice de comportement rhéologique (Power Law Index).
r	Coefficient de corrélation
Re	Nombre de Reynolds
Re _c	Nombre de Reynolds critique
$h_{méc}$	Le rendement mécanique d'une pompe à boue
h_v	Le rendement volumétrique

Glossaire

B

Back reaming: remontée de train de tige avec rotation.

Bit: outil, en forage, synonyme de trépan ; trépan.

BOP: abréviation de **Blowout Preventer**; bloc obturateur de puits, Une de plusieurs valves installées à la tête du puits pour empêcher la pression de s'échapper dans l'espace annulaire entre le tubage et la tige de forage ou dans un trou découvert (c'est-à-dire un trou sans tige de forage) pendant le forage ou les opérations de complétion. Les blocs obturateurs de puits sur les champs de pétrole sont placés au-dessous de l'appareil de forage à la surface du sol.

Bottom Hole Assembly (BHA): assemblage de fond; assemblage de masse tiges; bas de garniture.

C

Casing: chemise; enveloppe; tubage, élément dont on revêt la paroi interne d'un trou de forage pour la maintenir, le tubage est fixé par cimentation.

Circulating system: c'est le système de circulation de boue, il comprend les bacs à boue, les pompes à boues, les différentes pompes centrifuges, les différentes conduites, le train de tiges de forage, l'espace annulaire du puits, les tamis vibrants, le desilteur, le desableur, les degazeurs et les centrifugeuses.

Crown block: moufle fixe, ensemble des poulies de renvoi placées au sommet de l'appareil de forage; plan fixe.

Cuttings and sand: déblais et sable ; particules des formations détruites pendant les opérations de forage et évacuées.

D

D.C : abréviation de **Drill Collar**, masse tige, tige de forte épaisseur placées au dessus de l'outil pour encaisser les efforts de compression.

Degazer: dégazeur.

Derrick: derrick; tour de forage, ou tour de sondage.

Desander: désableur.

Disilter: disilteur.

D.P : abréviation de **Drill Pipe**, Tige de forage.

Drawworks: treuil de forage.

Drilling: forage, perçage, perforation.

Drilling Mud: la boue de forage.

H

Hoisting System: c'est le système de levage, il comprend le treuil de forage, le câble de forage, le moufle fixe et le moufle mobile.

H.W.D.P : abréviation de **Heavyweight Drill Pipe**, tige de forage lourde.

K

Kelly drive bushing: coins d'entraînement.

Kelly saver sub: raccord d'usure, raccord venant sur le filetage vif de la tige carrée pour éviter son usure prématuré.

L

Laminar flow: courant laminaire, écoulement laminaire.

Lower Kelly valve: vanne inférieure, de la tige d'entraînement.

M

Mast : mât de forage, contrairement aux derricks, les mâts ne se démontent que peu ou pas, on les dresse tout montés sur l'emplacement de forage.

Mud engineer : ingénieur de boue (parfois mentionné comme "l'Homme de Boue"). Il travaille sur un appareil de forage et il est responsable du fluide de forage (boue).

Mud logging : c'est le processus de rassembler, d'analyser et d'enregistrer les solides, les fluides, et les gaz apportés à la surface par le fluide de forage (boue) (se dit aussi pour la cabine du géologue).

Mud mixing Hopper: malaxeur à boue éjecteur, agitateur à palle.

Mud pumps : pompe à boue, pompe de circulation de la boue de forage.

P

Paddle agitator: agitateur à palettes.

Pump Duplex: pompe duplex, c'est pompe équipée de deux pistons.

Pump Triplex: pompe triplex, c'est pompe équipée de trois pistons.

Plug flow: écoulement avec effet bouchon, écoulement d'une substance dans un tube donnant lieu à un effet bouchon; écoulement sub-laminaire.

Poly crystal diamant: diamant poly cristallin. **Polycrystalline Diamond Cutter bit**: trépan à taillants poly cristallins, abrégé avec **PCD** (polycrystalline diamond) ou avec **PDC** (polycrystalline diamond cutter).

Power Law Index : indice de comportement rhéologique.

Power system : réseau électrique, c'est le système d'alimentation en électricité, il comprend les générateurs, la chambre de contrôle...

R

Rig floor: plancher de forage.

Rotary rig: installation de forage rotary, chantier de forage rotary. **Rig (Drilling rig)**: appareil de forage

Rotary table: table de rotation, le niveau supérieur de la table est en principe le niveau de référence pour la mesure des profondeurs.

Rotating system: c'est le système de rotation de l'appareil de forage, il comprend principalement la table de rotation ou/et le Top drive, le train de tige.

S

Screen: tamis. **Screen analysis**: analyse granulométrique, analyse par tamisage.

Shale shakers: tamis vibrant, pour éliminer les déblais des boues de forage

Shear rate : taux de cisaillement, la vitesse de glissement de deux surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre, vitesse de déformation.

Shear stress : cission, contrainte de cisaillement, contrainte tangentielle, tension de cisaillement

Swivel : émerillon, pivot ; tête d'injection ; tête de rotation

T

Turbulent Flow: écoulement turbulent.

Travelling block: c'est le moufle mobile qui se déplace le long du mât, auquel la Top Drive est accrochée.

U

Upper Kelly cock: robinet de tige d'entraînement.

W

Well control: l'ensemble des équipements (valves) placées sur la tête de puits qui permettent de contrôler et mériter les venus de gaz lors du forage. C'est le BOP (blowout preventer).

Y

Yield value ou yield point: tension limite de cisaillement

Introduction générale

Le pétrole continuera à constituer la plus grande part des ressources énergétiques pendant encore plusieurs décennies. Pour maintenir un rythme de forage à un niveau élevé, il serait nécessaire de mettre en œuvre des techniques innovantes permettant d'optimiser le fonctionnement des appareils de forage. Le forage est l'ensemble des opérations et des fonctions qui permettent de forer un puits à travers les différentes formations géologiques pour atteindre le réservoir.

Si le modèle de fluide newtonien décrit bien la très grande majorité des fluides composés de molécules simples, il existe un bon nombre de fluides, dont certains sont d'usage très courant, qui ont un comportement sous écoulement, plus complexe. La définition d'un fluide newtonien est assez restrictive : les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse, ce qui implique que :

- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

Toute déviation de ces règles est le signe d'un comportement non-newtonien. La description de ces comportements et leur interprétation en relation avec la structure microscopique du fluide constitue la discipline appelée rhéologie. Cette discipline est assez récente ; elle a connu un développement considérable avec l'apparition des polymères synthétiques.

Le fluide de forage est un facteur majeur dans le succès du programme de forage, et pour cela une étude très précise s'impose, la rhéologie est la base de cette étude, elle permet de déterminer le comportement et les propriétés rhéologiques des fluides en circulation, afin d'évaluer les pertes de charge dans le circuit de boue sous le modèle de fluide donné.

Pour réaliser ce travail et réaliser un calcul des différentes pertes de charge, nous utiliserons les enregistrements des paramètres de forage réalisés par plusieurs capteurs, à savoir entre autre, le débit et la pression pour le pompage ainsi que les deux paramètres principaux qui sont la densité et la viscosité.

Le dernier chapitre est consacré à une simulation numérique pour le calcul des pertes de charge dans le circuit de boue en se basant sur le modèle de fluide d'Ostwald réalisé par le logiciel de calcul CFD **FLUENT**.

Chapitre I :

Généralités sur le forage

Le forage pétrolier est un ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses du sous-sol après avoir traversé plusieurs formations géologique qui nous permet d'atteindre un réservoir des énergies fossiles.

Les innombrables facteurs qui jouent un rôle dans le forage d'un puits doivent être reconnus et convenablement examinés quand vient le moment de forer un puits [11].

Ces facteurs sont :

- 1. La coupe géologique : ceci concerne la nature des formations à forer.*
- 2. La capacité de l'appareil de forage.*
- 3. Le programme de boue.*
- 4. L'outil de forage.*
- 5. Les trois paramètres importants :*
 - Le poids sur l'outil dans la fonction levage ;*
 - La vitesse de rotation dans la fonction rotation;*
 - La puissance hydraulique dans la fonction pompage.*

I.1. Introduction à la géologie :

La géologie est la discipline qui étudie la terre, de par les formations qui constituent sa couche superficielle (croûte terrestre).

Les données géologiques sont très importantes dans le domaine du forage. Les informations recueillies sur l'emplacement du forage permettent :

- Un calcul pratique de l'assemblage du train de tige (*Bottom Hole Assembly*).
- D'adapter le diamètre et le type d'outil (Poly Cristal Diamant ou à molettes) pour chaque formation à forer.
- D'éviter de forer dans les zones faillées afin d'éviter le coincement de la garniture de forage.

Le bassin de HASSI MESSAOUD, dans la wilaya de OUARGLA, est un bassin sédimentaire. Ce dernier qui est exploité depuis les années cinquante a fait l'objet d'études géologique approfondies. La différence des épaisseurs des couches sédimentaires varie d'un puits à un autre ; un exemple de formations de roches composant ce bassin est donné dans le tableau I.1 [1].

I.2. Le Forage (Drilling)

Le principe est de creuser un puits en utilisant des tiges vissées les unes aux autres (train de tige) auxquelles on adjoint un outil à forer (trépan ou *Bit*).

Le trépan doit pour accomplir son rôle être animé d'un mouvement de rotation autour de son axe et être appuyé avec une certaine force sur le fond du puits. Ces deux actions lui sont transmises depuis la surface par les tiges qui sont vissées au dessus de lui. Au fur et à mesure que la roche est réduite en petits débris (*cuttings*), encore appelés déblais de forage, une circulation continue de boue, descendant par l'intérieur des tiges et remontant par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou, les évacue vers la surface. Cette boue peut jouer un rôle important dans le travail d'attaque de la roche par le trépan.

Le forage rotary (par rotation) est un procédé très employé de nos jours, car il permet d'obtenir les meilleures vitesses d'avancement, et surtout, d'atteindre des profondeurs extrêmement importantes [2].

ERE	AGE	STRATIGRAPHIE	TOP (m)	LITHOLOGIE	DESCRIPTION		
Tertiaire		Mio-Pliocène	0		Sable, calcaire et marne sableux		
		Eocène	225		Dolomie argileuse		
SECONDAIRE	CRETACE	Sénonien	Carbonaté	328		Calcaire, Dolomie et argile	
			Anydritique	430	AAAAAA	Anhydrite, dolomie et sel	
			Salifère	667	↑↑↑↑↑↑↑↑		
		Turonien	801	-----	Calcaire et dolomie		
		Cénomannien	922	AAAAAAA	Anhydrite		
		Albien	1055	-----	Grès et argile en alternance		
		Aptien	1437		Dolomie argileuse		
		Barrémien	1462		Sable et grès		
		Néocomien	1747		Dolomie		
		JURASSIQUE	Malm		1920	-----	Argile, grès et traces d'anhydrite
	Dogger			Argileux	2131	-----	Argile, anhydrite, dolomite avec fin passages de grès
				Lagunaire	2247	AAAAAA	
	Lias		L. Dolomitique 1	2458	AAAA	Dolomie et anhydrite	
			L. Salifère 1	2523	^^^↑↑↑	Sel et anhydrite	
			L. Dolomitique 2	2612		Dolomie	
			L. Salifère 2	2678	↑↑↑↑↑↑	Sel	
			L. Dolomitique 3	2735		Dolomie	
	TRIAS		Trias Salifère 1	2766	AAAA	Anhydrite et dolomie	
			Trias Salifère 2	2806	↑↑↑↑↑↑	Sel et anhydrite	
		Trias Salifère 3	2997	↑↑↑↑↑↑	Sel avec traces d'argiles		
Trias Argileux (G10)		3200	-----	Argile, grès et dolomie			
Trias Argileux G35		3264	-----				
Agilo grésseux et Carbonaté		3284	-----				
PRIMAIRE		ORDOVICIEN	Andéstique		<<< <	Complexe volcano-sédimentaire	
	Quartzites de Hamra				Quartzites		
	Grès d'Elatchane			-----	Grès		
	Argiles d'Elgassi			-----	Argile		
	Zone des alternances			-----	Alternance de Grès et d'Argile		
	CAMBRIEN	Réservoir R1	3308		Grès quartzitiques		
		Ra	3329		Sable et argile		
		R2	3469				
	Argile		Dolomie				
	AAAA	Anhydrite		Sable et Grès			
		Calcaire	↑↑↑↑↑↑	Sel			

Tableau I.1 : Echelle stratigraphique type du bassin de HASSI MESSAOUD.

I.3. L'appareil de forage (rotary rig) :

Une plate-forme de forage rotatif (*rotary rig*), sur terre ou en mer, peut être considérée comme une usine conçue pour délivrer seulement un produit : un puits de pétrole. Ce trou est une voie soigneusement exécutée de la surface vers une formation poreuse et perméable qui peut contenir des hydrocarbures (réservoir). Les installations diffèrent d'un constructeur à un autre, cependant, les fonctions assurées sont fondamentalement similaires[3].

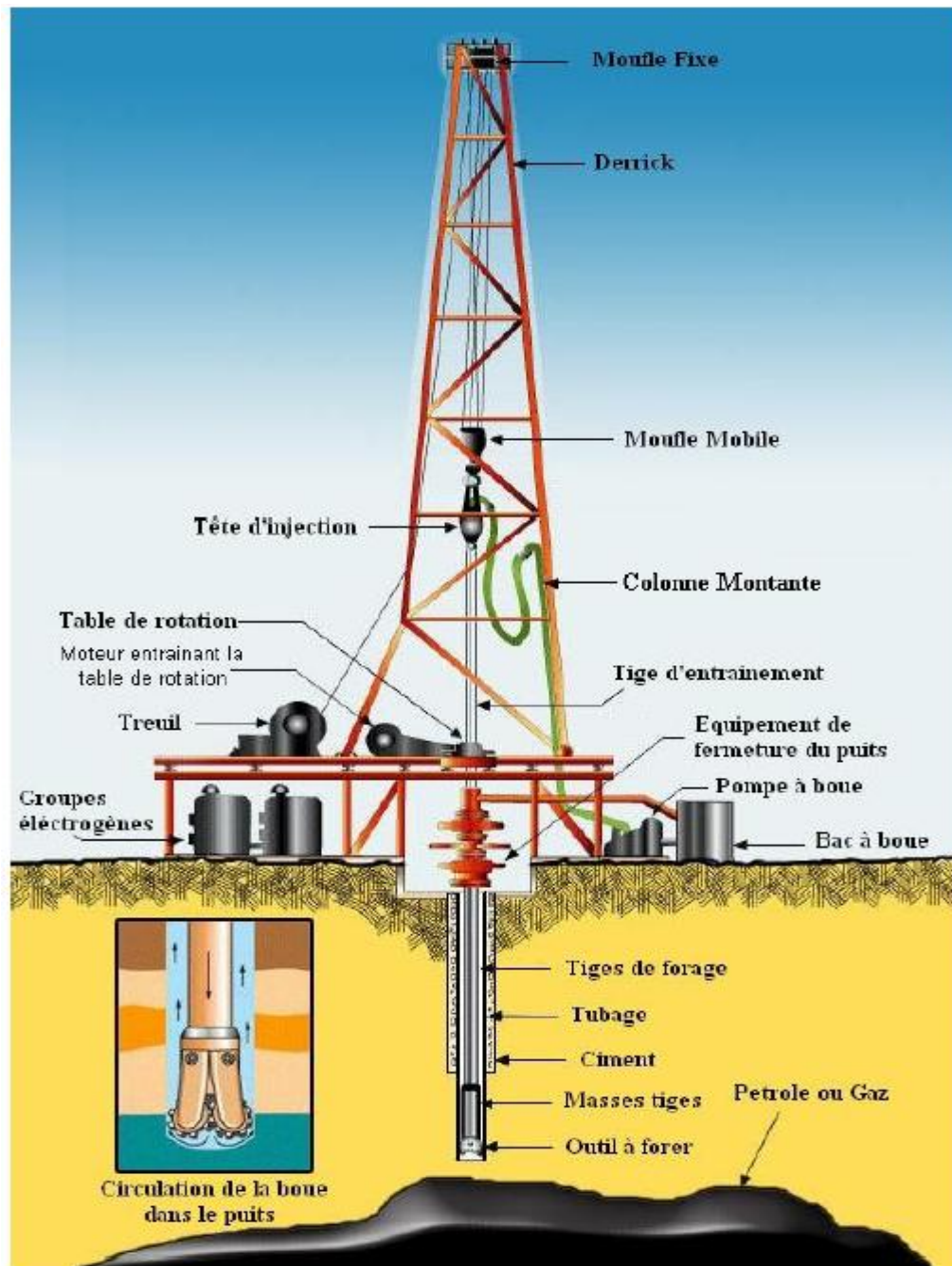


Fig.I.1.Schéma d'un appareil de forage à terre.

I.4. Architecture d'un puits :

La réalisation d'un puits de pétrole s'effectue en plusieurs phases dont le diamètre décroît au fur et à mesure de l'approfondissement du puits. Une phase est caractérisée par un diamètre de forage ; celui-ci est égal au diamètre de l'outil utilisé pour sa réalisation (la phase prends pour nom le diamètre de l'outil).

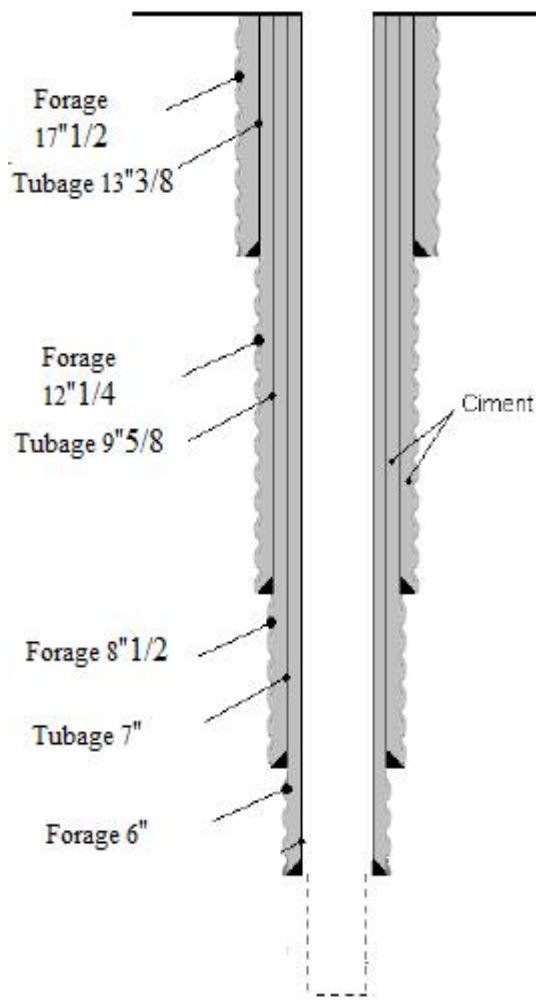


Fig.I.2. Schéma d'un puits en fin de réalisation.

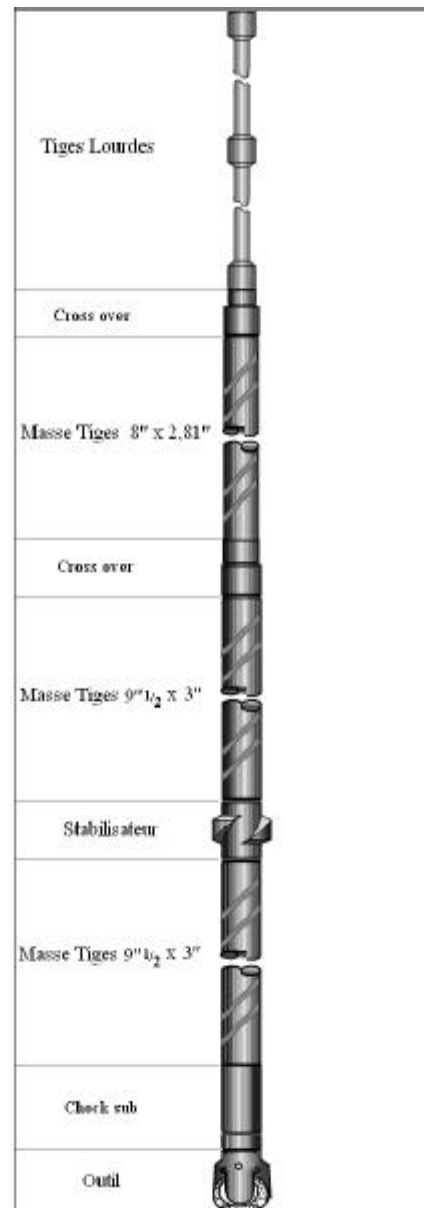


Fig.I.3. Schéma type d'un Assemblage de train de tiges

I.5. L'outil de forage (Bit) :

Les différentes natures de terrains à forer ont conduit les fabricants à développer plusieurs types d'outils. On distingue les trépan tricônes et les trépan monobloc (*Poly cristal diamant*). Les tricônes peuvent, selon la nature du terrain, être garnis de dents recouvertes de métal dur. Ils peuvent également, dans le cas de terrains très durs, être pourvus de picots de carbure de tungstène. Ces derniers sont alors sertis. Enfin, pour les terrains les plus durs et les plus abrasifs, on utilise des outils monobloc, sertis de diamants naturels.

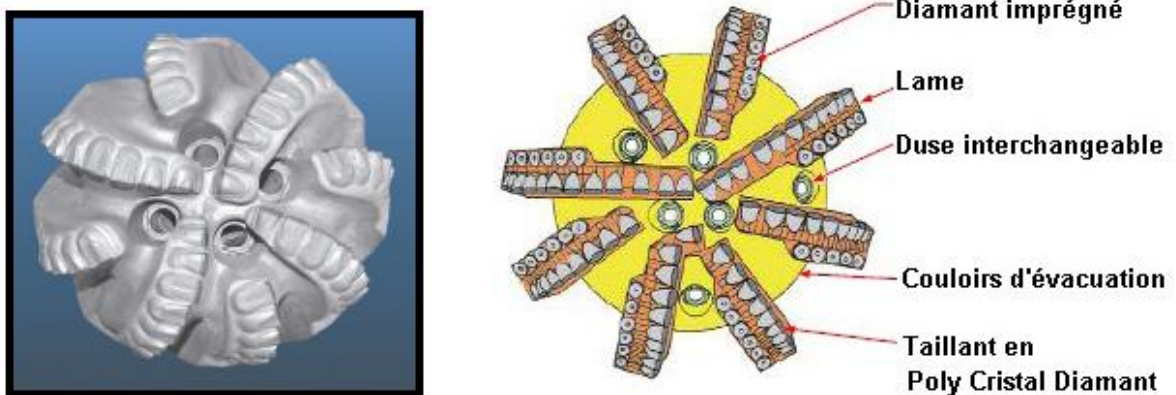


Fig.I.4.Outil poly cristal diamant utilisé dans les phases 17"1/2 et 12"1/4

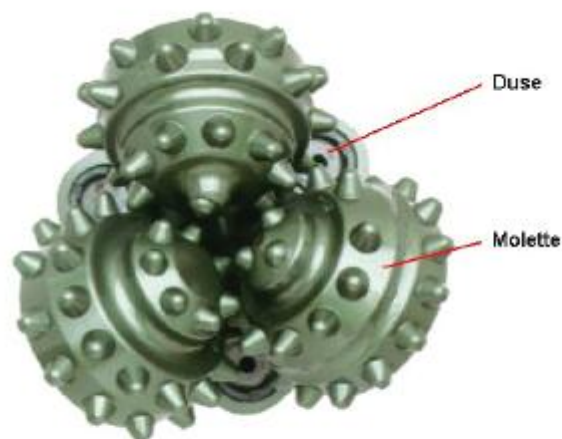


Fig.I.5. Outil tricône à molettes utilisé dans la phase 26"

I.6. Le système d'énergie d'un appareil de forage (*Power system*) :

Ce système comprend tous les processus de production et de distribution de l'énergie sous forme de puissance. Pour un appareil mécanique, la source d'énergie est composée de moteurs à combustion interne (Diesel). La puissance est transmise des moteurs vers les organes consommateurs à l'aide de chaînes ou de courroies de transmission. L'appareil électrique, de conception moderne, est doté aussi de moteurs à combustion interne mais couplés à des génératrices électriques. Ces dernières génèrent une puissance électrique qui est transportée via un réseau de câblages aux différents éléments de l'installation.

Une installation peut avoir besoin de deux à quatre moteurs, selon la profondeur du puits qui doit être foré. Les grandes installations emploient trois ou quatre moteurs de 1215 hp (906 Kw) de puissances, avec des générateurs de 1200 KVA qui, ensemble, peuvent développer 4860 hp (3624Kw) de puissance. Beaucoup de sondes (*rigs*) qui forent à grande profondeur sont électriques parce qu'elles sont plus simples à installer et de maintenance plus facile que les installations mécaniques [3].

I.7. Le système de circulation d'un appareil de forage (*Circulating system*) :

Le terme circulation est relatif au fluide de forage utilisé. Le système fait circuler en circuit fermé le fluide de forage, depuis les bacs de stockage en surface jusqu'à l'outil au fond du puits pour le remonter ensuite à la surface. Parmi les objectifs assignés à ce circuit boue il y a : la lubrification du franc de taille, le refroidissement de l'outil et le nettoyage du trou. Pour effectuer une opération de forage, le fluide doit atteindre le fond du puits en empruntant l'intérieur des tiges et circuler autour du trépan pour enfin remonter à travers l'espace annulaire entre le train de tige et les parois du puits ou le *casing* couvrant ces dernières [3].

Un système de circulation utilise l'équipement suivant pour circuler, nettoyer et recycler le fluide de forage :

- Pompes à boue
- flexible d'injection.
- Tête d'injection ou une *top drive*
- Train de tige
- Trépan
- Canalisation de retour de boue.
- Bac à boue

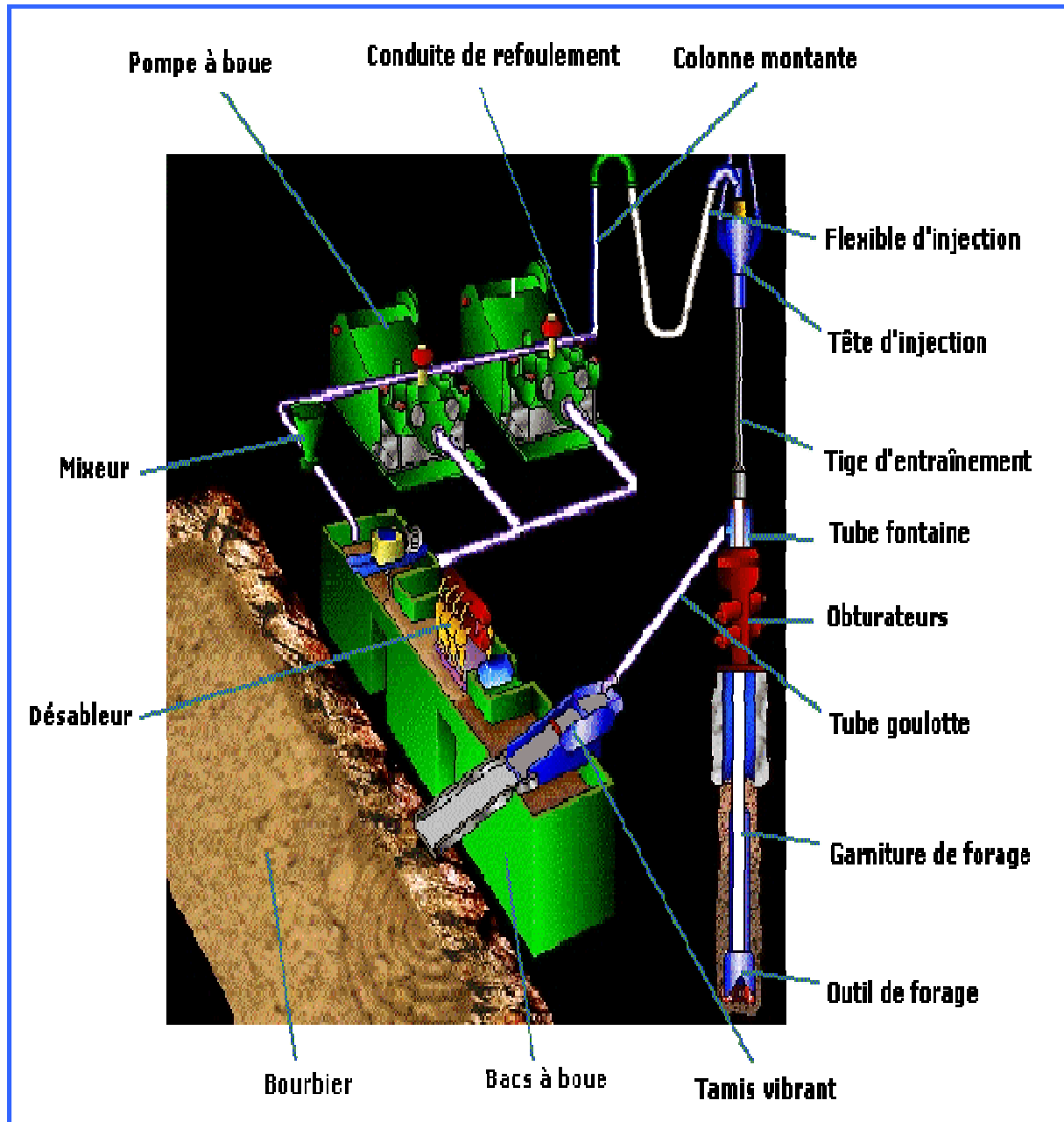


Figure (I.6) : représentation du circuit de boue de forage

I.7.1. But de la circulation :

Les principaux buts de la circulation des fluides de forage sont [3]:

- Nettoyer le fond du puits.
- Refroidir et lubrifier le trépan et le train de tige.
- Remonter les débris de roches, issues du forage, vers la surface
- Maintenir en place les parois du puits et éviter ainsi son effondrement.
- Empêcher l'exfiltration des fluides contenus dans les couches de roches traversées.

I.7.2. La boue de forage (*drilling Mud*) :

Le fluide de circulation est habituellement un liquide mais peut également être de l'air ou un autre gaz. Si le fluide de circulation est un liquide, c'est généralement une boue à base d'eau, ou bien à base d'huile (carburant habituellement diesel).

Les deux bases (base-eau ou base-huile) du fluide de forage sont appelées boue de forage car elles donnent l'aspect de la boue du fait des additifs solides que l'on y ajoute. Le comportement des boues de forage est complexe à cause des additifs chimiques qui y sont ajoutés tels que les [3]:

- **Colloïdes argileux** : Les bentonites et les attapulgites.
- **Colloïdes organiques** : L'amidon et la C.M.C (carboxyméthyle cellulose).
- **Les fluidifiants et défloculants** : Les tanins, les lignosulfonates et les lignines.
- **Les additifs minéraux** : La soude caustique (Na OH), le carbonate de soude (Na₂ CO₃), le bicarbonate de soude (Na HCO₃), le gypse (Ca SO₄), la chaux éteinte Ca (OH)₂, le sel (NaCl) et le chlorure de calcium (Ca CL₂).
- **Les produits organiques spéciaux** : les anti-ferments, les anti-mousses, les agents de décoincement du train de tige.
- **Les alourdisant** : La barytine ou sulfate de baryum (Ba SO₄ - densité : 4,2), le carbonate de calcium (Ca CO₃ - densité : 2,7) et la galène ou sulfure de plomb (PbS - densité : 7,00).
- **Les colmatant** : Les colmatant granulaires, les colmatant fibreux, les colmatant lamellaires, les colmatant gonflants et les colmatant à "prise".

Les caractéristiques des additifs citées ci-dessus sont très recherchées. Elles sont combinées de telle manière à adapter la boue aux différentes couches rocheuses traversées durant tout le processus de forage.

I.7.2.1. Les types des fluides de forage :

- **boue à base d'eau :**

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Based Muds" ou **WBM**. Ils sont généralement constitués par des suspensions d'argile (bentonite, ...), des solides inertes (carbonates, ...) dont les caractéristiques rhéologiques sont corrigées par addition de polymères viscosifiants (Xanthane, ...). Des réducteurs de filtrat entre également dans la composition (carboxyméthyle cellulose, polymères synthétiques). La composition de ces boues est selon les couches traversées et les besoins de forage, parmi elles on peut citer quelques types. [12]

- **Boue bentonitique :**

Le viscosifiant de base est une argile montmorillonite qui donne son meilleur rendement en eau douce. Ce sont des fluides utilisés en début de puits pour leurs propriétés de remontée des déblais et de thixotropie.

Leurs propriétés sont améliorées par l'ajout de colloïdes organiques réducteur de filtrat les CMC: Carboxyméthyle cellulose, et fluidifiant FCL: Lignosulfonate ou Lignite.

- **Boue aux polymères :**

Ce sont des boues à faible teneur en solides forés (inférieure à 8 %), ou le viscosifiant n'est plus une argile, mais un polymère à longue chaîne: le Bio polymère ou XC Polymère. Sa propriété particulière de fluidification à haut taux de cisaillement va diminuer les pertes de charges dans les tiges de l'outil, tout en remontant les déblais dans l'annulaire.

De plus, la faible teneur en solide en diminuant la densité du fluide, va diminuer la pression hydrostatique appliquée sur la formation. Ces deux propriétés nous donnent l'avantage principal du fluide, l'augmentation de la vitesse d'avancement des outils.

- **Boue à base d'huile :**

Un fluide à base d'huile est un fluide dont la phase continue est de l'huile. Une certaine quantité d'eau ou de saumure est émulsionnée dans cette huile. La quantité d'eau ou de saumure émulsionnée peut aller de quelques pour cent à environ 50 pour cent de la phase liquide.

Certaines sociétés de services boues désignent leurs systèmes par "boue à l'huile" sans plus de distinction, d'autres différencient les systèmes:

- "boue à l'huile" pour les faibles teneurs en eau.
- "boue à émulsion inverse" pour les hautes teneurs en eau.

- **Boue à l'huile (teneur en eau 5 % maxi) :**

Est un mélange d'asphalte d'acides organiques de bases, d'agents stabilisants et de brute, la composition exacte dépend du fabricant. Quoiqu'il y ait un tout petit peu d'eau dans la boue à huile, l'eau considérée comme un contaminant à éviter. Une très petite quantité d'eau peut provoquer un épaissement de la boue, cependant à l'exception de cette contamination par l'eau, la boue à l'huile est particulièrement stable.

- **Boue émulsionnée inverse (teneur en eau 50 % maxi) :**

Peut contenir jusqu'au 50% en volume d'eau douce ou salée, émulsifiée par petites gorettes dans l'huile et qui maintiennent en suspension les argiles, bien préparées.

Les boues inverses constituent des émulsions très stables, elles sont généralement peu colorées, alors que les boues à l'huile sont noires.

I.7.3. Les bacs à boue :

I.7.3.1. Fonctions des bacs à boue :

Les fonctions principales des bacs à boue sont les suivantes :

- Stocker la boue qui circule dans le puits de forage
- Alimenter les pompes à boue volumétriques.
- Stocker assez de boue pour remplir le puits lorsque les tiges sont hissées hors du puits
- Traiter et filtrer la boue.

La boue est préparée dans ces bacs à l'aide des mixeurs en entonnoir (*Mud mixing Hopper*) dans lesquels tous les additifs solides passent pour y être mélangés à une phase liquide (eau ou gasoil).

Cependant, certaines poudres chimiques (caustique) échappent à ce traitement du fait qu'elles sont très dangereuses. Celles-ci sont déversées directement dans les bacs qui sont dotés d'agitateurs à pales (*paddle agitator*) pour mélanger la préparation avec de l'eau ou du gasoil selon les besoins du forage (boue à l'eau ou boue à l'huile) [3].

I.7.3.2. Types de bacs à boue :

Un chantier de forage contient plusieurs bacs à boue, chacun portant la dénomination de l'opération dont il assure la fonction :

- Bacs de manœuvres:

Ce sont les bacs les plus proches de l'ouverture du puits. Ces bacs servent à compenser le volume de tige extrait du puits vers la surface par de la boue.

- Bacs de décantation:

Ces bacs servent à recueillir la boue traitée (filtrée et débarrassée des particules solides) ; par les machines suivantes:

- Les tamis vibrants (*shale shakers*)
- Le dessilteur (*disilter*)

- Le déssableur (*desander*)
- Le dégazeur (*degazer*)
- Les centrifugeuses

- Bacs intermédiaires:

Servent de bacs de stockage ou alors de relais entre un bac et un autre (bacs de transit).

- Bacs d'aspiration:

Ces bacs sont placés très près des pompes à boue car ils alimentent celles-ci.

I.7.4. Les pompes à boue (*Mud pumps*):

I.7.4.1. Présentation :

La pompe à boue est l'élément essentiel de tout système de circulation. Elle doit assurer un débit compatible avec le rendement optimal du trépan utilisé.

- Partie mécanique de la pompe :

Une pompe à boue est généralement entraînée par un moteur électrique ou un moteur à combustion interne auquel elle est reliée par une transmission à courroies trapézoïdales montées sur poulie à gorges multiples. Le mouvement de rotation ainsi imprimé à l'arbre d'attaque de la pompe est transmis par un jeu de pignons à dents hélicoïdales à l'arbre principal de la pompe. Celui-ci comporte un ensemble de manivelles et de bielles transformant le mouvement de rotation reçu en un mouvement de translation aux pistons.

- Partie hydraulique de la pompe :

Se compose, en général, de cylindres horizontaux munis de clapets d'aspiration et de clapets de refoulement, d'un système d'aspiration et d'un système de refoulement comprenant, en particulier, une bouteille d'air destinée à amortir les pulsations de la pompe. Chaque cylindre comprend une chemise amovible raccordée au moyen d'une tige de piston aux bielles. Il existe pour toute pompe une gamme de chemises de différents diamètres dont l'échelonnement de ces diamètres est de ¼ de pouce en général [1]. Ces pompes sont volumétriques et il en existe deux types :

I.7.4.2. Pompe duplex à double effet (*Pump Duplex*) :

« Elle possède deux pistons disposés et travaillant horizontalement. La pompe est dite à double effet c'est-à-dire qu'elle aspire et refoule dans les deux sens de déplacement du piston. Cela est possible grâce à un système de clapets. » [1].

La pompe à double action utilise quatre courses d'égales longueurs, chacune chronométrée pour 90 degrés de rotation de vilebrequin de l'extrémité d'une course d'un piston au début de la prochaine course de l'autre piston. Quatre impulsions de pression par révolution

de la manivelle sont produites [4]. Les pompes à double effet furent utilisées dans les chantiers de forages jusqu'à 1960. Pour des puissances supérieures à 1500 hp (1120 kw), leur poids est devenu un réel problème. Elles furent alors remplacées par des pompes TRIPLEX [4].

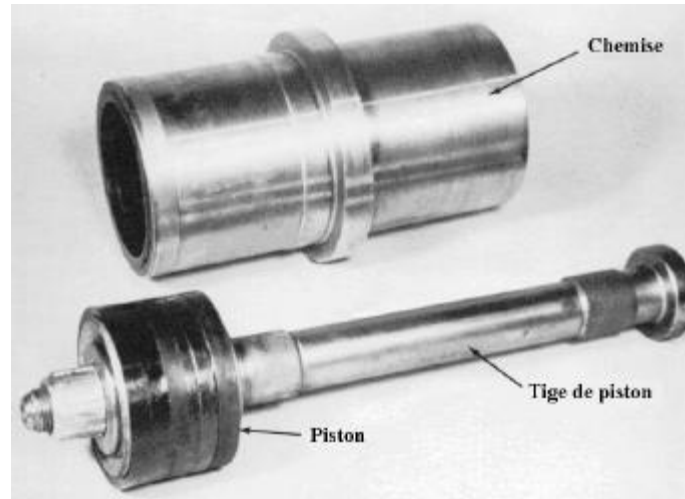


Fig.I.7. Accessoire pour la pompe à boue.

I.7.4.3. Pompe simple effet (*Pumps Triplex*) :

Elle possède trois pistons disposés et travaillant horizontalement. La pompe est dite à simple effet c'est-à-dire que pour un coup (course) du piston elle aspire uniquement et refoule pour un deuxième coup (course) du piston.

La pompe à triple action utilise trois courses d'égales longueurs, chacune chronométrée pour 120 degrés de rotation de vilebrequin de l'extrémité d'une course d'un piston au début de la prochaine course de l'autre piston. Trois impulsions de pression (coups de béliers) par révolution de la manivelle sont produites [4].



Figure (I.8) : Pompe triplex à simple effet [1]

I.7.4.4. Comparaison entre la pompe duplex et la pompe triplex:

- La pompe TRIPLEX travaille avec une vitesse de 120 à 160 coups par minute comparée à la pompe DUPLEX qui elle, travaille à une vitesse de 60 à 70 coups par minutes
- La pompe TRIPLEX est 40 à 50 % plus légère que la pompe DUPLEX pour une puissance délivrée égale.
- La chemise de piston de la pompe TRIPLEX est la moins imposante des deux.
- Les tiges de piston de la pompe TRIPLEX ont une durée de vie prolongée alors que les tiges et les chemises de pistons de la pompe TRIPLEX ont une durée de vie inférieure à la demie durée de vie des tiges et chemises de pistons de la pompe DUPLEX.
- Les pompes TRIPLEX peuvent fonctionner à des pressions élevées (5000 psi = 34475 Kpa = 344,75 bar) et produire un écoulement plus régulier que celui des pompes DUPLEX.
- Les coûts de maintenance et de réparation d'une pompe TRIPLEX sont inférieurs à ceux d'une pompe DUPLEX [4].

I.7.5. Pompe centrifuge :

I.7.5.1. Présentation d'une pompe centrifuge :

La théorie du fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée. Cette augmentation provient, d'une part, d'un accroissement de l'énergie pression (énergie potentielle) et d'autre part, d'un accroissement de l'énergie cinétique. Cette dernière est transformée en énergie pression par un ralentissement progressif qui est obtenu dans une pièce placée à l'extérieur de la roue et qui, suivant le cas, peut être [5] :

- Un diffuseur lisse.
- Un diffuseur à ailettes.
- Un colimaçon ou volute.

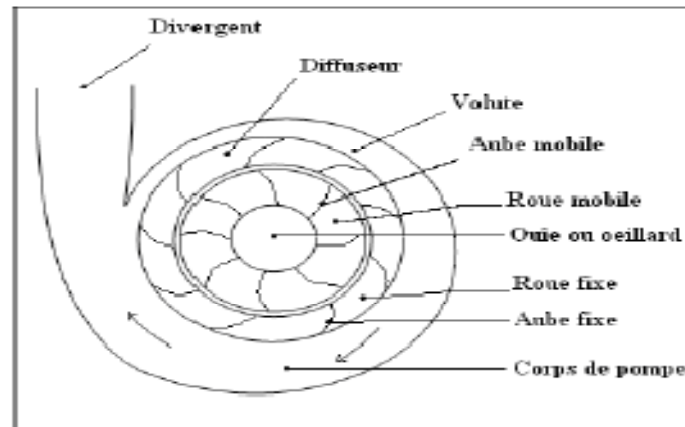


Fig.I.9. Constituant d'une pompe centrifuge.

I.7.5.2. Rôle des pompes centrifuges :

Un chantier de forage dispose d'un nombre important de pompes centrifuges. Chacune d'elles assure un rôle bien déterminé, tel que [4] :

- Le mixage de la boue (Mixeur à boue en entonnoir).
- Le déplacement de la boue d'un bac à boue à un autre.
- Le chargement des cylindres des pompes à boue volumétriques.
- L'alimentation en eau pour la boue, le refroidissement des freins du treuil et le lavage.

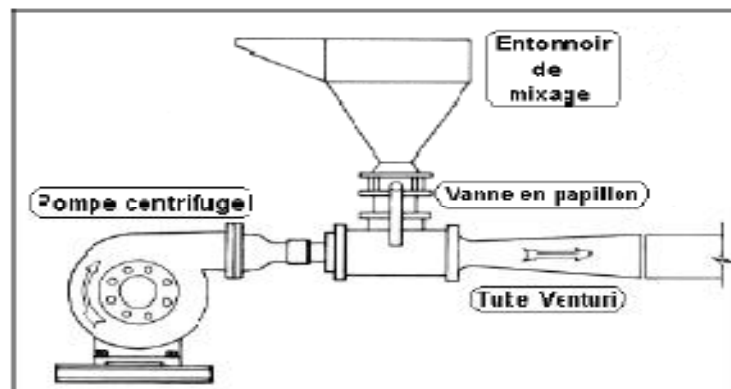


Fig.I.10. Mixeur en entonnoir couplé à une pompe centrifuge.

I.7.6. Tamis vibrant (shale shakers) :

La boue remontée du puits contient des débris de roches, du sable et d'autres particules (*cuttings and sand*). Ces particules doivent être enlevées avant que cette boue ne soit remise en circulation.

La présence de ces particules, en suspension dans la boue, entraîne une augmentation de la viscosité. Pour cela, il existe des bacs de décantation pour précipiter par gravité les particules en suspension vers le fond des bacs. Mais toutefois, cette méthode n'est pas très

rapide et risque d'interrompre le forage, on utilise alors des tamis vibrants (*Shale Shakers*) dotés de capacités de traitement suffisantes.

Un système de circulation sur un chantier de forage est doté de plusieurs tamis vibrants, (série de tamis). Chaque tamis est équipé d'une grille de filtrage (*screen*) conçue pour un diamètre de débris bien déterminé.

I.7.7. Désableurs (Desanders) et Désilteurs (Desilers) :

De fines particules arrivent à se faufiler à travers les grilles des tamis vibrant qui font circuler cette boue qui contient ces particules conduirait à éroder le train de tige et d'autres composants. Pour capter ces particules on utilise un désableur et un désilteur.

Le principe de ces deux machines repose sur l'hydrocyclone (cône fixe). Le principe est qu'il communique un mouvement tourbillonnant à la boue qui est admise par son orifice tangentiel



Fig.I.11.Désableur

L'hydrocyclone est doté d'un petit tuyau placé en son sommet. Son rôle est de laisser s'échapper le vortex d'aspiration drainant avec la boue contenant les particules légères.

Les particules les plus importantes sont projetées contre les parois du cône. Lorsque les particules les plus légères se retrouvent au centre du vortex elles sont aspirées vers le haut du cône, les particules se trouvant à proximité des parois du cône sont entraînées vers le bas pour enfin sortir par l'apex.

Un désableur ou un déssilteur contient plusieurs hydro cyclones alors qu'une pompe centrifuge est utilisée pour alimenter tous ces cônes centrifuges.

La pression est un paramètre déterminant l'efficacité d'un hydro cyclone. En effet si la pression n'est pas suffisante les solides ne pourront être séparés de la boue. Et encore si la pression vient à être très importante la durée de vie de la machine sera rapidement réduite.

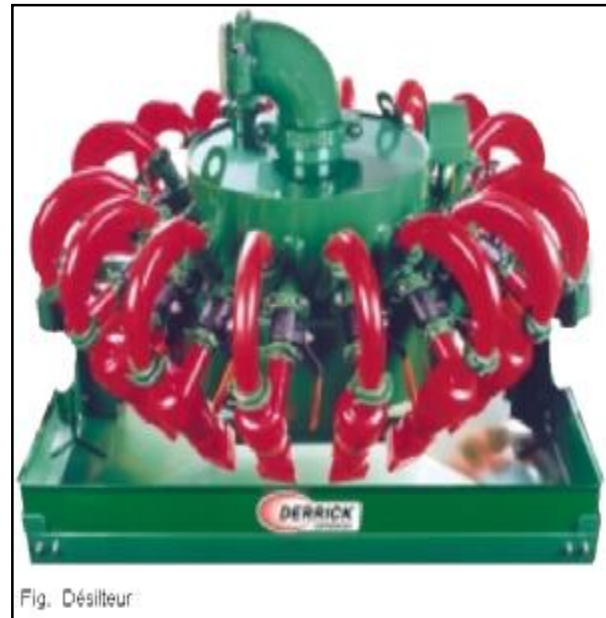


Fig. Désilteur

Fig.I.12.Désilteur

La majorité des déssableurs fonctionnent avec une pression de 35 psi (241,325 Kpa = 2,41bar) et les déssilteurs avec une pression de 45 psi (310,275 Kpa = 3,10 bar) mesurée sur les machines non pas sur les pompes.

Le désableur est très adapté aux premières phases de forage caractérisées par l'utilisation d'une boue à eau et les grains de sables comme débris de forage. Le déssilteur lui sépare les éléments plus fins de la boue.

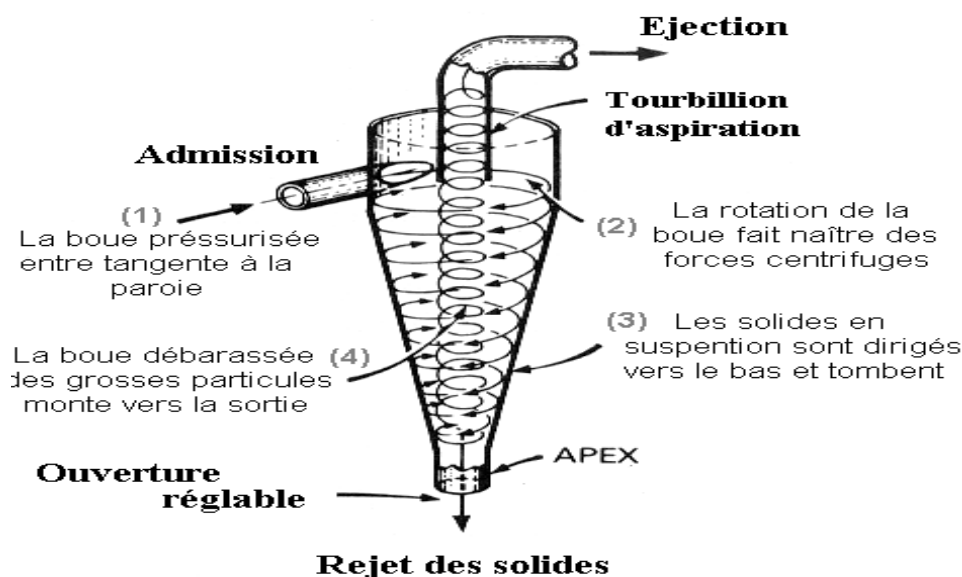


Fig.I.13.Principe de fonctionnement de l'hydro cyclone

I.7.8. Centrifugeuses:

Les processus cités plus haut sont des procédés destinés à capter les particules dont les dimensions sont supérieures à celles des argiles (la Baryte).

La centrifugation de la boue permet de séparer des particules plus petites encore que les argiles. Le but de la centrifugation est le maintien d'un contenu minimum de solides, de poids spécifique faible dans la boue en circulation. Cela conduit à un contrôle et une stabilisation de la densité de cette boue.

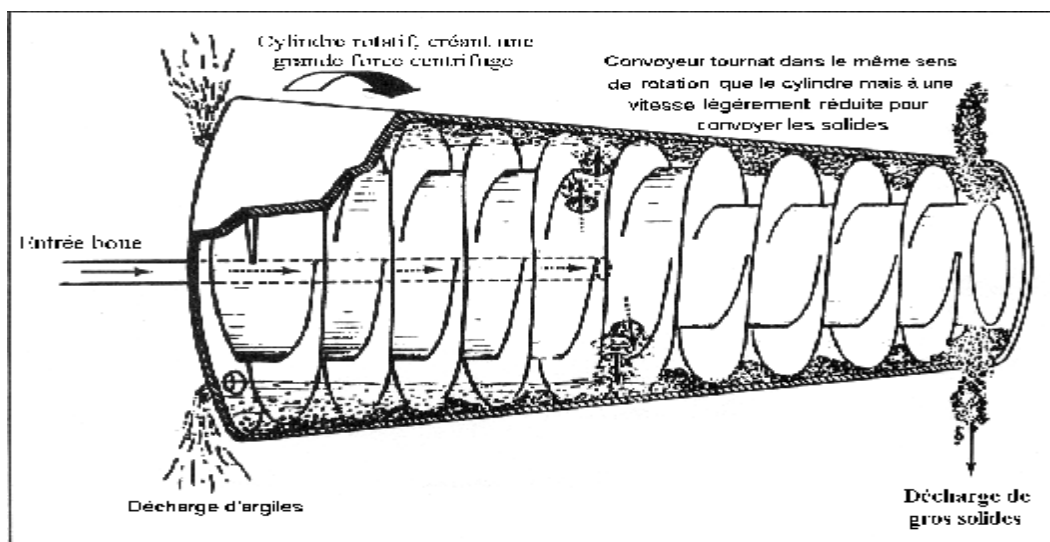


Fig.I.14. Principe de fonctionnement de la centrifugeuse.

I.7.9. Dégazeurs :

Il arrive que du gaz s'infiltré dans la boue et remonte du puits à cause de l'insuffisance de la pression hydrostatique qu'exerce cette boue sur le fond du puits.

Dans ce cas, le gaz qui est plus léger que la boue remonte plus rapidement à la surface. Les installations risquent d'être endommagées par les coups de béliers sans oublier les risques d'explosion. Pour ça, on oriente la boue gazée vers un dégazeur pour effectuer la séparation des deux phases.

Plusieurs types de dégazeurs existent ;

- Dégazeur séparateur de gaz : est utilisé pour canaliser les coups de béliers dus à la pression du gaz présent dans la boue qui remonte du puits.



Fig.I.15. Dégazeur

- Dégazeur sous vide : est approprié pour séparer la boue et le gaz intimement mélangés, la boue apparaît très mousseuse dans ce cas.

I.8. Système de levage (*hoisting system*) :

C'est un ensemble d'appareils de levage, de câblages, de poulies et de structures en treillis (mât) qui permet la descente dans le puits du trépan vissé au train de tige ou encore de les en extraire. Tout cet ensemble d'équipements se trouve sur le plancher (*rig floor*) de l'appareil de forage [3].

Le système de levage dans un appareil de forage assure la manœuvre de remontée et la descente du train de sonde et, éventuellement, la descente d'une colonne de tubes (tubage du puits). Il est composé principalement :

- De la structure de la tour de forage (*derrick*) ou le mât (*mast*).
- Du treuil de forage (*drawworks*) et ses accessoires.
- Du mouflage.
- Et du poste de commande et de contrôle.

I.8.1. La structure de la tour de forage (*derrick*) et le mât (*mast*) :

I.8.1.1. Derrick :

La tour de forage se compose de quatre pieds ou fers d'angle formant un tronc de pyramide, ces quatre fers d'angle sont reliées entre eux par des traverses horizontales et des croisillons, la base de ce tronc étant carrée et l'axe de symétrie correspondant avec l'axe du puits (trou). Les dimensions du derrick dépendent de la profondeur que l'on veut atteindre.

La partie supérieure de la tour comprend une plate-forme destinée à supporter le moufle fixe, une deuxième plate-forme se trouve située au 2/3 de la hauteur du derrick : c'est la plate-forme d'accrochage, la partie inférieure comprend des ouvertures sur chacune de ses faces ; l'ouverture la plus importante, située sur l'une de ses faces, à la forme d'un trapèze isocèle allongé dans le sens de la hauteur et sert à l'introduction dans la tour des tiges : c'est la porte du derrick.

La nécessité d'aménager la tête de puits au cours du forage principalement par l'installation d'obturateurs de sécurité a conduit à disposer le plancher de travail (avec le treuil de levage, la table de rotation, les moteurs,...) sur un soubassement métallique appelé « substructure » d'une hauteur de 2 à 3m en général qui supporte également la tour de sondage.

Les substructures comprennent quatre supports métalliques principaux destinés à recevoir les quatre fers d'angle du derrick et qui reposent sur le sol par des plaques métalliques. Ces quatre supports sont reliés entre eux par des fers horizontaux et des cornières entrecroisées. La substructure comprend en outre des poteaux de soutènement destinés à soutenir les pièces lourdes portées par le plancher (treuil, table, moteur, etc...) [2].

Les substructures répondent au besoin de surélévation du plancher de forage pour laisser la place aux empilages de têtes de puits ainsi que de BOP (Blowout preventer). Elles peuvent être indépendantes du mât de levage : ce sont alors des caissons empilés de part et d'autre de la tête de puits, sur lesquels on assemble le plancher, la tour de forage reportant ses charges directement sur la substructure [6].

I.8.1.2. Le mât :

Le montage des derricks prend du temps et il nécessite l'utilisation d'équipes spécialisées de montage. Pour cette raison, les fabricants les ont peu à peu remplacés par des mâts métalliques d'une seule pièce pour les faibles profondeurs, ou qui se démontent en quelques éléments pour les forages à moyenne et même grande profondeur.

Le mât a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale en utilisant le treuil de forage et un câble de levage spécial. Les installations récentes utilisent aussi des pistons hydrauliques pour relever le mât [2].

Les spécifications techniques sont identiques à celles des derricks :

- Charge au crochet maximale compte tenu du mouflage.
- Hauteur libre dans le mât.
- Largeur à la base.
- Résistance au vent avec et sans garniture gerbée.

I.8.2. Le treuil de forage (*Drawworks*) et ses accessoires :

I.8.2.1. Définition :

C'est le cœur de l'appareil de forage, car c'est la capacité du treuil de forage qui caractérise un appareil de forage (*drill rig*) et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer [6]. Le treuil de forage sert à remonter les tiges du trou et à les y descendre et à manœuvrer un train de tubage. Il est caractérisé, essentiellement, par sa gamme de vitesses et par l'effort maximal pouvant s'exercer sur le brin menant du câble.

Le treuil de forage comprend de façon générale :

- L'arbre tambour portant le tambour d'enroulement du câble, avec de part et d'autres les tambours de freins ;
- L'arbre des cabestans qui porte d'un côté une poupée de cabestan, de l'autre un cabestan automatique et au milieu le tambour de curage ;
- Les arbres de la boîte de vitesse (arbre intermédiaire et arbre d'attaque).

Le câble de forage est enroulé ou bobiné sur le tambour de treuil qui fournit la force motrice nécessaire au levage et à la descente du moufle mobile et sa charge de tiges. Les joues du tambour comportent des jantes sur lesquelles sont montées les bandes du frein qui permettent le contrôle de la descente de la charge suspendue au crochet.

Le système de variation de vitesse ou de transmissions (la boîte de vitesses) donne un vaste choix de vitesses de remontée des tiges et le tambour du treuil comporte au minimum quatre vitesses et souvent deux fois plus.

Généralement, le treuil comporte un pignon qui entraîne la table de rotation par une chaîne de grande résistance. Cependant, dans d'autres cas, la table de rotation est entraînée par l'arbre de sortie d'un moteur indépendant.

Les cabestans, au nombre de deux, font également partie du treuil. Le cabestan à commande manuelle s'utilise principalement avec la corde de cabestan pour déplacer des pièces relativement lourdes sur le plancher de sonde, et pour d'autres travaux similaires.

L'autre cabestan est un système automatique ou semi-automatique qui sert au dévissage des tiges lorsqu'elles remontent du trou [2].

I.8.2.2. Le Système de freinage du treuil :

Le treuil de forage est doté d'un système de freinage principal appelé frein mécanique. Ce dispositif fonctionne selon le principe de bandes de frein qui s'opposent à la rotation de jantes en frottant sur celles-ci. Les jantes sur lesquelles agit le frein sont celles qui composent la bobine d'enroulement du câble du treuil [2].

La capacité de freinage du système à bandes n'est pas suffisante dynamiquement lorsque les plus lourdes charges sont descendues dans le puits. C'est pourquoi, sur tous les appareils de forage, il est adjoint des ralentisseurs (freins auxiliaires) fixés sur l'axe du tambour de treuil. Deux types de freins auxiliaires sont utilisés :

- Le ralentisseur hydraulique dont le principe est de transformer l'énergie mécanique produite par la descente d'une charge, en chaleur par l'intermédiaire d'un rotor entraîné en rotation par le tambour du treuil.
- Le ralentisseur électromagnétique qui comprend un élément entraîné (rotor) et un élément fixe qui fournit un champ magnétique réglable par commande. Le rotor coupe les lignes du champ magnétique. Les forces électromagnétiques induites dans le rotor s'opposent au mouvement de rotation [6].

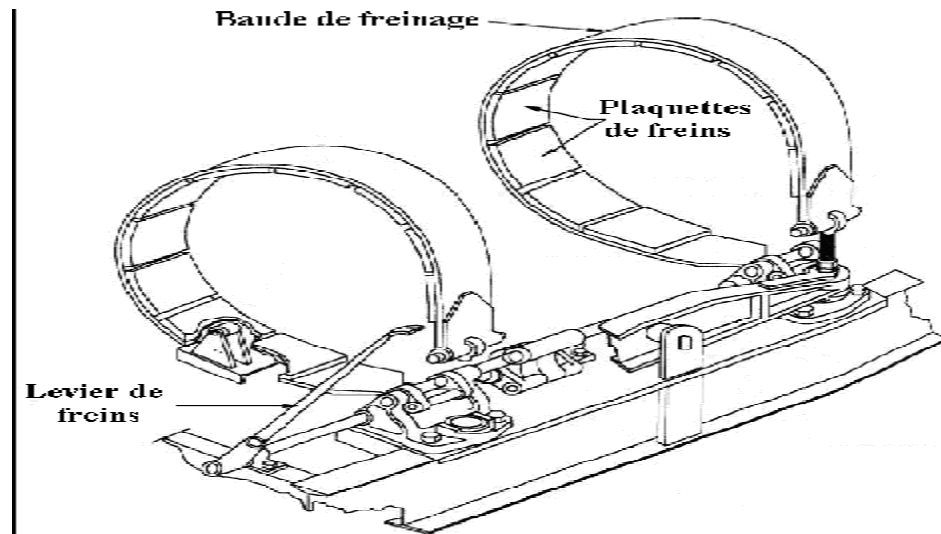


Fig.I.16. Schéma du système de freinage mécanique.

I.8.3. Le mouflage :

Le mouflage comprend essentiellement :

- Le moufle fixe
- Le moufle mobile.
- Le câble de forage.
- Le brin mort et le point d'ancrage.

I.8.3.1. Moufle fixe (*Crown-block*) :

Il est composé d'une série de poulies montées généralement sur un même axe. Ces poulies sont montées « folles », c'est-à-dire qu'elles peuvent tourner librement et indépendamment autour de cet axe. Leur nombre est supérieur d'une unité à la moitié du nombre de brins de mouflage. Par exemple, pour un mouflage à 8 brins, le moufle fixe aura $(8/2 + 1=5)$ poulies.

Ce moufle est monté sur un bâti qui est lui-même posé et fixé sur la petite base se trouvant au sommet de la tour. Il comprend également une petite poulie fixée au dessous du bâti et qui sert à la manœuvre du câble de curage.



Fig.I.17. Moufle fixe

I.8.3.2. Moufle mobile (*travelling block*) :

Il est composé également d'une série de poulies montées en parallèle et « folles » sur un même axe. L'ensemble est enfermé dans un carter avec des flasques entre les poulies destinées à éviter que le câble ne saute des poulies. Le nombre de poulies est égal à la moitié du nombre de brins (4 pour 8 brins).



Fig.I.18. Moufle mobile

I.8.3.3. Câble de forage :

Les câbles des appareils de forage sont à âme métallique sur laquelle on câble six torons constitués de fil d'acier. Le câblage des fils de torons sur l'âme est en général de sens inverse du câblage des torons sur l'âme (câblage normal) ; ce qui donne un câble plus raide mais quelque peu anti-giratoire.

I.8.3.4. Brin mort et point d'ancrage:

L'encrage du câble de forage se fait sur un réa spécifique qui permet de mesurer la tension sur cette extrémité et autorise également l'introduction dans le système d'une certaine longueur de câble neuf afin de déplacer les ponts d'usure sur les poulies du moufle fixe (*crow*

block) ou du moufle mobile (*traveling block*). Cette opération de « filage » suivie par un coupe permet de prolonger la durée de vie du câble.

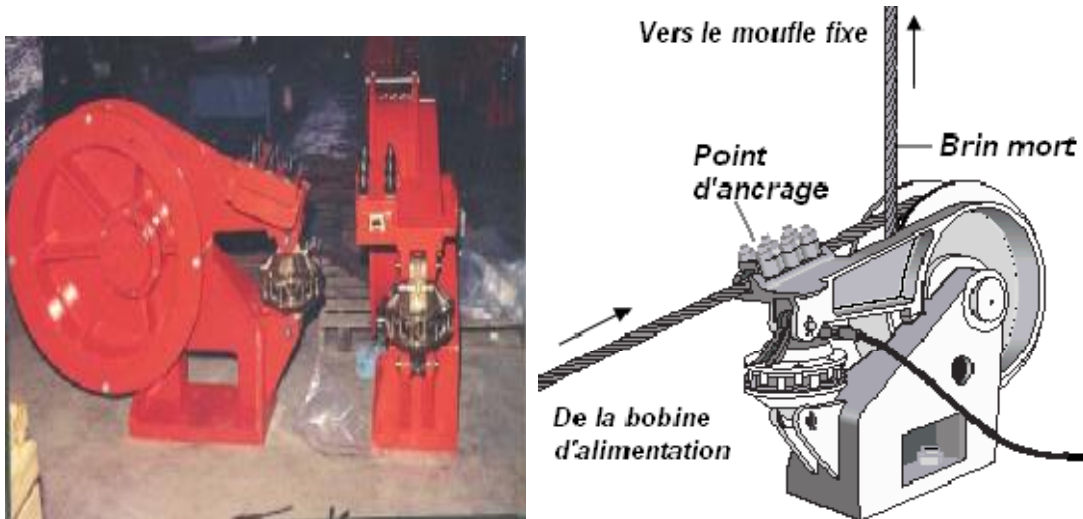


Fig.I.19. Le brin mort et le point d'encrage.

I.9. Le système de rotation (*rotating system*) :

C'est la partie caractérisant le forage rotary qui permet la transmission du mouvement de rotation à travers le train de tige au trépan. Il existe deux types d'appareils d'entraînement dans le système de rotation : la table de rotation et/ou la top drive (se dit aussi moteur suspendu) [3].

L'avancement de l'outil (trépan) dans l'opération de forage est assuré par le système de rotation qui comprend :

- La table de rotation et/ou la Top Drive ;
- La tige d'entraînement ;
- La tête d'injection.

Dans le forage, la vitesse de rotation est un paramètre important. Elle est choisie en fonction des formations géologiques traversées, de l'outil et de la charge appliquée [2].

I.9.1. La table de rotation :

I.9.1.1. Définition et rôle de la table de rotation :

La table de rotation (*rotary table*) est la pièce caractéristique qui donne à l'installation son nom « *rotary* ». Avant l'introduction de ce type d'équipement, le système de forage par outil au câble était d'emploi universel. L'appareil rotary apporte aux outils de forage la rotation induite par le moteur de la table de rotation.

La table de rotation est une machine extrêmement robuste et d'une longévité importante. Opérant à l'aide des gaines d'entraînement (« carré » d'entraînement), elle

entraîne la tige d'entraînement, et par suite la garniture et l'outil. Elle a également deux autres fonctions :

- Elle sert comme table pour les cales lors de la descente et de la remontée des tiges. En d'autres termes, la table de rotation soutient les cales qui supportent les tiges quand le crochet et les élévateurs sont dégagés.
- La table de rotation sert également à dévisser les joints des tiges lors de la remontée de la garniture

Deux autres points d'intérêt, plus récents, sont liés à la table de rotation : La commande et le tableau de manœuvre.

L'entraînement se compose généralement d'un pignon denté et d'une chaîne, un autre pignon denté faisant lui-même partie du treuil. Cependant, un moteur indépendant connecté directement à la table de rotation se retrouve également sur de nombreux appareils. Dans ce cas, l'entraînement se fait habituellement par un arbre (moteur) [2].

I.9.1.2. Composition de la table de rotation :

Une table de rotation se compose d'un bâti fixe supportant une partie mobile inférieure reposant sur la partie fixe par l'intermédiaire d'un roulement principal.

Cette partie mobile comprend une couronne circulaire dentée appelée grande couronne qui est attachée en bout d'arbre par l'intermédiaire d'une chaîne et d'une roue dentée située à son extrémité, elle transmet le mouvement de rotation à la tige d'entraînement [2].



Fig.I.20. La table de rotation

La partie fixe de la table forme le carter à l'huile, les dents du pignon conique barbotent dans cette huile, l'entraîne sur la grande couronne, d'où elle redescend sur les roulements.

Les dimensions nominales des tables sont les dimensions correspondant à leur ouverture centrale. Les tables de rotation sont prévues pour tourner à des vitesses allant de 40 à 50 tours par minute jusqu'à parfois 300 à 400 tours par minute. La rotation du train de tiges n'absorbe pas une puissance très élevée : c'est pourquoi certains constructeurs ont préféré entraîner directement la table de rotation à partir d'un moteur indépendant de faible puissance.

Cependant, dans la plupart des installations modernes, la roue dentée de l'arbre de la table de rotation est reliée par une chaîne à une roue dentée se trouvant sur l'arbre intermédiaire du treuil. Un seul des moteurs situés derrière le treuil suffit en général à actionner la table de rotation.

Un jeu de fourrures à section intérieure carrée ou circulaire permet d'équiper tour à tour la table de rotation pour l'entraînement de la tige carrée ou pour la mise en place des coins de retenue pendant la manœuvre de remontée ou de descente du train de sonde [2].

I.9.1.3. La Top Drive :

Dans le cas d'un forage vertical, la rotation est assurée par une table tournante (table de rotation) actionnée par un moteur électrique, cette table est munie d'une fourrure pour éviter l'usure de sa matrice.

Dans le cas d'un forage vertical, et même actuellement l'horizontal, la fonction rotation est assurée par la Top Drive. Cette dernière est actionnée par de l'huile pressurisée à 4000 psi (27580 KPa) délivrée par un compresseur hydraulique incorporé dans son bloc énergétique.

La Top Drive est équipée d'un arbre fileté et évidé pour permettre la fixation des garnitures et l'injection du fluide de forage à travers l'évidement. Une extrémité conique est prévue pour faciliter le guidage.

I.9.1.4. La tige d'entraînement :

La tige d'entraînement de section carrée, hexagonale ou triangulaire, est entraînée en rotation par la table et par l'intermédiaire du carré (*Kelly drive bushing*) monté autour de sa longueur courante.

Ce carré est constitué de quatre rouleaux à axe horizontal de forme appropriée pour transmettre le couple à la tige et par conséquent à la garniture de forage vissée sous le raccord inférieur.

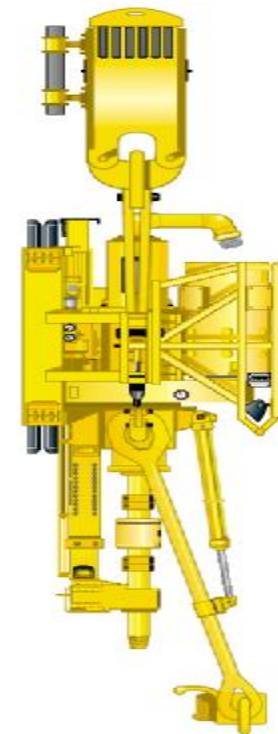


Fig.I.21.La Top Drive

L'ensemble peut coulisser longitudinalement. De longueur totale de 40 ft (12,19 m) ou de 54 ft (16,46 m), elle dispose respectivement d'une longueur utile de 37 ft (11,28 m) ou de 51 ft (15,54 m).

Pour des raisons de sécurité vis-à-vis d'une éruption possible par l'intérieur de la garniture, on monte des vannes à chaque extrémité de la tige d'entraînement (*lower Kelly*

valve et upper Kelly cock). Ces deux vannes sont opérées par rotation d'un quart de tour au moyen d'une clé que l'on conserve sur le plancher de forage. La vanne inférieure doit être de diamètre tel qu'elle puisse être descendue en cours de forage [6].

I.9.1.5. Le raccord d'usure (*Kelly saver sub*) :

A chaque ajout de tige, donc après avoir foré la longueur utile de la tige d'entraînement, il faut donc dévisser la Kelly puis la revisser sur la garniture. Cette fréquence de vissage étant grande, il est nécessaire de le faire au niveau de la connexion d'un raccord peu coûteux plutôt qu'à celui du raccord de la tige d'entraînement. Comme ce raccord est en rotation à l'intérieur des BOP, pour protéger de l'usure leur cavité, on fixe un protecteur caoutchouc autour du diamètre extérieur [6].

I.9.1.6. La tête d'injection (*Swivel*) :

La tête d'injection appartient autant à l'outillage de circulation de boue qu'à l'outillage de rotation. En effet, elle joue un double rôle :

- Elle sert de palier de roulement à l'ensemble du train de sonde pendant le forage ;
- Elle assure le passage de l'injection de boue venant d'une conduite fixe (flexible d'injection) dans une conduite animée d'un mouvement de rotation (train de sonde).

Elle comprend une partie fixe formant un carter fermé et, à l'intérieur, une partie mobile prolongée vers le bas par un raccord cylindrique sortant de la partie fixe et sur lequel vient se visser la partie supérieure de la tige carrée. La partie mobile repose sur la partie fixe par l'intermédiaire d'un roulement à billes principal qui peut avoir à supporter à la fois des charges et des vitesses de rotation assez élevées.

La tête d'injection se raccorde au flexible d'injection par un tube appelé, en raison de sa forme, « col de signe ». Ce tube fait un angle de 30° avec l'axe de rotation de la tête d'injection.

Juste au dessous du « col de signe », à l'intérieur de la tête d'injection, se trouve le tube d'usure qui pénètre dans la partie mobile, l'étanchéité étant assurée par des garnitures appelées, en raison de leur forme, « garnitures en V » et qui se trouvent placées entre le tube d'usure et la partie mobile. Un presse-étoupe situé à la partie inférieure empêche l'huile contenue dans la tête d'injection de fuir le long du raccord cylindrique. La durée de vie d'une tête d'injection dépend de la charge et de la vitesse de rotation auxquelles elle est soumise. Les normes d'emploi prévues par les constructeurs sont généralement basées sur une durée de vie de 3000 heures [2].

I.9.1.7. La tête d'injection motorisée :

Comme son nom l'indique, il s'agit d'une tête d'injection qui remplit les mêmes rôles que les têtes d'injection conventionnelles mais en plus, sert de transmission mécanique sur l'arbre rotatif. La motorisation peut être identique à celle des tables de rotation indépendante, c'est-à-dire par moteur électrique à courant continu, ou bien par moteur hydraulique. Cette dernière version de conception moins traditionnelle nécessite l'installation d'une unité de puissance hydraulique spécifique.

Si les avantages de cet équipement sont très intéressants, son installation présente un certain nombre de contraintes [6] :

- Installation d'un système de guidage dans la tour pour absorber le couple réactif,
- Renforcement de la structure compte tenu de cet effort de torsion supplémentaire,
- Rehaussement de la tour, car la tête d'injection motorisée est plus longue qu'une tête conventionnelle,
- Flexibles ou câbles d'alimentation supplémentaires dans la tour de forage,
- Augmentation notable du poids en hauteur,
- Investissement supplémentaire et surtout maintenance beaucoup plus importante par rapport au système table de rotation et tige d'entraînement.

Mais les avantages suivants imposent dorénavant l'utilisation de ce système lorsqu'il s'agit d'opérations de développement coûteuses.

- Pas de manipulation de Kelly,
- -Reconnexion sur la garniture en manœuvre à n'importe quelle hauteur,
- Forage par triple possible,
- Remontée en rotation et circulation (*back reaming*),
- Carottage en grande longueur,
- Dégerbage de la garniture supprimé entre deux puits de développement lorsque le déplacement de l'appareil de forage peut se faire mât levé et gerbage dans la tour,
- Possibilité d'application d'un couple statique pendant un temps indéterminé (seulement dans le cas d'une tête motorisée hydrauliquement).

Ajouté à ces systèmes, il existe encore un autre système qui est ni producteur ni consommateur d'énergie. Celui-ci permet de contrôler et de sécuriser le puits en cas de danger (*well control*). Le BOP système (*Blowout Preventers*) est le dispositif de fermeture du puits en cas de venue.

I.10. Conclusion :

Tout appareil de forage rotatoire est caractérisé par trois fonctions principales : La fonction pompage, la fonction levage et la fonction rotation. Ces trois fonctions sont assurées par des organes dimensionnés et conçus spécialement pour cet effet. Donc pour la réalisation d'un puits de pétrole ces fonctions sont combinées de manière à traverser les couches géologiques de la surface jusqu'à atteindre le réservoir.

Chapitre II :

La rhéologie des fluides de forage et les pertes de charge

Dans une conduite, tout fluide en mouvement perd une partie de son énergie par dissipation en forces de frottements :

- Frottement interne au fluide dû à sa viscosité.
- Frottement externe dû à la rugosité des parois de la conduite.

Cette perte d'énergie est appelée perte de charge. Elle s'exprime par la différence de pression du fluide entre deux points de la conduite. Par exemple, la boue de forage en circulation possède au départ une énergie représentée par la pression à la sortie de la pompe. Cette énergie est entièrement perdue dans le circuit boue puisque, au retour dans les bassins, la pression de la boue est nulle. La pression à la sortie de la pompe exprime, dans ce cas, la somme des pertes de charges dans le circuit [7].

Ces pertes de charges se produisent :

- Dans le circuit de surface.
- A l'intérieur des tiges et masses tiges.
- A travers l'outil.
- Dans l'espace annulaire trou - garniture de forage.

Les équations des pertes de charge sont fonction :

- De la rhéologie du fluide.
- De la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent).
- De la géométrie de la conduite.

II.1. La rhéologie :

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

Une force appliquée à un corps lui fait subir une déformation. Pour un solide, il y aura déformation élastique si le corps revient à son état premier dès qu'on cesse d'appliquer cette force (c'est le cas de l'élastique que l'on étire) ou déformation plastique s'il revient à son état premier sous l'action d'autres forces (c'est le cas de la boule de mastique que l'on déforme). Pour un fluide l'action d'une force donne un écoulement.

L'importance des propriétés rhéologiques (propriétés d'écoulement) des fluides de forage et des laitiers de cimentation n'est plus à démontrer. Les propriétés d'écoulement ont, en effet, une incidence directe sur le déroulement des opérations de forage. Leur ajustement correct contribue à l'obtention d'un puits bien calibré, dans les meilleurs délais et avec toutes les conditions de sécurité désirables [10].

II.2. Les régimes d'écoulement :

Il existe deux régimes d'écoulement :

- Les régimes permanents.
- Les régimes transitoires

II.2.1. Les régimes permanents :

L'écoulement y est parfaitement établi. Parmi ceux-ci, se classent :

II.2.1.1. Le régime laminaire (*Laminar Flow*) :

Dans lequel chaque lame de fluide se déplace, l'une par rapport à l'autre, parallèlement à la direction de l'écoulement avec une vitesse propre. Pour l'écoulement dans un tube cylindrique, la vitesse est maximale le long de l'axe du tube, elle est nulle à la paroi s'il n'y a pas de glissement.

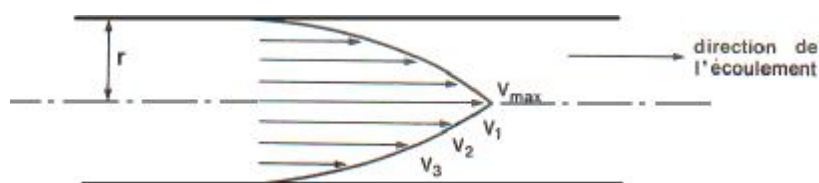


Fig. II.1. Représentation d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique.

II.2.1.2. Le régime turbulent (*Turbulent Flow*) :

Caractérisé par la formation de petits tourbillons répartis dans toute la masse du fluide.

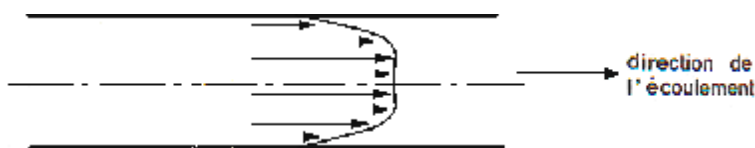


Fig. II.2. Représentation d'un écoulement turbulent dans une conduite cylindrique.

II.2.1.3. L'écoulement en bouchon (*Plug flow*) :

Le fluide se déplace le long du tube à la manière d'un bouchon. Le long d'un rayon, la vitesse est constante. L'écoulement en bouchon n'existe que pour certaines catégories de fluides. Une suspension de bentonite (fluide plastique) peut s'écouler en bouchon, contrairement à l'eau, au gasoil ou à une solution de glycérine.

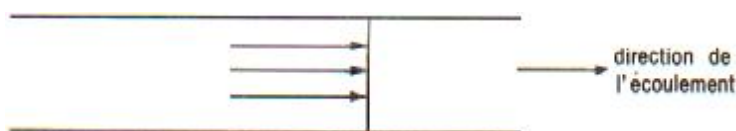


Fig. II.3. Représentation d'un écoulement en bouchon dans une conduite cylindrique.

II.2.2. Les régimes transitoires :

Les conditions d'écoulement viennent d'y être modifiées et le régime définitif n'y est pas encore établi. Le régime est transitoire, par exemple, pendant la mise en vitesse d'un fluide lors d'un changement de débit, durant un changement de section, etc.

Pour un fluide de caractéristiques données circulant dans un tube cylindrique rectiligne de géométrie donnée, on aura, en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement V :

- pour un fluide ne présentant pas l'écoulement en bouchon :

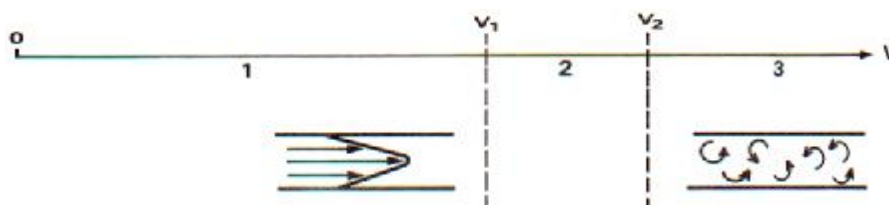


Fig. II.4. Représentation schématisée d'une transition d'écoulement de régime laminaire vers le turbulent.

1. Régime laminaire (permanent)
 2. Zone de transition laminaire - turbulent.
 3. Régime turbulent (permanent en moyenne).
- pour un fluide présentant un écoulement en bouchon :

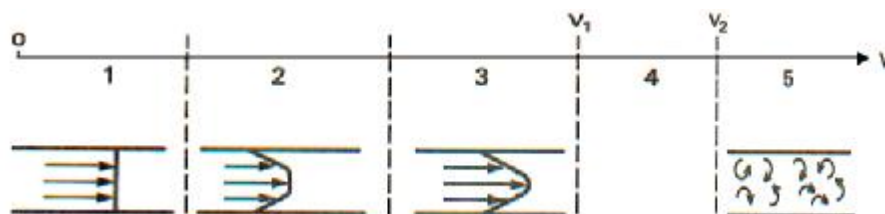


Fig. II.5. Représentation schématisée des transitions de l'écoulement en bouchon vers le régime turbulent.

1. Ecoulement en bouchon (permanent)
 2. L'épaisseur du noyau central diminue quand V augmente (transitoire).
 3. Régime laminaire (permanent).
 4. Zone de transition laminaire – turbulent.
 5. Régime turbulent (permanent en moyenne).
- V_1 : représente la vitesse critique correspondant à la fin du régime laminaire ;
- V_2 : représente la vitesse critique correspondant au début du régime turbulent.

II.3. Les caractéristiques rhéologiques :

Dans des conditions de température et de pression données, les fluides sont caractérisés :

a- Par leur comportement en régime transitoire représenté par le temps de réponse aux modifications d'écoulement.

b- Par leur comportement en régime laminaire caractérisé par la courbe d'écoulement expérimentale ou rhéogramme. Les coefficients constants de l'équation d'écoulement représentant cette courbe sont les paramètres rhéologiques, caractéristiques du fluide.

L'équation d'écoulement relie, en régime laminaire, la tension de cisaillement τ et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (ou vitesse de cisaillement ou vitesse de déformation). Pour un fluide donné, elle dépend de la pression et de la température.

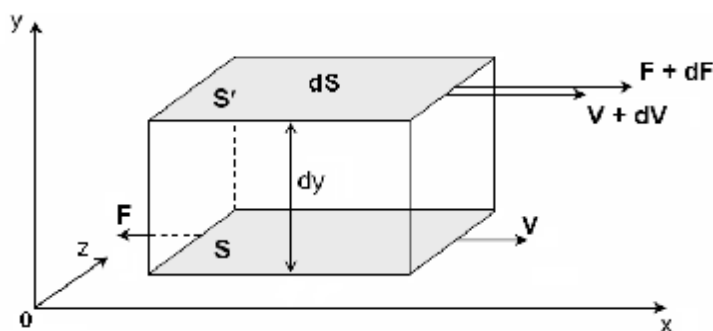


Fig. II.6. Représentation d'un élément de volume d'un fluide en mouvement longitudinal.

La signification des grandeurs représentées dans la figure (II.6) pour un écoulement longitudinal dans la direction (O, X) est la suivante : La vitesse V du fluide est uniquement fonction de Y . Au sein de cet écoulement, on considère deux faces S et S' d'aire dS et distantes de dY . Les facettes « fluides » ont des vitesses V et $V + dV$. En les considérant comme appartenant à un domaine élémentaire parallélépipède, l'action du fluide environnant peut se réduire, pour S à la force F et pour S' à la force $F + dF$.

La tension de cisaillement (*shear stress*) résultante appliquée à S et S' peut alors être définie par le rapport :

$$t = \frac{dF}{dS} = \frac{\text{différence de force entre deux lames voisines}}{\text{surface entre deux lames}} \quad [\text{Barye}] \quad (\text{II.1})$$

Et le taux de cisaillement (shear rate) par:

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dY} = \frac{\text{différence de vitesses entre deux lames voisines}}{\text{distance entre deux lames}} \quad [s^{-1}] \quad (\text{II.2})$$

On définit, pour un taux de cisaillement spécifié, la viscosité apparente (m_a) :

$$m_a = \frac{t}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Barye.s}] \text{ ou } [\text{Poise}] \quad (\text{II.3})$$

On considère souvent la tension, le taux de cisaillement et la viscosité apparente à la paroi du solide dans lequel se produit l'écoulement.

II.4. Détermination expérimentale des caractéristiques rhéologiques :

Dans la pratique, les appareils utilisés sont :

II.4.1. Le viscosimètre Marsh :

C'est un appareil de type statique : on mesure le temps en secondes que mets une certaine quantité de boue pour s'écouler à travers l'ajustage de l'appareil qui n'est qu'un entonnoir normalisé.

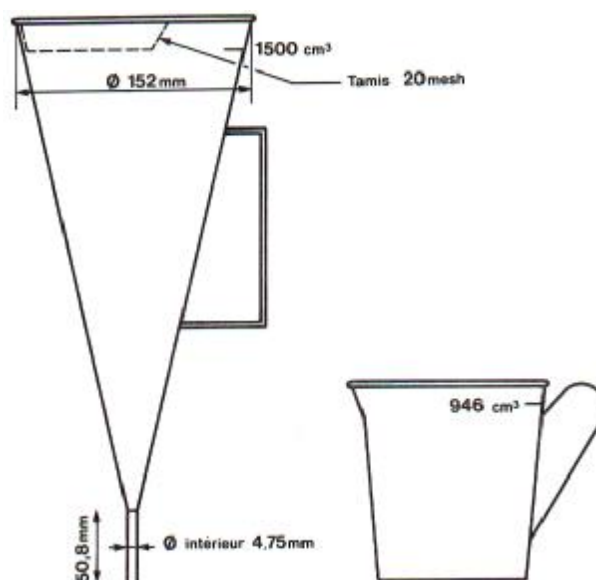


Fig. II.7. Représentation schématisée d'un viscosimètre de Marsh.

II.4.2. Le viscosimètre Fann :

Le viscosimètre Fann A35 est le plus répandu dans le domaine du forage. Son principe est le suivant : 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.

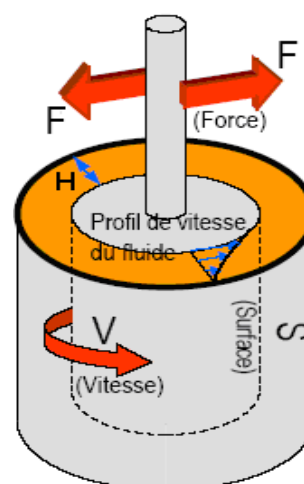


Fig. II.8. Le viscosimètre Fann A35 et le schéma de son principe de fonctionnement.

II.4.2.1. Les formule du viscosimètre Fann :

Les dimensions de l'appareil sont [10]:

r_e : Rayon du cylindre extérieur ($r_e = 1,842. \text{ cm}$).

r_i : Rayon du cylindre intérieur. ($r_i = 1,725. \text{ cm}$).

h : La hauteur d'immersion des cylindres ($h = 3,8 \text{ cm}$).

Le couple exercé sur le cylindre intérieur est proportionnel au déplacement de la graduation. Il est donné par l'expression [10] :

$$C = k \Theta \quad [\text{dynes.cm}] \quad \text{(II.4)}$$

Θ : La lecture de la graduation sur l'appareil ($\text{lbf} / 100 \text{ft}^2$)

k : La constante du ressort de l'appareil ($k = 387. \text{ dynes} \cdot \text{cm} / (\text{lbf} / 100 \text{ft}^2)$).

La tension de cisaillement à la paroi du cylindre intérieur est donnée par la formule[10] :

$$t_i = \frac{C}{2p.r_i^2(h+e)} = \frac{k.\Theta}{2p.r_i^2(h+e)} \quad \text{(II.5)}$$

e étant un terme correctif homogène à une longueur tenant compte des effets d'extrémité

$$t_i = 5,1 \Theta \quad [\text{Barye}] \quad \text{(II.6)}$$

Le taux de cisaillement à la paroi du cylindre intérieur est :

$$\dot{\gamma}_i = \frac{2.\Omega}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e}\right)^2} \quad \text{(II.7)}$$

Sachant que $\Omega = \frac{2p N}{60}$ $[\text{tr} / \text{s}]$ est la vitesse angulaire du rotor du viscosimètre et N est le nombre de tours par minute, on aura alors :

$$\dot{\gamma}_r = \frac{4p N}{60 \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^2 \right]} \quad [s^{-1}] \quad (\text{II.8})$$

$$\dot{\gamma}_r = 1,7 N \quad [s^{-1}] \quad (\text{II.9})$$

La formule (II.9) nous permet de tracer le tableau suivant [10] :

N (tr / min)	600	300	200	100	6	3
$\dot{\gamma}_r$ (s^{-1})	1020	510	340	170	10	5

Tableau II.1 : La correspondance entre N et $\dot{\gamma}_r$.

La norme API définit, pour les fluides de forage et les laitiers de ciments, la viscosité apparente m_a dans des conditions expérimentales correspondant à un taux de cisaillement de 1020 s^{-1} soit une vitesse du rotor du viscosimètre Fann de $600 \text{ tr} / \text{min}$ [10]. Si m_a est exprimée en *Poise*, on a, en combinant les formules (II.3), (II.6) et (II.9) :

$$m_a = \frac{t}{\dot{\gamma}} = \frac{5,1 \Theta_{600}}{1020} \quad [Poise] \quad (\text{II.10})$$

$$m_a = 5.10^{-3} \Theta_{600} \quad [Poise] \quad (\text{II.11})$$

II.5. Les équations rhéologiques :

La rhéologie classe les fluides en :

- Fluides newtoniens ;
- Fluides non newtoniens.

Des modèles mathématiques expliquent le comportement dynamique de chacun des types de fluides. L'exploitation pratique des caractéristiques rhéologiques détermine le type de fluide et le modèle rhéologique correspondant :

II.5.1. Les fluides newtoniens :

Pour ces fluides, la tension de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement. L'équation rhéologique est :

$$t = m \dot{\gamma} \quad (\text{II.12})$$

En coordonnées cartésiennes, on a la représentation suivante :

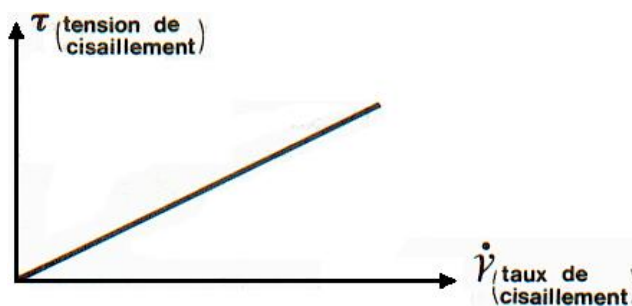


Fig. II.9 : Le rhéogramme type d'un fluide de NEWTON en coordonnées cartésiennes.

La courbe est une droite passant par l'origine ; le fluide se met en mouvement dès qu'une force supérieure à zéro lui est appliquée. Ce type de fluide est représenté par l'eau et le gazoil par exemple. Pour un fluide newtonien, le rapport $m_a = \frac{t}{\dot{\gamma}}$ est constant à température et pression constantes.

II.5.2. Les fluides non newtoniens :

Les deux types de fluides non newtoniens les plus fréquemment utilisés dans les boues de forage et les laitiers de cimentation sont :

- Les fluides Binghamiens;
- Les fluides d'Ostwald.

II.5.2.1. Les fluides binghamiens :

II.5.2.1.1. Définition :

Pour les fluides plastiques Binghamiens, la tension de cisaillement varie linéairement avec le taux de cisaillement mais, à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire

d'appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement. Cette force correspond à la tension limite de cisaillement (*yield value ou yield point*). Ces fluides sont caractérisés par deux constantes :

t_0 : Tension de cisaillement qui correspond à la force minimale pour provoquer l'écoulement ;

m_p : Viscosité plastique qui correspond au rapport de la variation de la tension de cisaillement à la variation correspondante du taux de cisaillement, autrement dit à la pente de la courbe représentant t en fonction de $\dot{\gamma}$

Théoriquement, l'équation d'écoulement est :

$$t = t_0 + m_p \dot{\gamma} \quad (\text{II.13})$$

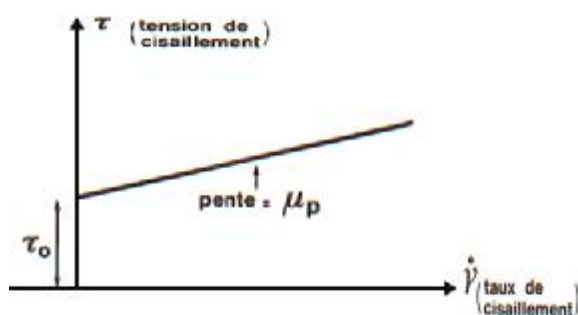


Fig. II.10. Le rhéogramme type d'un fluide de BINGHAM en coordonnées cartésiennes.

La courbe expérimentale obtenue à l'aide du viscosimètre Fann A35 s'écarte de la droite théorique, comme le montre la figure (II.11).

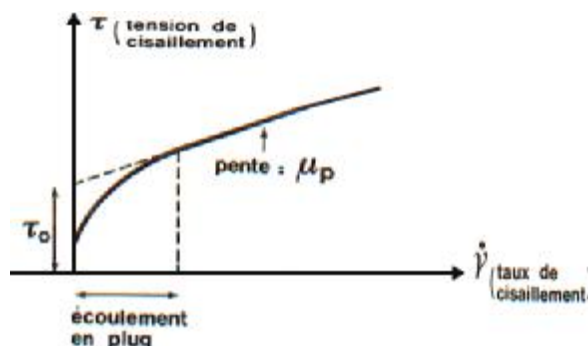


Fig. II. 11. Courbe expérimentale représentative du modèle de BINGHAM.

II.5.2.1.2. Détermination de la viscosité plastique et la yield value :

- Détermination de la viscosité plastique :

Le plus souvent, le viscosimètre Fann ne permet de disposer que de quatre points de mesure, les lectures correspondant à 3 et 6 tr/min n'étant pas exploitables si le fluide possède une yield value (écoulement en bouchon ou plug flow).

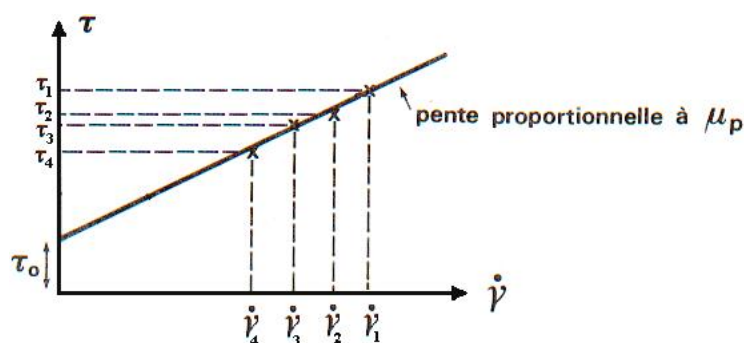


Fig. II. 12. Représentation graphique de la droite de régression linéaire pour le modèle de BINGHAM.

L'équation de BINGHAM représente la droite de régression linéaire qui prend en considération les quatre points de mesure exploitables.

Le coefficient de la régression linéaire de t en $\dot{\gamma}$ est appelé viscosité plastique qui est donnée par l'expression suivante [10] :

$$m_p = \frac{\sum t_i \dot{\gamma}_i - m \bar{t} \bar{\dot{\gamma}}}{\sum \dot{\gamma}_i^2 - m \bar{\dot{\gamma}}^2} \quad [Poise] \quad (\text{II.14})$$

Avec : $\bar{t} = \frac{\sum t_i}{m}$ et $\bar{\dot{\gamma}} = \frac{\sum \dot{\gamma}_i}{m}$

t_i : La tension de cisaillement (Barye).

\bar{t} : La moyenne des tensions de cisaillement (Barye).

$\dot{\gamma}_i$: Le taux de cisaillement (s^{-1}).

$\bar{\dot{\gamma}}$: La moyenne des taux de cisaillement (s^{-1}).

m : Le nombre de prise de mesures (nombre de lectures Fann).

- Détermination de la yield value :

La yield value est déterminée grâce à l'équation de Bingham (II.13) d'où on peut déduire la formule suivante:

$$t_0 = t - m_p \dot{\gamma} \quad (\text{II.15})$$

II.5.2.2. Les fluides D'OSTWALD (Modèle en puissance) :**II.5.2.2.1. Définition :**

Les fluides pseudo plastiques d'OSTWALD se mettent en mouvement dès qu'on leur applique une force de cisaillement aussi faible soit-elle ; mais la tension de cisaillement n'est pas proportionnelle au taux de cisaillement. Elle est proportionnelle à la puissance $n^{\text{ième}}$ de celui-ci, d'où l'appellation également utilisée de « fluide en puissance ».

L'équation d'écoulement est :

$$t = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{II.16})$$

Avec :

t : Tension de cisaillement (Barye).

K : L'indice de consistance (Barye .sⁿ).

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement (s⁻¹).

n : Indice de comportement rhéologique (Power Law Index).

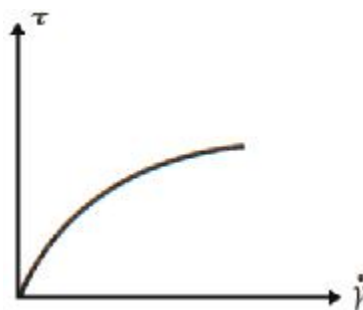


Fig. II.13. Le rhéogramme type d'un fluide d'OSTWALD en coordonnées cartésiennes.

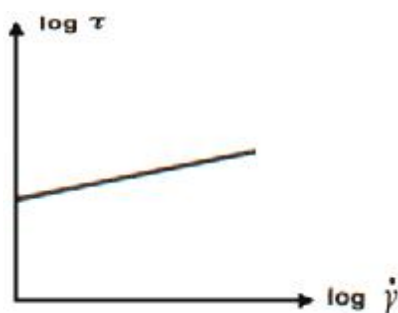


Fig. II.14. Le rhéogramme type d'un fluide d'OSTWALD en coordonnées logarithmiques.

Remarque :

n est toujours inférieur ou égal à 1. Pour $n=1$, on retrouve l'équation d'écoulement d'un fluide newtonien de viscosité K .

En coordonnées logarithmiques, la courbe d'écoulement et la droite d'équation est :

$$y = \text{Log}K + n.x \quad (\text{II.17})$$

Avec : $y = \text{Log}t$ et $x = \text{Log}\dot{\gamma}$

$$\text{Alors on a :} \quad \text{Log}t = \text{Log}K + n.\text{Log}\dot{\gamma} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2.2.2. Détermination de l'indice rhéologique n et de l'indice de consistance K :

- Détermination de l'indice rhéologique n :

L'indice rhéologique n représente la pente de la droite dont l'équation est donnée par la formule (II.16).

$$n = \frac{\text{Log}t - \text{Log}t'}{\text{Log}\dot{\gamma} - \text{Log}\dot{\gamma}'} = \frac{\text{Log}(t/t')}{\text{Log}(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}')} \quad (\text{II.19})$$

$$n = \frac{\text{Log}(t/t')}{\text{Log}(1020/510)} = \frac{\text{Log}(t/t')}{0,3010} \quad (\text{II.20})$$

$$n = 3,32 \text{ Log}(t/t') \quad (\text{II.21})$$

Avec :

t La tension de cisaillement correspondant au taux de cisaillement $\dot{\gamma} = 1020.s^{-1}$

t' La tension de cisaillement correspondant au taux de cisaillement $\dot{\gamma} = 510.s^{-1}$

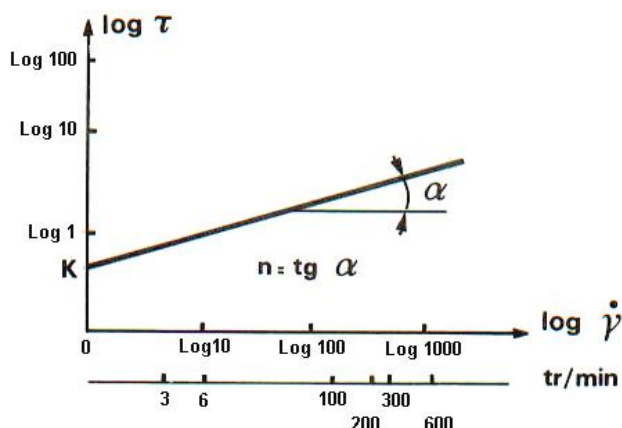


Fig. II.15. La détermination graphique des indices n et K pour un fluide d'OSTWALD en coordonnées logarithmiques.

- Détermination de l'indice de consistance K :

L'indice de consistance est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{t}{\dot{\gamma}^n} \quad (\text{II.22})$$

Remarque :

Si t est donné en *Barye*, K s'exprime en *Barye* $.s^n$

II. 6. Application aux fluides de forage et aux laitiers de cimentation :

La détermination des grandeurs liées à la rhéologie des boues de forage et des laitiers de cimentation présente quelques difficultés ayant pour origines :

II.6.1. Les propriétés des fluides :

Les fluides sont non newtoniens. Ils ne répondent pas exactement aux lois rhéologiques limites précédemment définies, mais sont généralement intermédiaires. Les caractéristiques rhéologiques évoluent par suite des variations de pression et de température dans le puits.

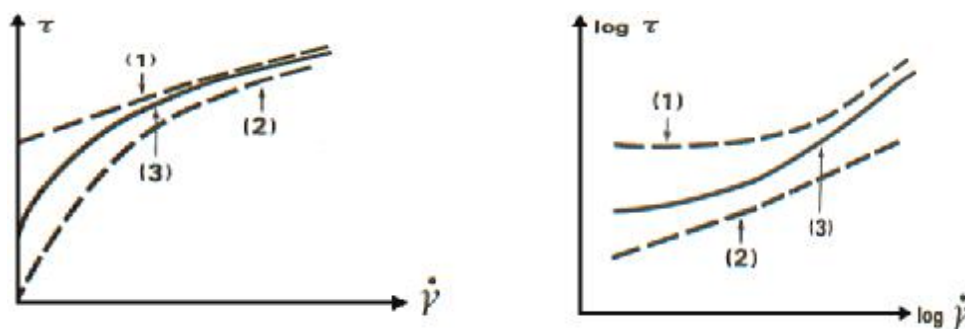


Fig. II. 16. Les courbes représentatives des comportements dynamiques des fluides.

(1) : Fluide de BINGHAM.

(2) : Fluide d'OSTWALD.

(3) : Boue de forage ; Laitiers de cimentation.

II.6.2. La géométrie :

Elle est définie avec imprécision (irrégularités des parois, excentricité, cavage...). L'écoulement annulaire fait appel à des méthodes de traitement approchées.

II.6.3. La complexité des mouvements:

A l'écoulement longitudinal, s'ajoutent :

- Pendant la mise en place du laitier, éventuellement, le mouvement dû aux déplacements relatif du tubage (mouvement de va et vient, rotation) ;
- La recherche de solutions rigoureuses entraînerait des développements souvent compliqués que les approximations effectuées sur les données et la précision souhaitées ne justifieraient pas.
- Certaines simplifications sont consenties en pratique pétrolière. Elles sont résumées ci-après :
 - Les irrégularités du puits, les mouvements des tiges ou du tubage pendant la circulation, l'influence de la pression et de la température sur la rhéologie sont négligées ;
 - L'écoulement dans l'annulaire est assimilé à l'écoulement entre deux plaques parallèles de longueur infinie ;
 - Le fluide répond à la loi de BINGHAM ou à la loi d'OSTWALD.
 - Pour chaque taux de cisaillement, le fluide est caractérisé par une viscosité équivalente m_e définie selon le tableau (II.3).

II.7. Choix du modèle rhéologique :

Le choix se portera sur le modèle rhéologique se rapprochant le plus :

- Soit du modèle de BINGHAM ;
- Soit du modèle d'OSTWALD.

Les courbes d'écoulement représentées graphiquement, soit en coordonnées cartésiennes, soit en coordonnées logarithmiques, ne permettent pas de faire ce choix. Le coefficient de corrélation le plus voisin de 1 indiquera le modèle à choisir pour la suite des calculs.

Ce coefficient de corrélation est donné par la formule [10]:

$$r = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{\left(m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right) \left(m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \right)}} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

m : Le nombre de prises de mesures (nombre de lecture Fann).

x_i Le taux de cisaillement ou Log taux de cisaillement ($\dot{\gamma}_i$ ou $\text{Log} \dot{\gamma}_i$)

y_i La tension de cisaillement ou Log tension de cisaillement (t_i ou $\text{Log} t_i$)

Remarque :

- Si le modèle de BINGHAM est retenu, on détermine la viscosité plastique m_p et la yield value t_0 correspondantes.
- Si le modèle d'OSTWALD est retenu, on détermine l'indice de comportement rhéologique n et l'indice de consistance K correspondants.

II.8. Détermination du régime d'écoulement :

Modèle	Intérieur des tiges et des tubages	Annulaire
NEWTON	$\text{Re} = \frac{rVD}{m}$ $\text{Re}_c = 2100$	$\text{Re} = \frac{0,8165(D_0 - D_i)Vr}{m}$ $\text{Re}_c = 2100$

BINGHAM	$\text{Re} = \frac{rVD}{m_e}$ $\text{Re}_c = 2100$	$\text{Re} = \frac{0,8165(D_0 - D_i)Vr}{m_e}$ $\text{Re}_c = 2100$
OSTWALD	$\text{Re} = \frac{rVD}{m_e} \frac{4n}{3n+1}$ $\text{Re}_c = 3470 - 1370n$	$\text{Re} = \frac{0,8165(D_0 - D_i)Vr}{m_e} \frac{3n}{2n+1}$ $\text{Re}_c = 3470 - 1370n$

Tableau II.2 : L'expression du nombre de Reynolds et de sa valeur critique.

Les expressions de la viscosité équivalente sont reportées dans le tableau suivant :

Modèle		BINGHAM	OSTWALD
Ecoulement			
Laminaire	Tiges	$m_e = \frac{tD}{8V} = m_p + \frac{t_0 D}{8V}$	$m_e = \frac{t}{\mathcal{G}} = K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}$
	Annulaire	$m_e = \frac{t(D_0 - D_i)}{12V}$ $= m_p + \frac{t_0(D_0 - D_i)}{12V}$	$m_e = \frac{t}{\mathcal{G}}$ $= K \left(\frac{12V}{D_0 - D_i} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}$
Turbulent	Tiges	$m_e = m_p$ <p>(on néglige l'influence de t_0)</p>	$m_e = \frac{t}{\mathcal{G}} = K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}$
	Annulaire		$m_e = \frac{t}{\mathcal{G}}$ $= K \left(\frac{12V}{D_0 - D_i} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}$

Tableau II.3 : Les expressions de la viscosité équivalente.

II.9. Calcul des pertes de pression :

L'expression générale des pertes de charge ΔP entre deux points séparés par une distance L est de la forme [10]:

Pour un tube cylindrique :

$$\Delta P = \frac{f L r V^2}{2D} \quad (\text{II.24})$$

$$\text{Pour un annulaire : } \Delta P = \frac{f L r V^2}{2j_e} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$j_e = 0,8165(D_0 - D_i)$: Le diamètre hydraulique de la conduite [cm].

L : La longueur parcourue par le fluide [m].

V : La vitesse du fluide [m/s].

r : La masse volumique du fluide [g/cm³].

f_r est le coefficient de frottement. Il dépend :

- Du type de fluide ;
- Du régime d'écoulement ;
- Du nombre de Reynolds.

En régime laminaire, pour tous les fluides [10]: $f = \frac{16}{\text{Re}}$

En régime turbulent, pour les fluides de BINGHAM et les fluides de NEWTON [10]:

$$f = \frac{0,05}{\text{Re}^{0,2}}$$

En régime turbulent, pour les fluides d'OSTWALD [10]: $f = \frac{c}{\text{Re}^b}$ avec $\begin{cases} c = \frac{\text{Log}n + 2,5}{50} \\ b = \frac{1,4 - \text{Log}n}{7} \end{cases}$

Les expressions des équations de pertes de charge pour le modèle de NEWTON sont données dans le tableau suivant :

Formules	Circulation dans les tiges	Circulation dans l'annulaire
(1) Laminaire	$\Delta P_t = \frac{128 Q L m}{p \cdot D^4}$	$\Delta P_a = \frac{192 \cdot Q L m}{p \cdot (D_0 + D_i)(D_0 - D_i)^3}$
(2) Turbulent	$\Delta P_t = \frac{1,2126 L r^{0,8} Q^{1,8} m^{0,2}}{p^{1,8} D^{4,8}}$	$\Delta P_a = \frac{1,5465 L r^{0,8} Q^{1,8} m^{0,2}}{p^{1,8} (D_0 + D_i)^{1,8} (D_0 - D_i)^3}$

Tableau II.4 : Les équations de pertes de charge pour le modèle de NEWTON.

Les expressions des équations de pertes de charge pour le modèle de BINGHAM, sont données dans le tableau suivant [10]:

Formules	Circulation dans les tiges	Circulation dans l'annulaire
(1) Laminaire	$\Delta P_t = \frac{128 L Q m_p}{p D^4} + \frac{4 t_0 L}{D}$	$\Delta P_a = \frac{192 Q L m_p}{p (D_0 + D_i)(D_0 - D_i)^3} + \frac{4 t_0 L}{(D_0 - D_i)}$
(2) Turbulent	$\Delta P_t = \frac{1,2126 L r^{0,8} Q^{1,8} m_p^{0,2}}{p^{1,8} D^{4,8}}$	$\Delta P_a = \frac{1,5465 L r^{0,8} Q^{1,8} m_p^{0,2}}{p^{1,8} (D_0 + D_i)^{1,8} (D_0 - D_i)^3}$

Tableau II.5 : Les équations de pertes de charge pour le modèle de BINGHAM.

Les expressions des équations de pertes de charge pour le modèle d'OSTWALD sont données dans le tableau suivant [10]:

Formules	Circulation dans les tiges
(1) Laminaire	$\Delta P_t = \frac{4KL}{D} \left[\frac{Q}{pD^3} \frac{(24n+8)}{n} \right]^n$
(2) Turbulent	$\Delta P_t = \frac{32(\text{Log } n + 2,5) r Q^2 L}{50 p^2 D^5} \left[\frac{p^2 D^4 K \left(\frac{Q}{pD^3} \frac{24n+8}{n} \right)^n}{128 Q^2 r} \right]^{\frac{1,4 - \text{Log } n}{7}}$
	Circulation dans l'annulaire
(3) Laminaire	$\Delta P_a = \frac{4KL}{(D_0 - D_i)} \left[\frac{Q}{p (D_0 + D_i)(D_0 - D_i)^2} \frac{(32n+16)}{n} \right]^n$
(4) Turbulent	$\Delta P_t = \frac{3\lambda \text{Log } n + 2,5) r Q^2 L}{500,8165 p^2 (D_0 + D_i)^2 (D_0 - D_i)^3} \left[\frac{p^2 (D_0 + D_i)^2 (D_0 - D_i)^2 K \left(\frac{Q}{p(D_0 + D_i)(D_0 - D_i)^2} \frac{32n+16}{n} \right)^n}{1920,8165 Q^2 r} \right]^{\frac{1,4 - \text{Log } n}{7}}$

Tableau II.6 : Les équations de pertes de charge pour le modèle d'OSTWALD.

L'expression de l'équation de pertes de charge singulière aux duses de l'outil, est donnée par [10]:

$$\Delta P_e = \frac{r Q^2}{1,975 C_e^2 A^2} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

A : Surface totale de passage aux duses de l'outil [cm^2].

C_e : Coefficient d'évent :

$C_e = 0,80$ pour un outil conventionnel ;

$C_e = 0,95$ pour un outil à jets.

Les expressions des équations de pertes de charge dans les installations de surface correspondant aux types d'équipement numéro 03 sont données dans le tableau suivant [10] :

Modèle	L'expression
BINGHAM	$\Delta P_s = 1,829 \cdot 10^{-6} r^{0,8} Q^{1,8} m_p^{0,2}$
OSTWALD	$\Delta P_s = 2,2424 \cdot 10^{-6} (\text{Log } n + 2,5) r Q^2 \left[\frac{7,071 \cdot K \left(\frac{Q}{14,673} \frac{3n+1}{n} \right)^n}{Q^2 r} \right]^{\frac{1,4 - \text{Log } n}{7}}$

Tableau II.7 : Les équations de pertes de charge dans les équipements de surface.

Remarque :

Les équations du tableau II.7 sont données dans un système hybride appelé système de la profession, contrairement aux autres équations qui sont données dans le système [CGS].

Alors :

ΔP_s : Les pertes de charge dans l'équipement de surface numéro 03. [bar].

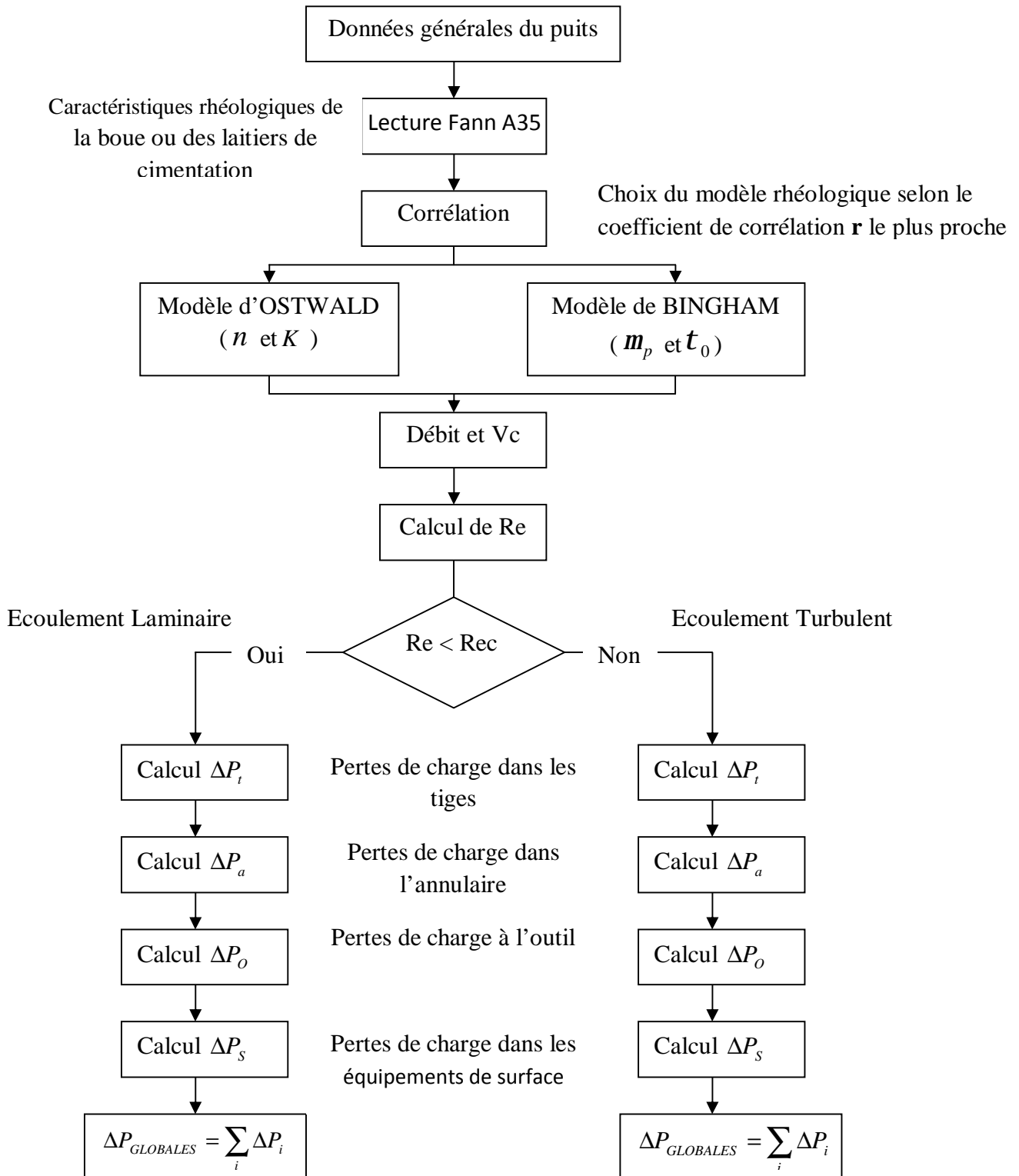
r : La masse volumique, [Kg/dm^3].

Q : Le débit, [l/min].

m_p : La viscosité plastique, [Cp]

K : L'indice de consistance, [$Lbf \cdot s^n / 100 ft^2$], n : L'indice de comportement rhéologique.

II.10. Organigramme de la méthode de calcul des pertes de charge :



II.11. La puissance requise à la fonction pompage :**II.11. 1. Introduction**

La fonction pompage doit assurer la circulation du fluide de forage (boue de forage) pendant la réalisation du puits. Les pompes à boue doivent assurer un débit compatible avec le rendement optimal de l'outil utilisé.

Les pompes à boue sont désignées par :

- La puissance maximale admissible à l'entrée.
- L'alésage maximum des chemises.
- La longueur de la course du piston.

II.11.2. Le débit théorique :

Le débit théorique d'une pompe à boue est calculé en considérant sa cylindrée, sa vitesse de pompage (nombre de coup par minute) et le nombre de cylindres.

Le débit théorique d'une pompe triplex a pour expression :

Débit théorique = Volume d'un cylindre x Nombre de cylindres x Nombre de coups par minute du piston

$$Q_{th} [in^3 / \text{min}] = \left(\frac{P}{4} \cdot D_c^2 \cdot L \right) [in^3] \cdot (N^{bre \text{ de cylindres}}) \cdot (n) [cps / \text{min}]$$

Sachant que : $1 \text{ in}^3 = 0,0163871 \text{ litres}$

$$Q_{th} [l / \text{min}] = \left(\frac{P}{4} \cdot 0,0163871 \cdot D_c^2 \cdot L \right) [l] \cdot (3) \cdot (n) [cps / \text{min}]$$

$$Q_{th} = 0,0386 \times D_c^2 \times L \times n \quad [l / \text{min}] \quad \text{(II.27)}$$

Avec :

Q_{th} : Débit théorique de la pompe (l/min).

n : Nombre de coups par minute (cps/min).

L : La course du piston (pouces).

D_c : Diamètre de la chemise (pouces).

II.11.3. Le débit réel et le rendement volumétrique :

Les pertes de fluide au niveau des pistons et des clapets de la pompe à boue et la nature du fluide en circulation causent un remplissage incomplet des cylindres. Par conséquent, le débit réel d'une pompe à boue est toujours inférieur au débit théorique.

On appelle rendement volumétrique d'une pompe le rapport entre le débit réel et le débit théorique [7] :

$$h_v = \frac{Q_r}{Q_{th}} \quad \text{(II.28)}$$

Avec :

h_v : Le rendement volumétrique.

Q_r : Le débit réel (l/min).

Q_{th} : Le débit théorique (l/min).

II.11.4. Détermination du rendement volumétrique :

L'appareil de forage est équipé de pompes triplex simple effet. Le rendement volumétrique de celle-ci est déterminé en réalisant une expérience, après chaque montage de l'appareil et avant de forer. L'expérience réalisée consiste à pomper un volume d'eau d'un bac d'aspiration à un bac de refoulement. On fixe le nombre de coups par minute de la pompe (vitesse de pompage) et on chronomètre le temps de pompage. Ces données nous permettent de calculer le débit réel.

Exemple d'une expérience :

Volume d'eau pompé : 4000 litres.

Durée de pompage : 3 min et 33 secondes (3,55 min).

Vitesse de pompage : 60 coups/min.

Diamètre intérieur de la chemise de piston : $D_c = 6,5$ pouces.

La couse du piston : $L = 12$ pouces.

$$Q_{réel} = \frac{4000}{3,55} = 1126,76 \quad [l / \text{min}]$$

$$Q_{th} = 0,0386 \times (6,5)^2 \times (12) \times (60) = 1174,21 \quad [l / \text{min}]$$

Le rendement volumétrique sera : $h_v = \frac{1126,76}{1174,21} = 0,96$

Le rendement $h_v = 0,96$ caractérise toutes les pompes à boue triplex des appareils de forage.

II.11.5. La puissance hydraulique :

La puissance hydraulique est la puissance à la sortie de la pompe qui est transmise au fluide. Elle est donnée par les formules suivantes [7] :

$$P_{hy} = p(KPa) \cdot Q(m^3 / s) \quad [KW] \quad \text{(II.29)}$$

$$P_{hy} = \frac{p(KPa) \cdot Q(l / \text{min})}{60000} \quad [KW] \quad \text{(II.30)}$$

Avec :

P_{hy} : La puissance hydraulique (KW).

p : La pression de refoulement (KPa).

Q : Le débit réel de la pompe à boue (l/min).

II.11.6. La puissance mécanique :

La puissance mécanique est la puissance à l'entrée de la pompe. La puissance hydraulique lui est légèrement inférieure du fait des pertes de puissances dues aux frottements dans la partie mécanique de la pompe (engrenages, roulements, glissement des crosses dans les tuiles). On définit le rendement mécanique comme étant le rapport entre la puissance hydraulique et la puissance mécanique.

$$h_{méc} = \frac{P_{hy}}{P_m} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$h_{méc}$: Le rendement mécanique. Il est de l'ordre de 0,85 pour les pompes DUPLEX et de 0,90 pour les pompes TRIPLEX.

P_{hy} : La puissance hydraulique (KW).

P_m : La puissance mécanique (KW).

II.11.7. L'énergie hydraulique et l'énergie mécanique :

L'énergie hydraulique est la puissance hydraulique multipliée par le temps de pompage.

$$E_{hy} = P_{hy} (KW) \cdot t(s) \quad [KJ] \quad (\text{II.32})$$

L'énergie mécanique est la puissance mécanique multipliée par le temps de pompage.

$$E_{méc} = P_{méc} (KW) \cdot t(s) \quad [KJ] \quad (\text{II.33})$$

II.12. Conclusion :

La rhéologie est une science qui détermine les caractéristiques dynamiques des fluides. L'approche mathématique par des modèles tels que le modèle de NEWTON, de BINGHAM ou d'OSTWALD permet l'étude de l'écoulement des fluides sous certaines conditions (hypothèses). Ces modèles sont représentés par des équations rhéologiques permettant le calcul des pertes de charge dans un puits de forage. Une méthode de calcul utilisant des formules semi empiriques a été proposée. Cette méthode est résumée dans l'organigramme ci-dessus.

Chapitre III :

Calcul des pertes de charge

*T*out appareil de forage est équipé d'une panoplie de capteurs (capteur de pression de la boue, capteur de coups de pistons de la pompe,...) qui permet l'enregistrement des paramètres de forage tels que la pression de pompage, le débit de pompage. Ces capteurs sont reliés aux cabines mud logging où toutes ces informations sont converties en données numériques et stockées. Le traitement et l'exploitation des données enregistrées par les cabines mud logging.

La rhéologie des boues de forage permet une vérification des pressions de pompage (pression de la boue à la sortie des pompes de forage) par le calcul des pertes de charge, moyennant les équations des modèles rhéologiques (BINGHAM ET OSTWALD).

III.1 Calcul des pertes de charge dans le puits REJ-01 :**III.1.1. Données générales du puits :**Phase 17"1/2 :

- Côte finale : 322m.
 - Tubage :
 - Diamètre extérieur : 13,375in.
 - Diamètre intérieur : 12,615in
 - Garniture utilisée :
 - 35,73 m Masses Tiges (D.C) 9,5" x 3"
 - 135,51 m Masses Tiges (D.C) 8" x 2,81"
 - 56,09 m Tiges Lourdes (H.W.D.P) 5" x 3"
 - 94,67 m Tiges (D.P) 5" x 4,28"
- L'outil à jet dusé en 3 x 18/32"+1x 16/32" avec $C_e = 0,95$

Phase 12" ¼ :

- Côte finale 2182 m.
 - Tubage :
 - Diamètre extérieur : 9,625 in.
 - Diamètre intérieur : 8,680 in
 - Garniture utilisée :
 - 29,30 m Masses Tiges (D.C) 9,5" x 3"
 - 136,93 m Masses Tiges (D.C) 8" x 2,81"
 - 56,09 m Tiges Lourdes (H.W.D.P) 5" x 3,375"
 - 1959,68 m Tiges (D.P) 5" x 4,28"
- L'outil 12" ¼ Poly Diamant Cristal à jet dusé en 9 x 13/32" avec $C_e = 0,95$

Phase 8"1/2 :

- Côte finale 3345m.
 - Tubage :
 - Diamètre extérieur : 7 in.
 - Diamètre intérieur 6 in
 - Garniture utilisée :
 - 225,30 m Masses Tiges (D.C) 6,5" x 2,81"
 - 56,14 m Tiges Lourdes (H.W.D.P) 5" x 3"
 - 3063,56 m Tiges (D.P) 5" x 4,275"
- L'outil 8" 1/2 Poly Diamant Cristal à jet dusé en 6 x 14/32" avec $C_e = 0,95$

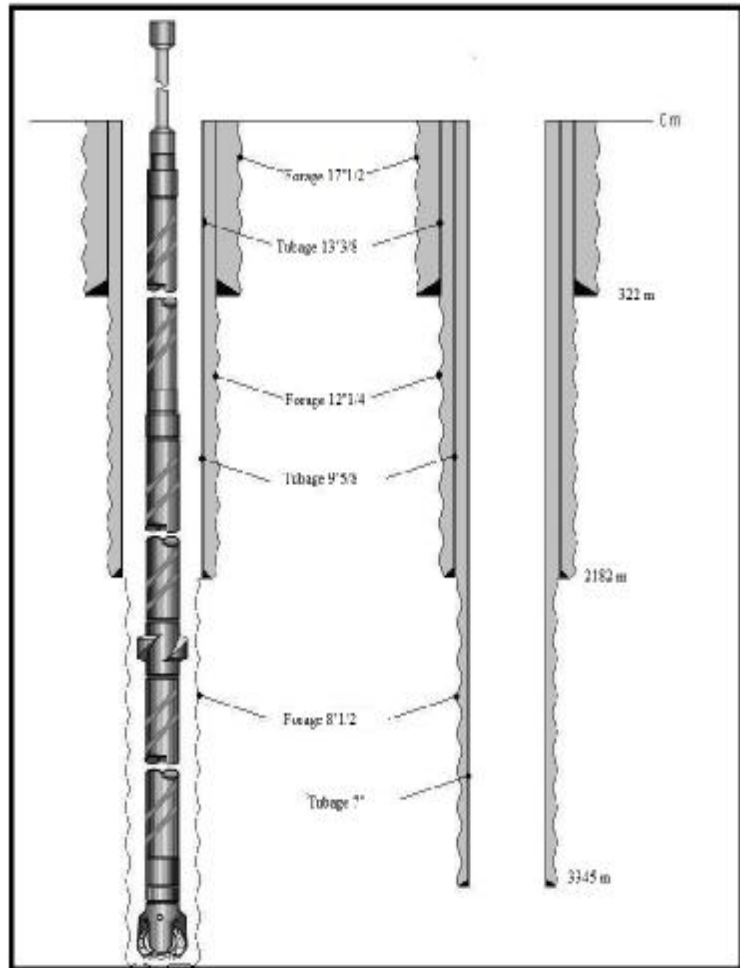


Fig. III.1 : Représentation schématisé du tain de tiges lors de la réalisation de la phase 12"1/4 et schéma du puits après la cimentation de la phase

III.1.2 Calcul type des pertes de charge pour la phase 12"1/4:

Le choix de calcul de pertes de charge se porte sur le quatrième jour de la phase 12"1/4 car c'est la phase la plus longue des phases de forage.

III.1.2.1. Données rhéologiques :

Les relevés sur le viscosimètre Fann A35 pour le premier jour de la phase 12"1/4 sont :

$$\Theta_{600} = 40 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

$$\Theta_{300} = 28 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

$$\Theta_{200} = 22 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

$$\Theta_{100} = 16 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$$

III.1.2.2. Détermination des taux de cisaillement :

En utilisant la relation (II.6), les taux de cisaillement sont :

$$\tau_1 = 5,10 \Theta_{600} = 204 \text{ barye}$$

$$\tau_2=5,10 \Theta_{300} = 142,8 \text{ barye}$$

$$\tau_3=5,10 \Theta_{200} = 112,2 \text{ barye}$$

$$\tau_4=5,10 \Theta_{100} = 81,6 \text{ barye}$$

III.1.2.3. Détermination des vitesses de cisaillement :

En utilisant la relation (II.9), les vitesses de cisaillement sont :

$$\dot{\gamma}_1 = 1,7 \cdot 600 = 1020 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_2 = 1,7 \cdot 300 = 510 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_3 = 1,7 \cdot 200 = 340 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_4 = 1,7 \cdot 100 = 170 \text{ s}^{-1}$$

III.1.2.4. Détermination du modèle rhéologique :

En utilisant la relation de corrélation (II.23).

Détermination de l'écart avec le modèle de Bingham :

Nombre de prises de lecture Fann $m = 4$

$$\sum \dot{\gamma}_i \cdot \tau_i = (1020 \times 204) + (510 \times 142,8) + (340 \times 112,2) + (170 \times 81,6) = 332928$$

$$\sum \dot{\gamma} \sum \tau = (1020+510+340+170) \times (204+142,8+112,2+81,6) = 1102824$$

$$\sum \dot{\gamma}_i^2 = 1020^2 + 510^2 + 340^2 + 170^2 = 1445000$$

$$(\sum \dot{\gamma}_i)^2 = (1020+510+340+170)^2 = 4161600$$

$$\sum \tau_i^2 = 204^2 + 142,8^2 + 112,2^2 + 81,6^2 = 81255,24$$

$$(\sum \tau_i)^2 = (204+142,8+112,2+81,6)^2 = 292248,36$$

$$r_{Bingham} = \frac{(4 \times 332928) - 1102824}{\sqrt{((4 \times 1445000) - 4161600) ((4 \times 81255,24) - 292248,36)}} = 0,994900801$$

Détermination de l'écart avec le modèle d'Ostwald :

Nombre de prises de lecture Fann $m = 4$

$$\sum \log \dot{\gamma}_i \cdot \log \tau_i = (\log 1020 \times \log 204) + (\log 510 \times \log 142,8) + (\log 340 \times \log 112,2) + (\log 170 \times \log 81,6) = 22,23$$

$$\sum \log \dot{\gamma} \cdot \sum \log \tau = (\log 1020 + \log 510 + \log 340 + \log 170) \times (\log 204 + \log 142,8 + \log 112,2 + \log 81,6) = 88,28$$

$$\sum (\log \dot{\gamma})_i^2 = (\log 1020)^2 + (\log 510)^2 + (\log 340)^2 + (\log 170)^2 = 27,76$$

$$(\sum \log \dot{\gamma}_i)^2 = (\log 1020 + \log 510 + \log 340 + \log 170)^2 = 109,79$$

$$\sum (\log \tau_i)^2 = (\log 204)^2 + (\log 142,8)^2 + (\log 112,2)^2 + (\log 81,6)^2 = 17,83$$

$$(\sum \log \tau_i)^2 = (\log 204 + \log 142,8 + \log 112,2 + \log 81,6)^2 = 70,99$$

$$r_{ostwald} = \frac{(4 \times 22,23) - 88,28}{\sqrt{((4 \times 27,76) - 109,79)((4 \times 17,83) - 70,99)}} = 0,999$$

Le coefficient de corrélation r du modèle d'Ostwald est plus proche de la valeur 1 par rapport au coefficient de corrélation du modèle de Bingham. Donc le modèle rhéologique adapté à cette boue est celui d'Ostwald.

Le calcul des taux et des tensions de cisaillement et la détermination du modèle rhéologique auquel la boue de forage est assimilée (modèle d'Ostwald) permettent de tracer le rhéogramme de ce modèle (Fig.III.2).

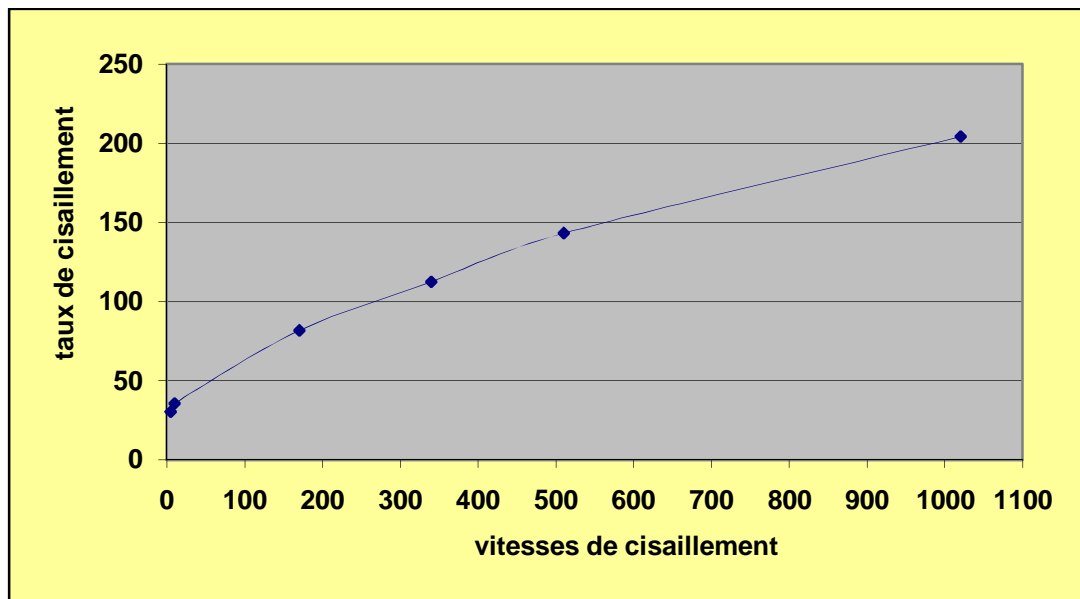


Fig.III.2. Rhéogramme de la boue de forage assimilée au fluide d'Ostwald pour la phase 12"1/4

III.1.2.5. Détermination des paramètres rhéologiques (n et K):

Détermination de l'indice de comportement rhéologique :

En utilisant la relation (II.21), l'indice de comportement rhéologique est :

Nombre de lecture Fann $m = 4$

$$n = 3,32 \text{ Log } \frac{(204)}{142,8} = 0,514$$

Détermination de l'indice de consistance :

En utilisant la relation (II.22) :

$$K = \frac{204}{1020^{0,514}} = 5,79 [Barye.s^n]$$

III.1.2.6. Détermination du régime d'écoulement:

Les relations utilisées pour la détermination du régime d'écoulement dans les tiges et dans l'espace annulaire sont celles des tableaux II.2 et II.3.

Détermination du régime dans les tiges [10] :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu_e} \frac{4n}{3n+1} \quad \text{(III.1)}$$

Avec :
$$\mu_e = K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1} \quad \text{et} \quad V = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D_i^2}$$

Alors :
$$Re = \frac{\rho V D}{K \left(\frac{8V}{D} \frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1}} \frac{4n}{3n+1} \quad \text{(III.2)}$$

1^{ere} section « D = 3" (7,62 cm) »:

$$Q = 2880 \text{ l/min} , Q = 48000 \text{ cl/s}$$

$$V_1 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4} (7,62)^2} = 1052,54 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_1 = \frac{1,25 \times 1052,54 \times 7,62}{5,78 \left(\frac{8 \times 1052,54}{7,62} \frac{(3 \times 0,514) + 1}{4 \times 0,514} \right)^{(0,514) - 1}} \frac{4 \times 0,514}{3 \times (0,514) + 1}$$

$$Re_1 = 28378,08$$

2^e section « D = 2,81" (7,13 cm) »:

$$V_2 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4} (7,13)^2} = 1202,18 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_2 = \frac{1,25 \times 1202,18 \times 7,13}{5,78 \left(\frac{8 \times 1202,18}{7,13} \frac{(3 \times 0,514) + 1}{4 \times 0,514} \right)^{(0,514) - 1}} \frac{4 \times 0,514}{3 \times (0,514) + 1}$$

$$Re_2 = 55187,44$$

3^e section « D = 3,375 " (8,57 cm) »:

$$V_3 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4}(8,57)^2} = 832,12 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_3 = \frac{1,25 \times 832,12 \times 8,57}{5,78 \left(\frac{8 \times 832,12}{8,57} \frac{(3 \times 0,514) + 1}{4 \times 0,514} \right)^{(0,514) - 1}} \frac{4 \times 0,514}{3 \times (0,514) + 1}$$

$$Re_3 = 34643,06$$

4^e section « D = 4,28" (10,87 cm) » :

$$V_4 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4}(10,87)^2} = 517,24 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_4 = \frac{1,25 \times 517,24 \times 10,87}{5,78 \left(\frac{8 \times 517,24}{10,87} \frac{(3 \times 0,514) + 1}{4 \times 0,514} \right)^{(0,514) - 1}} \frac{4 \times 0,514}{3 \times (0,514) + 1}$$

$$Re_4 = 19332,56$$

Sachant que $Re_{critique} = 2765,82$ le régime d'écoulement est turbulent dans toutes les sections à l'intérieur des tiges

Détermination du régime dans l'annulaire [10]:

$$Re = \frac{0,8165(D_0 - D_i)V\rho}{\mu_e} \frac{3n}{4n+1} \quad \text{(III.3)}$$

$$\text{Avec } \mu_e = K \left(\frac{12V}{D_0 - D_i} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1} \quad \text{et} \quad V = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(D_0^2 - D_i^2)}$$

$$\text{Alors } Re = \frac{0,8165(D_0 - D_i)V\rho}{K \left(\frac{12V}{D_0 - D_i} \frac{2n+1}{3n} \right)^{n-1}} \frac{3n}{4n+1} \quad \text{(III.4)}$$

1^{ere} section « D₀ = 12,615" (32,04 cm) et D_i = 9,5" (24,13 cm) » :

$$V_1 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4}(32,04^2 - 24,13^2)} = 137,55 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_1 = \frac{0,8165 \times (32,04 - 24,13) \times 137,55 \times 1,25}{5,78 \times \left(\frac{12 \times 137,55}{32,04 - 24,13} \frac{(2 \times 0,514) + 1}{(3 \times 0,514)} \right)^{(0,514) - 1}} \frac{(3 \times 0,514)}{(2 \times 0,514) + 1}$$

$$Re_1 = 2235,87$$

2^e section «D₀= 12,615" (32,04cm) et D_i= 8" (20,32 cm) »:

$$V_2 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4} (32,04^2 - 20,32^2)} = 99,59 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_2 = \frac{0,8165 \times (32,04 - 20,32) \times 99,59 \times 1,25}{5,78 \times \left(\frac{12 \times 99,59}{32,04 - 20,32} \frac{(2 \times 0,514) + 1}{(3 \times 0,514)} \right)^{0,514} - 1} \frac{(3 \times 0,514)}{(2 \times 0,514) + 1}$$

$$Re_2 = 1693,59$$

3^e section «D₀ =12,615" (32,04 cm) et D_i= 5" (12,70 cm) »:

$$V_3 = \frac{48000}{\frac{\pi}{4} (32,04^2 - 12,70^2)} = 70,63 \text{ [cm/s]}$$

$$Re_3 = \frac{0,8165 \times (32,04 - 12,70) \times 70,63 \times 1,25}{5,78 \times \left(\frac{12 \times 70,63}{32,04 - 12,70} \frac{(2 \times 0,514) + 1}{(3 \times 0,514)} \right)^{0,514} - 1} \frac{(3 \times 0,514)}{(2 \times 0,514) + 1}$$

$$Re_3 = 1315,52$$

Sachant que $Re_{critique} = 2765,82$ le régime d'écoulement est laminaire dans toutes les sections de l'annulaire.

III.1.2.7. Détermination des pertes de charge:

Détermination des pertes de charge dans les tiges:

Le régime dans les tiges est turbulent au niveau de toutes les sections. Le fluide étant assimilé à un fluide d'Ostwald, alors pour ce calcul on utilise la relation suivante [10] :

$$\Delta P_t = \frac{32(\log n + 2,5)\rho Q^2 L}{50 \pi^2 D^5} \left[\frac{\pi^2 D^4 K \left(\frac{Q}{\pi D^3} \frac{24n+8}{n} \right)^n}{128 Q^2 \rho} \right]^{\frac{1,4 - \log n}{7}} \quad \text{(III.5)}$$

1^e section « D = 3" (7,62 cm) »:

$$\Delta P_{t1} = \frac{32 \times (\log 0,514 + 2,5) \times 1,25 \times 48000^2 \times 2930}{50 \times \pi^2 \times 7,62^2} \left[\frac{\pi^2 \times 7,62^4 \times 5,78 \left(\frac{48000}{\pi \times 7,62^3} \frac{(24 \times 0,514) + 8}{0,514} \right)^{0,514}}{128 \times 48000^2 \times 1,25} \right]^{\frac{(1,4 - \log 0,514)}{7}}$$

$$\Delta P_{t1} = 3,51.10^6 \text{ [Barye].}$$

2^e section « D = 2,81" (7,13 cm) »:

$$\Delta P_{t2} = \frac{32 \times (\log 0,514 + 2,5) \times 1,25 \times 48000^2 \times 13693}{50 \times \pi^2 \times 7,13^2} \left[\frac{\pi^2 \times 7,13^4 \times 5,78 \left(\frac{48000}{\pi \times 7,13^3} \frac{(24 \times 0,514) + 8}{0,514} \right)^{0,514}}{128 \times 48000^2 \times 1,25} \right]^{\frac{(1,4 - \log 0,514)}{7}}$$

$$\Delta P_{t2} = 16,44. 10^6 \text{ [Barye].}$$

3^e section « D = 3,375" 8,57 cm » :

$$\Delta P_{t3} = \frac{32 \times (\log 0,514 + 2,5) \times 1,25 \times 48000^2 \times 5609}{50 \times \pi^2 \times 8,57^2} \left[\frac{\pi^2 \times 8,57^4 \times 5,78 \left(\frac{48000}{\pi \times 8,57^3} \frac{(24 \times 0,514) + 8}{0,514} \right)^{0,514}}{128 \times 48000^2 \times 1,25} \right]^{\frac{(1,4 - \log 0,514)}{7}}$$

$$\Delta P_{t3} = 9,026. 10^6 \text{ [Barye].}$$

4^e section « D = 4,28" (10,87 cm) » :

$$\Delta P_{t4} = \frac{32 \times (\log 0,514 + 2,5) \times 1,25 \times 48000^2 \times 195968}{50 \times \pi^2 \times 10,87^2} \left[\frac{\pi^2 \times 10,87^4 \times 5,78 \left(\frac{48000}{\pi \times 10,87^3} \frac{(24 \times 0,514) + 8}{0,514} \right)^{0,514}}{128 \times 48000^2 \times 1,25} \right]^{\frac{(1,4 - \log 0,514)}{7}}$$

$$\Delta P_{t4} = 1,40. 10^6 \text{ [Barye].}$$

Détermination des pertes de charge dans l'espace annulaire:

Le régime dans l'espace annulaire est laminaire au niveau de toutes les sections. Le fluide étant assimilé à un fluide d'Ostwald, alors pour ce calcul on utilise la relation suivante [10]:

$$\Delta P_a = \frac{4KL}{(D_0 - D_i)} \left[\frac{Q}{\pi(D_0 + D_i)(D_0 - D_i)^2} \frac{32n + 16}{n} \right]^n \quad \text{(III.6)}$$

1^{ere} section « D₀ = 12,615" (32,04cm) et D_i = 9,5" (24,13 cm) » :

$$\Delta P_{a1} = \frac{4 \times 5,78 \times 2930}{(32,04 - 24,13)} \left[\frac{48000}{\pi(32,04 + 24,13)(32,04 - 24,13)^2} \frac{(32 \times 0,514) + 16}{0,514} \right]^{0,514}$$

$$\Delta P_{a1} = 153,51. 10^3 \text{ [Barye].}$$

2^e section « D₀ = 12,615" (32,04cm) et D_i = 8" (20,32 cm) » :

$$\Delta P_{a2} = \frac{4 \times 5,78 \times 13693}{(32,04 - 20,32)} \left[\frac{48000}{\pi(32,04 + 20,32)(32,04 - 20,32)^2} \frac{(32 \times 0,514) + 16}{0,514} \right]^{0,514}$$

$$\Delta P_{a2} = 335,10. 10^3 \text{ [Barye]}$$

3^e section « D₀ = 12,615" (32,04cm) et D_i = 5" (12,70 cm) » :

$$\Delta P_{a3} = \frac{4 \times 5,78 \times 201577}{(32,04 - 12,70)} \left[\frac{48000}{\pi(32,04 + 12,70)(32,04 - 12,70)^2} \frac{(32 \times 0,514) + 16}{0,514} \right]^{0,514}$$

$$\Delta P_{a3} = 1936,81. 10^3 \text{ [Barye].}$$

Détermination des pertes de charge dans les duses de l'outil:

La phase 12"1/4 est réalisée avec un outil à jets de coefficient d'évent $C_e=0,95$, ayant 9 duses de diamètre 13/32" donnant une surface totale de passage aux duses :

$A = 1,167 \text{ in}^2 = 7,52 \text{ cm}^2$. Le fluide étant assimilé à un fluide d'Ostwald, pour ce calcul on utilise la relation suivante [10] :

$$\Delta P_o = \frac{\rho Q^2}{1,975 C_e^2 A^2} \quad (\text{III.7})$$

$$\Delta P_o = \frac{1,25 \times 48000^2}{1,975 \times 0,95^2 \times 7,52^2} = 28,57 \cdot 10^6 \text{ [Barye].}$$

Détermination des pertes de charge dans les équipements de surface:

Pour les installations de surface correspondant aux types **d'équipement N°03**, le fluide étant assimilé à un fluide d'Ostwald, alors pour ce calcul on utilise la relation suivante dans le système de profession [7]:

$$\Delta P_s = 2,2424 \cdot 10^6 (\log n + 2,5) \rho Q^2 \left[\frac{7,071 \cdot K \left(\frac{Q}{14,673} \frac{3n+1}{n} \right)^n}{Q^2 \rho} \right]^{\frac{1,4 - \log n}{7}} \quad (\text{III.8})$$

$$\Delta P_s = 606,85 \text{ [Barye].}$$

Détermination des pertes de charge globales:

$$\Delta P_g = \Delta P_t + \Delta P_a + \Delta P_e + \Delta P_s \quad (\text{III.9})$$

$$\Delta P_g = (30,37 + 2,44 + 28,57) \cdot 10^6 + 606,85 = 61,38 \cdot 10^6 \text{ [Barye].}$$

$$\Delta P_g = 61,38 \text{ [bar].}$$

Pour les résultats des calculs des autres jours, ils sont résumés dans les tableaux suivant en adoptant la même démarche que précédemment.

III.1.3. Données rhéologiques de la boue :

Le tableau III.1 résume les lectures Fann lues sur le viscosimètre Fann A35 effectuées par les ingénieurs de boue (*mud engineer*).

Phases	Jours	Débits [l/min]	ρ [g/cm ³]	Θ_{600} [lbf/100ft ²]	Θ_{300} [lbf/100ft ²]	Θ_{200} [lbf/100ft ²]	Θ_{100} [lbf/100ft ²]
17"1/2	1 ^{er}	2960	1,05	81	68	57	49
	2 ^e	3090		69	54	44	42
	3 ^e	3090		69	54	44	42
12"1/4	1 ^{er}	2900	1,25	39	27	21	16
	2 ^e	2888		39	27	21	15
	3 ^e	2860		40	28	22	16
	4 ^e	2880		40	28	22	16
	5 ^e	2860		40	28	22	16
	6 ^e	2890		41	29	23	16
8"1/2	1 ^{er}	1700	2,15	80	46	34	22
	2 ^e	1650		79	45	33	21
	3 ^e	1650		81	46	32	20
	4 ^e	1650		80	46	32	19
	5 ^e	1650		81	46	32	19

Tableau III.1: Les débits, les masses volumiques et les lectures Fann des trois premières phases du puits REJ-01

III.1.4. Détermination des contraintes, des coefficients de corrélation et les paramètres rhéologiques:

Le tableau III.2 résume les contraintes de cisaillement nécessaires pour déterminer le modèle rhéologique (approcher le comportement de la boue de forage) et calculer les paramètres rhéologiques (n et K).

Phases	Jours	Tensions de cisaillement [Barye]				Coefficient de corrélation r		Le modèle choisi	Paramètres rhéologiques	
		τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	L'écart avec Bingham	L'écart avec Ostwald		n	K [barye.s ⁿ]
17"1/2	1 ^{er}	413,1	346,8	290,7	249,9	0,9283	0,9776	Ostwald	0,252	71,96
	2 ^e	351,9	275,4	224,4	214,2	0,9470	0,9890		0,353	30,39
	3 ^e	351,9	275,4	224,4	214,2	0,9470	0,9890		0,353	30,39
12"1/4	1 ^{er}	198,9	137,7	107,1	81,6	0,9944	0,9989		0,530	5,04
	2 ^e	198,9	137,7	107,1	76,5	0,9938	0,9974		0,530	5,04
	6 ^e	209,1	147,9	117,3	81,6	0,9817	0,9871		0,499	6,57
	7 ^e	198,9	137,7	102	76,5	0,9884	0,9952		0,530	5,04
8"1/2	1 ^{er}	408	234,6	173,4	112,2	0,9634	0,9916		0,798	1,63
	2 ^e	402,9	229,5	168,3	107,1	0,9918	0,9987		0,811	1,47
	4 ^e	408	234,6	163,2	96,9	0,9648	0,9960	0,798	1,63	
	5 ^e	413,1	234,6	163,2	96,9	0,9672	0,9931	0,816	1,42	

Tableau III.2: Le modèle et les paramètres rhéologiques des trois premières phases du puits REJ-01.

III.1.5. Détermination du régime d'écoulement dans les tiges:

Le tableau III.3 donne les diamètres des sections ainsi que la vitesse d'écoulement de la boue à l'intérieur du train de tiges (tiges de forage, tiges lourdes et masses tiges) en vue d'un calcul du nombre de Reynolds. Celui-ci est utilisé pour déterminer le régime de l'écoulement de cette boue.

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_{int} [cm]	Section [cm ²]	Vitesse [cm /s]	R_e	R_{ec}	Régime
17"1/2	1 ^{er}	2960	7,62	45,60	1081,78	20173,85	3124,76	Turbulent
			7,13	40,01	1235,58	25028,23		
	2 ^e	3090	7,62	45,60	1129,29	25364,68	2986,39	
			7,13	40,01	1289,84	30840,53		
			10,87	92,82	554,95	8922,85		
	12"1/4	1 ^{er}	2900	7,62	45,60	1059,85	48597,22	
7,13				40,01	1210,53	57039,74		
8,57				57,68	837,90	36613,26		
10,87				92,82	520,83	20644,80		
2 ^e		2888	7,62	45,60	1055,47	48302,28	2743,9	
			7,13	40,01	1205,52	56693,06		
			8,57	57,68	834,43	36390,58		
			10,87	92,82	518,67	20519,07		
7 ^e		2890	7,62	45,60	1056,20	48351,40	2743,9	
			7,13	40,01	1206,36	56751,14		
			8,57	57,68	835,01	36427,77		
			10,87	92,82	519,03	20540,09		
8"1/2	1 ^{er}	1700	7,13	40,01	709,62	24496,70	2376,74	Turbulent
			7,62	45,60	621,29	22016,53		
			10,87	92,82	305,31	12444,54		
	2 ^e	1650	7,13	40,01	688,75	24108,55	2358,93	
			7,62	45,60	603,02	21724,01		
			10,87	92,82	296,33	12450,40		
	5 ^e	1650	7,13	40,01	688,75	24169,62	2352,08	
			7,62	45,60	603,02	21800,77		
			10,87	92,82	296,33	12561,15		

Tableau III.3: Le régime d'écoulement dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01

III.1.6. Détermination du régime d'écoulement dans l'espace annulaire :

Le tableau III.4 donne les diamètres intérieurs et extérieurs de l'espace annulaire ainsi que la vitesse de remontée de la boue à travers celui-ci. Le nombre de Reynolds calculé détermine le régime d'écoulement dans l'espace annulaire.

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_0 [cm]	D_i [cm]	Section [cm ²]	Vitesse [cm/s]	R_e	R_{ec}	Régime
17"1/2	1 ^{er}	2960	44,45	24,13	1094,48	42,92	98,05	3124,76	Laminaire
				20,32	1227,49	38,27	83,79		
	2 ^e	3090		24,13	1094,48	44,81	180,74	2986,39	
				20,32	1227,49	39,95	158,95		
12"1/4	1 ^{er}	2900	32,04	24,13	348,94	110,81	1717,24	2743,90	Laminaire
				20,32	481,95	80,22	1315,50		
				12,70	679,57	56,89	1035,12		
	2 ^e	2888		24,13	348,94	110,35	1706,77		
				20,32	481,95	79,89	1307,56		
	7 ^e	2890		12,70	679,57	56,66	1028,97		
				24,13	348,94	110,42	1708,36		
				20,32	481,95	79,95	1309,06		
8"1/2	1 ^{er}	1700	22,04	16,51	167,42	78,71	1241,22	2376,74	Laminaire
				12,70	254,83	51,71	1138,10		
	2 ^e	1650		16,51	167,42	76,39	1247,30	2358,93	
				12,70	254,83	50,19	1157,91		
	5 ^e	1650		16,51	167,42	76,39	1247,30	2352,08	
				12,70	254,83	50,19	1157,91		

Tableau III.4: Le régime d'écoulement dans l'espace annulaire pour les trois premières phases du puits REJ-01

III.1.7. Calcul des pertes de charge dans les tiges :

Le tableau III.5 résume les calculs des pertes de charge réalisées pour chaque section de passage à l'intérieur du train de tige. La somme des ces pertes de charge est donnée pour chaque jour.

Phases	Jours	Débits [l/min]	Diamètre [cm]	Longueur [cm]	Régime	ΔP_t [barye]	$\sum \Delta P_t$ [barye]
17"1/2	1 ^{er}	2960	7,62	3497	Turbulent	2,53.10 ⁶	14,12.10 ⁶
			7,13	12202		11,59.10 ⁶	
	2 ^e	3090	7,62	9182		9,04.10 ⁶	28,64.10 ⁶
			7,13	13551		17,66.10 ⁶	

			10,87	8867		$1,90 \cdot 10^6$	
12"1/4	1 ^{er}	2900	7,62	2930	Turbulent	$3,63 \cdot 10^6$	$36,78 \cdot 10^6$
			7,13	13693		$22,8 \cdot 10^6$	
			8,57	5609		$4,12 \cdot 10^6$	
			10,87	24168		$6,23 \cdot 10^6$	
	2 ^e	2888	7,62	2930		$3,61 \cdot 10^6$	$45,05 \cdot 10^6$
			7,13	13693		$22,64 \cdot 10^6$	
			8,57	5609		$4,11 \cdot 10^6$	
			10,87	57368		$14,69 \cdot 10^6$	
	7 ^e	2890	7,62	2930		$3,61 \cdot 10^6$	$80,63 \cdot 10^6$
			7,13	13693		$22,67 \cdot 10^6$	
			8,57	5609		$4,11 \cdot 10^6$	
			10,87	195968		$50,24 \cdot 10^6$	
8"1/2	1 ^{er}	1700	7,13	22530	Turbulent	$37,90 \cdot 10^6$	$93,43 \cdot 10^6$
			7,62	5614		$6,93 \cdot 10^6$	
			10,87	205856		$48,60 \cdot 10^6$	
	2 ^e	1650	7,13	22530		$36,34 \cdot 10^6$	$93,77 \cdot 10^6$
			7,62	5614		$6,64 \cdot 10^6$	
			10,87	225256		$50,79 \cdot 10^6$	
	5 ^e	1650	7,13	22530		$34,46 \cdot 10^6$	$110,3 \cdot 10^6$
			7,62	5614		$6,66 \cdot 10^6$	
			10,87	306356		$69,18 \cdot 10^6$	

Tableau III.5: Les résultats des pertes de charge dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01

III.1.8. Calcul des pertes de charge dans l'espace annulaire :

Le tableau III.6 résume les calculs des pertes de charge réalisés pour chaque section de passage de l'espace annulaire. La somme des ces pertes de charges est donnée pour chaque jour.

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_0 [cm]	D_i [cm]	Longueur [cm]	Régime	ΔP_a	$\sum \Delta P_a$
17"1/2	1 ^{er}	2960	44,45	24,13	3497	Laminaire	$0,13 \cdot 10^6$	$0,49 \cdot 10^6$
				20,32	12203		$0,36 \cdot 10^6$	
	2 ^e	3090		24,13	3573		$0,079 \cdot 10^6$	$0,47 \cdot 10^6$
				20,32	13551		$0,230 \cdot 10^6$	
				12,70	14476		$0,161 \cdot 10^6$	
12"1/4	1 ^{er}	2900	32,04	24,13	2930	Laminaire	$0,145 \cdot 10^6$	$0,723 \cdot 10^6$
				20,32	13693		$0,314 \cdot 10^6$	
				12,70	29777		$0,264 \cdot 10^6$	
	2 ^e	2888		24,13	2930		$0,145 \cdot 10^6$	$1,018 \cdot 10^6$
				20,32	13693		$0,314 \cdot 10^6$	
				12,70	62977		$0,559 \cdot 10^6$	

	7 ^e	2890	32,04	24,13	2930		0,145. 10 ⁶	2,347. 10 ⁶
				20,32	13693		0,314. 10 ⁶	
				12,70	201277		1,788. 10 ⁶	
8"1/2	1 ^{er}	1700	22,04	16,51	22530	Laminaire	4,808. 10 ⁶	17,378. 10 ⁶
				12,70	211470		12,57. 10 ⁶	
	2 ^e	1650		16,51	22530		4,725. 10 ⁶	18,055. 10 ⁶
				12,70	230870		13,33. 10 ⁶	
	5 ^e	1650		16,51	22530		4,704. 10 ⁶	22,544. 10 ⁶
				12,70	311970		17,84. 10 ⁶	

Tableau III.6: Les résultats des pertes de charge dans l'espace annulaire pour les trois Premières phases du puits REJ-01.

III.1.9. Calcul des pertes de charge dans les duses de l'outil :

Le tableau III.7 définit les caractéristiques de chaque outil et résume le calcul des pertes de charge à travers les duses.

Outils	Jours	Débits [l/min]	C _e	Nombre et diamètre des duses	A [cm ²]	ΔP _e [barye]
17"1/2	1 ^{er}	2960	0,95	(3×1,42) et (1×0,5)	4,93	58,98. 10 ⁶
	2 ^e	3090				64,28. 10 ⁶
12"1/4	1 ^{er}	2900		(9×1,031)	7,51	29,04. 10 ⁶
	2 ^e	2888				28,80. 10 ⁶
	7 ^e	2890				28,84. 10 ⁶
8"1/2	1 ^{er}	1700		(7×1,111)	6,78	21,06. 10 ⁶
	2 ^e	1650				19,84. 10 ⁶
	5 ^e	1650				19,84. 10 ⁶

Tableau III.7: Les résultats des pertes de charge dans les duses des outils pour les trois premières phases du puits REJ-01.

III.1.10. Calcul des pertes de charge dans les équipements de surface :

Le tableau III.8 résume les résultats des calculs des pertes de charges dans l'équipement de surface qui est du type numéro 3.

Phases	Jours	Débits [l/min]	n	K [barye .s ⁿ]	ρ [g/cm ³]	ΔP _s
17"1/2	1 ^{er}	2960	0,252	71,96	1,05	274,83
	2 ^e	3090	0,353	30,39		424,32
12"1/4	1 ^{er}	2900	0,530	5,049	1,25	636,13
	2 ^e	2888	0,530	5,049		631,80
	7 ^e	2890	0,530	5,049		632,52
8"1/2	1 ^{er}	1700	0,798	1,632	2,15	773,20
	2 ^e	1650	0,811	1,479		747,02
	5 ^e	1650	0,816	1,428		751,45

Tableau III.8: Les résultats des pertes de charge dans les équipements de surface pour les trois premières phases du puits REJ-01.

III.1.11. Calcul des pertes de charge globales :

Le tableau III.9 synthétise les différentes pertes de charge calculées précédemment et la somme de celles-ci par jour.

Phases	Jours	ΔP_t [barye]	ΔP_a [barye]	ΔP_e [barye]	ΔP_s [barye]	ΔP_g [barye]
17"1/2	1 ^{er}	14,12. 10 ⁶	0,49. 10 ⁶	58,98. 10 ⁶	274,83	73,59. 10 ⁶
	2 ^e	28,64.10 ⁶	0,47. 10 ⁶	64,28. 10 ⁶	424,32	93,39. 10 ⁶
12"1/4	1 ^{er}	36,78.10 ⁶	0,723. 10 ⁶	29,04. 10 ⁶	636,13	66,54. 10 ⁶
	2 ^e	45,05.10 ⁶	1,018. 10 ⁶	28,80. 10 ⁶	631,80	74,86. 10 ⁶
	7 ^e	80,63.10 ⁶	2,347. 10 ⁶	28,84. 10 ⁶	632,52	111,81. 10 ⁶
8"1/2	1 ^{er}	93,43.10 ⁶	17,378. 10 ⁶	21,06. 10 ⁶	773,20	131,86. 10 ⁶
	2 ^e	93,77.10 ⁶	18,055. 10 ⁶	19,84. 10 ⁶	747,02	131,66. 10 ⁶
	5 ^e	110,3.10 ⁶	22,544. 10 ⁶	19,84. 10 ⁶	751,45	152,68. 10 ⁶

Tableau III.9: Les résultats des pertes de charge globales pour les trois premières phases du puits REJ-01.

III.2. Comparaison entre les pertes de charge et les pressions de pompage enregistrées dans l'appareil ENF #18 :

Sur le tableau III.10 sont portées les pressions de pompage enregistrées par les capteurs de pressions, les pertes de charges calculées à l'aide des équations rhéologique et les erreurs commises lors des calculs théoriques

Phases	Jours	Débits [l/min]	Pression de pompage [bar]	Pertes de charges globales ΔP_g [bar]
17"1/2	1 ^{er}	2960	61,98	73,59
	2 ^e	3090	82,64	93,39
12"1/4	1 ^{er}	2900	82,64	66,54
	2 ^e	2888	110,19	74,86
	7 ^e	2890	151,51	111,81
8"1/2	1 ^{er}	1700	261,70	131,86
	2 ^e	1650	268,59	131,66
	5 ^e	1650	268,59	152,68

Tableau III.10: comparaison entre les pertes de charge dans le puits REJ-01 et la pression de pompage.

III.3. La puissance requise à la fonction pompage de l'appareil ENF #18:

Les tableaux suivants donnent les paramètres de forage (la progression, le débit moyen et la pression maximale du flux de la pompe à boue, et le temps de forage) ainsi que la puissance hydraulique, la puissance mécanique, l'énergie hydraulique et l'énergie fournie à la pompe à boue pour les quatre phases de forage.

Les résultats des puissances développées et des énergies consommées figurant dans les tableaux III.11, III.12 et III.13 ont été obtenus grâce aux relations (II.30) et (II.32) :

III.3.1. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 17.1/2" :

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	157	2960	6198.34	24	305.78	26419.392
2 ^e jour	159	3090	8264.46	24	425.61	36772.704
3 ^e jour	06	3090	8264.46	02	425.61	3064.392

Tableau III.11 : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 17.1/2"

Détail de calcul type pour le 1^{er} jour :

Puissance hydraulique :

$$P_{hy} = P [KPa] \cdot Q [m^3/s] = 6198,34 \times 4,93 \cdot 10^{-2} = 305,78 \text{ [Kw]} \quad \text{(III.10)}$$

Energie hydraulique :

$$E_{hy} = P_{hy} [Kw] \cdot t [s] = 305,78 \times 86400 = 26419,392 \text{ [MJ]} \quad \text{(III.11)}$$

La puissance hydraulique moyenne de pompage est:

$$E_{hy} = \sum_i^3 E_{hy i} = (26419,392 + 36772,704 + 3064,392) = 66256,484 \text{ [MJ]}$$

$$t = \sum_i^3 t_i = (24+24+02) = 50 \text{ [Heures]} = 180000 \text{ [s]}$$

$$P_{hy moy} = \frac{E_{hy} (KJ)}{t (s)} = \frac{66256,484 \cdot 10^3}{180000} \quad \text{(III. 12)}$$

$$P_{hy moy} = 368,09 \text{ [Kw]}$$

La puissance mécanique moyenne de la pompe à boue est:

$$P_{méc.moy} = \frac{P_{hy moy}}{\eta_{mec}} = \frac{368,09}{0,90} = 408,99 \text{ [Kw]} \quad \text{(III. 13)}$$

III.3.2. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 12.1/4" :

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	142	2900	8264.46	11.50	399.44	16536.81
2 ^e jour	322	2888	11019.28	24	530.39	45825.69
3 ^e jour	401	2860	14090.90	24	671.66	58031.42
4 ^e jour	431	2880	14090.90	24	676.36	58437.50
5 ^e jour	299	2860	15151.51	24	722.22	62399.80
6 ^e jour	214	2890	15151.51	21	729.79	55172.12
7 ^e jour	76	2890	15151.51	10.50	729.79	27586.06

Tableau III.12 : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 12.1/4".

Détail de calcul type pour le 1^{er} jour :

Puissance hydraulique :

$$P_{hy} = P [KPa] \cdot Q [m^3/s] = 8264,46 \times 4,83 \cdot 10^{-2} = 399,44 \text{ [Kw]} \quad (\text{III. 14})$$

Energie hydraulique :

$$E_{hy} = P_{hy} [Kw] \cdot t [s] = 399,44 \times 41400 = 16536,81 \text{ [MJ]} \quad (\text{III. 15})$$

La puissance hydraulique moyenne de pompage est:

$$E_{hy} = \sum_i^7 E_{hy i} = (16536,81 + 45825,69 + 58031,42 + 58437,50 + 62399,80 + 55172,12 + 27586,06) = 323989,4 \text{ [MJ]}$$

$$t = \sum_i^3 t_i = (11,5 + (24 \times 4) + 21 + 10,5) = 139 \text{ [Heures]} = 500400 \text{ [s]}$$

$$P_{hy moy} = \frac{E_{hy} (KJ)}{t (s)} = \frac{323989,4 \cdot 10^3}{500400} \quad (\text{III. 16})$$

$$P_{hy moy} = 647,46 \text{ [Kw]}$$

La puissance mécanique moyenne de la pompe à boue est:

$$P_{méc.moy} = \frac{P_{hy moy}}{\eta_{mec}} = \frac{647,46}{0,90} = 719,40 \text{ [Kw]} \quad (\text{III. 17})$$

III.3.3. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 8" 1/2:

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	158	1700	26170,79	15,50	741,50	41376,01
2 ^e jour	194	1650	26859,50	18	738,63	47863,62
3 ^e jour	191	1650	26170,79	17	719,69	44045,43
4 ^e jour	333	1650	26170,79	24	719,69	62181,79
5 ^e jour	287	1650	26859,50	23,25	738,63	61823,85

Tableau III.13 : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 8" 1/2.

Détail de calcul type pour le 1^{er} jour :

Puissance hydraulique :

$$P_{hy} = P [KPa] \cdot Q [m^3/s] = 26170,79 \times 2,83 \cdot 10^{-2} = 741,50 \text{ [Kw]} \quad (\text{III. 18})$$

Energie hydraulique :

$$E_{hy} = P_{hy} [Kw] \cdot t [s] = 741,50 \times 55800 = 41376,01 \text{ [MJ]} \quad (\text{III. 19})$$

La puissance hydraulique moyenne de pompage est:

$$E_{hy} = \sum_i^7 E_{hy i} = (41376,01 + 47863,62 + 44045,43 + 62181,79 + 61823,85) = 260290,7 \text{ [MJ]}$$

$$t = \sum_i^3 t_i = (15,5 + 18 + 17 + 24 + 23,25) = 97,75 \text{ [Heures]} = 351900 \text{ [s]}$$

$$P_{hy moy} = \frac{E_{hy} (KJ)}{t (s)} = \frac{260290,7 \cdot 10^3}{351900} \quad (\text{III. 20})$$

$$P_{hy moy} = 739,67 \text{ [Kw]}$$

La puissance mécanique moyenne de la pompe à boue est:

$$P_{méc.moy} = \frac{P_{hy moy}}{\eta_{mec}} = \frac{739,67}{0,90} = 821,85 \text{ [Kw]} \quad (\text{III. 21})$$

III.4. Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge :

L'histogramme de la figure (III.3) est réalisé à l'aide des résultats portés dans le tableau III.10

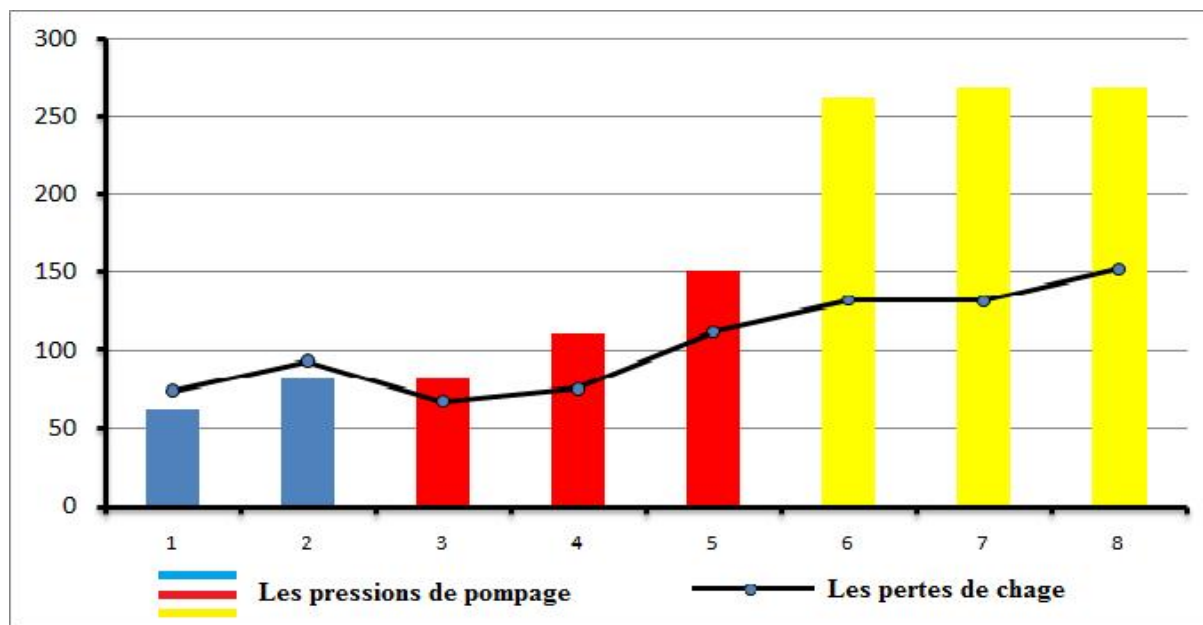


Fig.III.3. Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge dans le puits REJ-01.

La figure (III.3) montre une augmentation de la pression de pompage et des pertes de charge avec l'approfondissement du forage. La géométrie du puits qui présente des irrégularités et cavités sur les parois internes provoque une augmentation des pertes de charge lors du forage. Pour vaincre ces dernières et assurer la bonne remontée des déblais de forage et le bon nettoyage du puits, l'augmentation des pressions de pompage est nécessaire.

Dans la pratique, les pertes de charge et les pressions de pompage sont toujours égales.

Il ya des erreurs causées par le mauvais calibrage des capteurs de pression et l'imprécision lors des prises de données rhéologique avec le viscosimètre Fann A35, ceci apparait très clairement dans la phase 17"1/2 de la figure (III.3) où les pertes de charge dépassant les pressions de pompage, ce qui est tout à fait impossibles (les pressions de pompage sont toujours égales aux pertes de charges).

Finalement l'augmentation des pertes de charge tout le long de puits engendre une augmentation de la consommation d'énergie par les pompes à boue.

III.5. Conclusion :

Le calcul des pertes de charge constitue une vérification des valeurs de pressions de pompage enregistrées avant toute application des modèles rhéologiques sur le terrain.

Les pertes de charge calculées pour l'appareil ENF #18 lors du forage du puits REJ-01, donnent un sens exact à la consommation d'énergie utilisée par la fonction pompage (une augmentation des pertes de charge signifie directement une augmentation d'énergie consommée par les pompes à boue),

Au final le même calcul sera appliqué sur l'appareil ENF #18, à l'aide d'une simulation numérique effectuée sous les logiciels Fluent et Gambit afin de pouvoir faire une comparaison entre les résultats obtenus.

Chapitre IV :
SIMULATION
NUMERIQUE

IV.1.Introduction :

La simulation a été réalisée à l'aide de *FLUENT*, un code de calcul industriel spécialisé dans les domaines de la mécanique des fluides et des transferts thermiques. *FLUENT* à plusieurs applications industrielles. Il sert à effectuer des simulations allant de l'écoulement d'air autour d'un profil d'aile d'avion à la combustion dans les fours, des colonnes à bulles à la production de glace, de l'écoulement du sang dans les vaisseaux à la fabrication de semi-conducteurs, des installations de climatisation des pièces jusqu'aux centrales de traitement des eaux usées. Le logiciel est capable de modéliser des écoulements aussi complexes que ceux dans les cylindres d'un moteur à combustion interne, dans les turbomachines ou dans les systèmes multiphasiques. En plus de sa polyvalence, *FLUENT* reste facile à maîtriser pour les utilisateurs grâce à son interface simple et complète.

Ce chapitre regroupe deux parties essentielles, dans la première nous allons présenter comment utiliser *GAMBIT* et *FLUENT*.

Ensuite nous entamerons la simulation du cas d'un écoulement de boue de forage dans un puits.

IV.2. Définitions et généralités :

FLUENT est un logiciel de calcul d'écoulement, un logiciel de *CFD* (Computational Fluid Dynamics) qui se base sur la méthode des volumes finis pour discrétiser le domaine d'étude et résoudre les équations différentielles régissant l'écoulement.

Comme tout logiciel de *CFD*, *FLUENT* est composé de trois éléments :

Le *pré-processeur*, le *solveur* et le *post-processeur*

1. *pré-processeur GAMBIT* : Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du domaine et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine en proposant plusieurs algorithmes de maillage en deux ou trois dimensions, suivant la géométrie.

2. *Le solveur* permet de définir numériquement les conditions opératoires (vitesse, pression,...) dans lesquelles est effectuée la simulation, et de spécifier les conditions aux limites. Il effectue la résolution numérique des équations décrites dans le chapitre II.

3. Le *post-processeur* est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs des vecteurs vitesses, de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment de droite, une section ou sur la totalité du domaine. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et d'exporter les résultats sous d'autres formats pour un traitement approprié.

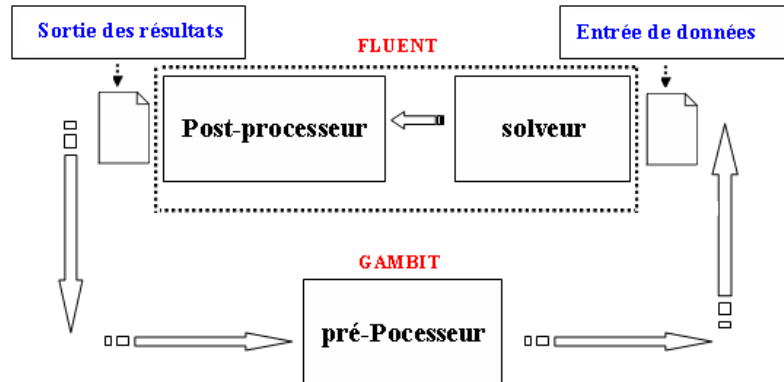


Fig. (IV-1) : démarche de la résolution d'un problème

IV.3. Maillage du domaine :

Les codes de simulation *CFD* « *Computational Fluid Dynamic* » utilisent la méthode des volumes finis, particulièrement le code *Fluent* que nous avons adopté, nécessaire au préalable le maillage du domaine de l'écoulement.

Cette étape consiste à représenter un milieu continu, qui est l'espace annulaire, par un milieu discret. Ce dernier est constitué d'un ensemble d'éléments de volumes finis de contrôle, remplissant le milieu continu.

IV.3.1. Types de maillages :

La forme des volumes de contrôle constituant le milieu discret définit la nature et le type de maillage utilisé. Pour des géométries simples, souvent le maillage structuré est utilisé. On peut classer les maillages suivant la forme des éléments en trois types :

IV.3.1.1. Maillage triangulaire :

La forme d'éléments utilisés est triangulaire. Ce type de maillage peut être structuré ou non structuré, comme cela est illustré sur la *figure (IV. 2)*.

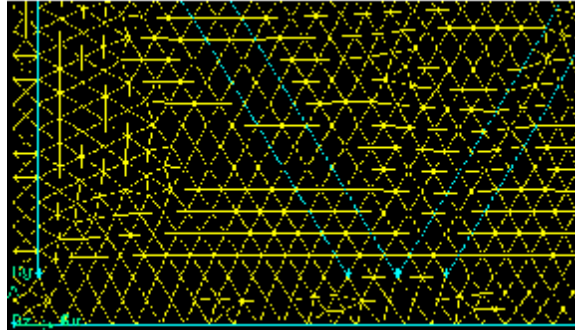


Fig. (IV. 2) : Maillage triangulaire

IV.3.1.2. Maillage quadratique :

Il comporte des éléments de forme quadratique disposés dans un certain ordre s'il s'agit d'un maillage structuré adopté pour des géométries simples. Pour des géométries complexes, le maillage quadrilatéral, lorsque utilisé, est souvent non structuré; *figure (IV. 3)*. Le maillage quadrilatéral structuré est le plus souvent utilisé à cause de la bonne convergence et la précision qu'il procure. Outre les deux derniers avantages, il y'a aussi le problème de diffusion numérique qui est en grande partie réduit, surtout lorsque l'écoulement est aligné avec les lignes de volumes de contrôle, comme dans le cas d'une conduite longue.

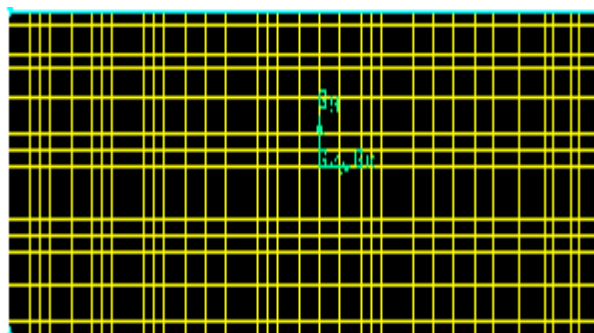


Fig. (IV. 3) : Maillage Quadratique

IV.3.1.3. Maillage hybride :

Il utilise la combinaison des éléments triangulaires et quadratiques, comme illustré dans la *figure (IV. 4)*. Il est adopté lorsqu'il s'agit de géométries présentant des parties pointues. La convergence et la précision des processus numériques auxquels il est associé sont moindres, à moins que le nombre d'éléments considéré ne soit excessivement grand.

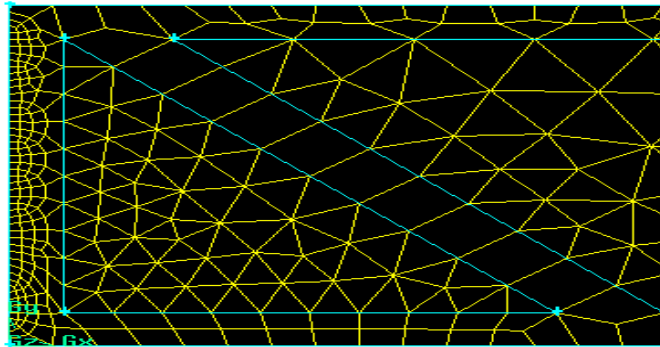


Fig. (IV. 4) : Maillage hybride

IV.4. Maillage sous "Gambit":

La création de la géométrie ainsi que le maillage se font sous le progiciel "Gambit" 2.0.6. Ce maillage propose des solutions étendues pour les géométries les plus compliquées. Cependant, pour notre cas, deux choix principaux du maillage se sont posés à nous. En l'occurrence, un maillage soit à base de cellules quadrilatères, soit à base de cellules triangulaires.

L'utilisation d'un maillage triangulaire induirait un surplus du nombre de cellules par rapport aux cellules quadrilatères, d'où le besoin de plus de ressources et de temps de calcul. Cependant, notre géométrie est assez simple où l'écoulement suit pratiquement la forme de la géométrie. Donc, en utilisant un maillage à cellules quadrilatères, nous aurons un alignement de l'écoulement avec notre maillage, alors que cela ne sera jamais le cas avec des cellules triangulaires. Ce dernier point garantira un minimum de diffusion numérique.

IV.5. Création de la géométrie et maillage sous "Gambit":

Notre géométrie est assez simple et sa création sous "Gambit" est facile. Il suffit d'entrer les coordonnées des différents points (x, y) en 2D, créer les bords ou limites puis créer la surface qui sera délimitée par les bords.

Le maillage adopté est un maillage structuré, à éléments quadrilatères avec un pas régulier. La figure (IV.5) suivante nous illustre le maillage effectué.

Le fluide utilisé pour cet écoulement est appelé boue de forage qui s'adapte à la loi de comportement non-newtonien (fluide complexe).

Notre but est d'une part d'appliquer les notions que nous avons vues précédemment, et d'autre part de valider notre modèle sous le code de calcul *Fluent*.

Pour cela, prenons le cas de la première phase où le train de tige a une longueur de 322 m avec différentes sections, l'écoulement de la boue de forage à travers les différents diamètres intérieurs est assuré sous les conditions suivantes :

- Densité de boue $d = 1,05 \text{ kg/m}^3$
- Vitesse à l'entrée de la tige $V = 11,29 \text{ m/s}$
- La viscosité dynamique $\mu = 0,244 \text{ kg/m.s}$
- Pression de pompage $P = 82,64 \text{ bar}$

Représentation du train de tige :

Le train de tige de la première phase est composé de :

- 35,73 m Masses Tiges (D.C) 9,5" x 3"
- 135,51 m Masses Tiges (D.C) 8" x 2,81"
- 56,09 m Tiges Lourdes (H.W.D.P) 5" x 3"
- 94,67 m Tiges (D.P) 5" x 4,28"

Pour simplifier le déroulement de la simulation, on a procédé à quelques simplifications (arrondissement des longueurs en nombre entier), donc la composition du train de tige devient comme suit :

- 35 m Masses Tiges (D.C) 9,5" x 3"
- 136 m Masses Tiges (D.C) 8" x 2,81"
- 56 m Tiges Lourdes (H.W.D.P) 5" x 3"
- 95 m Tiges (D.P) 5" x 4,28"

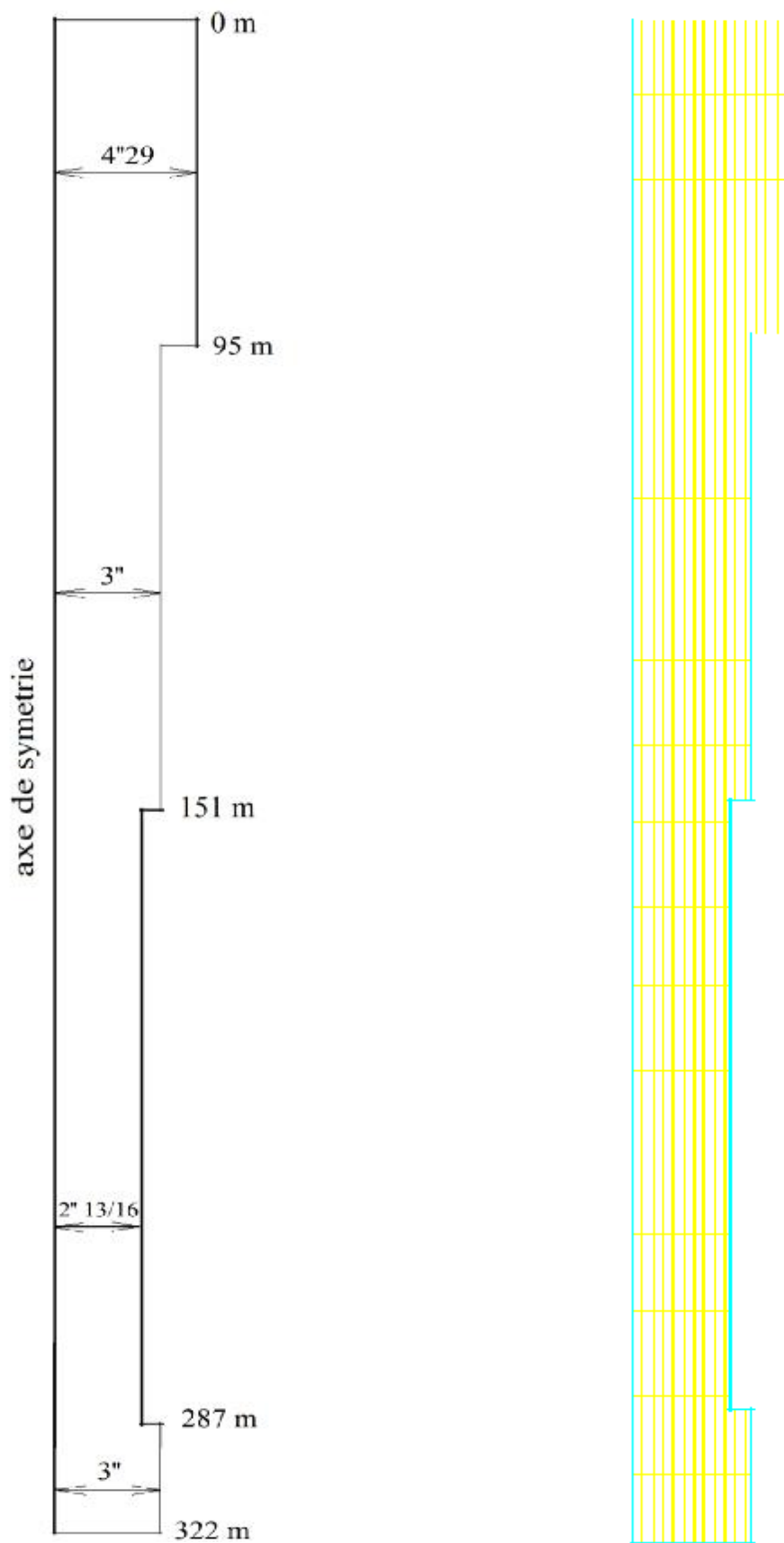


Fig. IV.5. Schématisation de l'intérieur de train du tige, et maillage.

IV.6. Conditions aux limites :

Sur le pré-processeur *GAMBIT*, seul le type de conditions aux limites est spécifié. Aucune valeur numérique n'est introduite. Le solveur permettra d'introduire ces valeurs tout en donnant la possibilité de changer de type de conditions aux limites. Dans ce qui suit, nous définissons les conditions aux limites introduites sur *GAMBIT*.

- *Wall* : qui matérialise les parois des tiges d'écoulement.
- *Inlet* : entrée de la boue de forage.
- *Outlet* : sortie de la boue de forage.
- *Axis* : axe de symétrie des tiges de forage.

IV.7. Procédures et étapes de la simulation sous Fluent :

Une fois la géométrie maillée sous Gambit (figure IV.5), on l'exporte vers le solveur *Fluent* afin d'effectuer la résolution numérique des équations qui régissent le phénomène.

Avant de lancer le calcul sur Fluent, tous les paramètres concernant l'écoulement doivent être spécifiés :

IV.7.1. Démarrer la version 2ddp (double précision) du Fluent :



Fig. IV.6. Sélection de la précision sous fluent

IV.7.2. Lire le fichier du maillage 2D, (Nom.msh) :

Elle sert à ouvrir le fichier déjà sauvegardé.

File → *Read* → *Case*

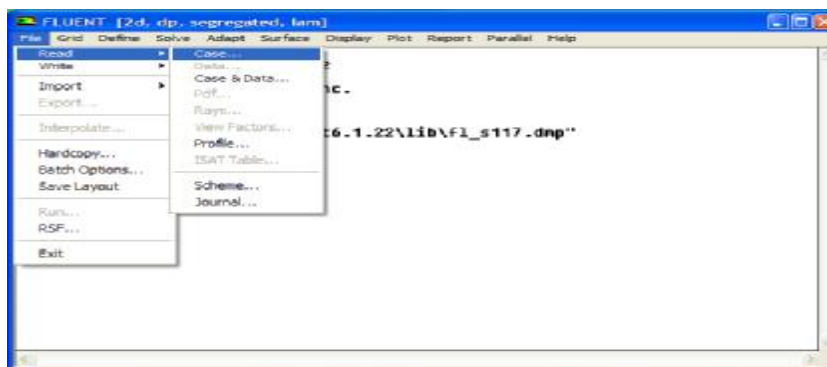


Fig. IV.7. Lecture du fichier du maillage.

IV.7.3. Vérification du maillage :

Permet de contrôler la qualité du maillage effectué.

Grid → *Check*

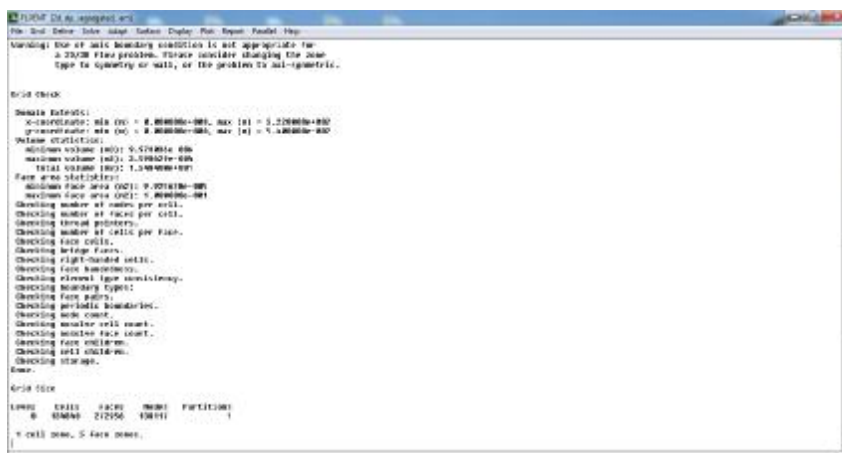


Fig. IV.8. Vérification du maillage.

IV.7.4. Afficher le maillage :

Display → *Grid*

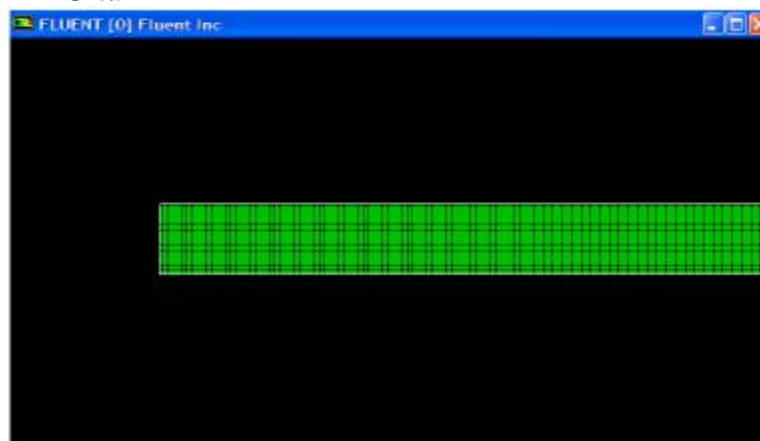


Fig. IV.9. Affichage de la structure maillée.

IV.7.5. Définition du modèle :

Elle nous permet de définir le type d'écoulement (permanent) et la méthode de résolution à utiliser (implicite).

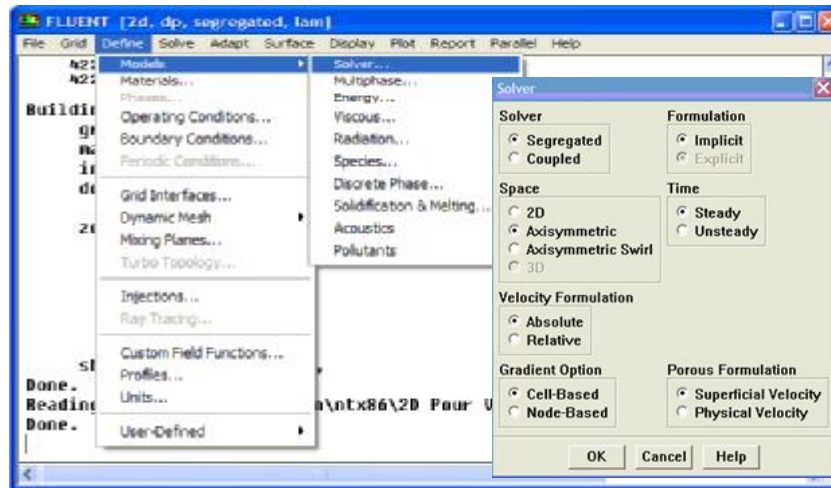


Fig. IV.10. détermination du modèle axisymétrique.

IV.7.6. Définition du régime d'écoulement :

Déclarer le type du modèle utilisé (turbulent)

Define → *Models* → *turbulent*

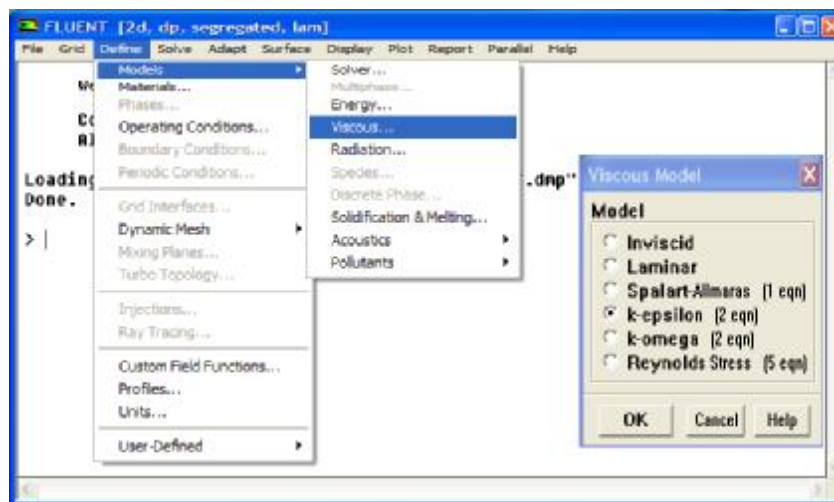


Fig. IV.11. choix du modèle de turbulence.

IV.7.7. Définition du matériau :

Elle nous permet d'introduire les propriétés du fluide (masse volumique, conductivité thermique, viscosité, chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique.....)

Define → *Matériels*



Fig. IV.12. Définition du fluide dans fluent.

IV.7.8. Définition numérique des conditions opératoires :

Les valeurs des conditions opératoires introduites sont

- La densité [$d = 1050 \text{ kg/m}^3$]
- La viscosité [$0,244 \text{ kg/s.m}$]
- La vitesse a l'entrée [$v = 11,29 \text{ m/s}$]
- Pression de pompage [$P = 82 \text{ bar}$]

Define → *Operating Conditions*

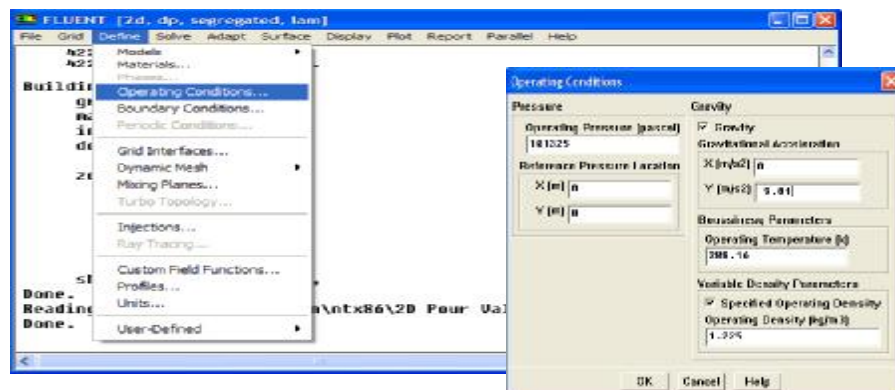


Fig. IV.13. les conditions opératoires.

IV.7.9. Déclaration des conditions aux limites :

Define → *Boundary Conditions*

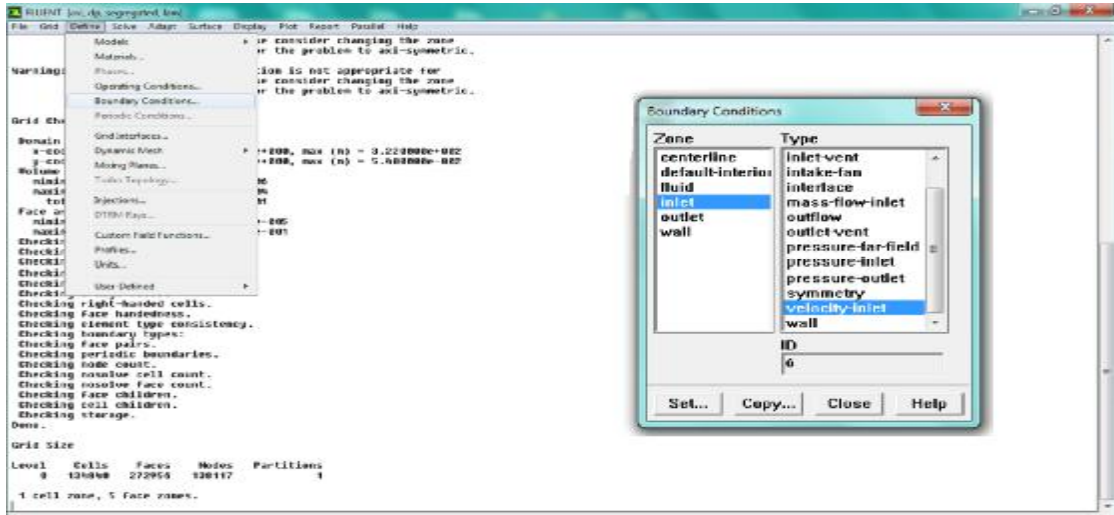


Fig. IV.14. Les conditions aux limites.

IV.7.10. Contrôle de la solution :

Solve → *Controls* → *Solution*

- Schémas de discrétisation
- Choix du schéma d'interpolation de la pression (Second Order)
- Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse (Simple)
- Facteurs de relaxation

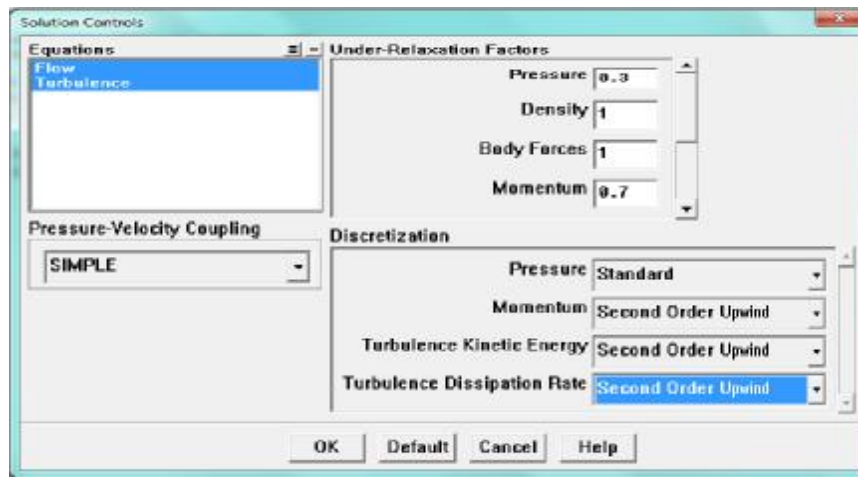


Fig. IV.15. Vérification de la solution.

IV.7.11. Contrôle de la convergence :

Solve → *Monitors* → *Residual*

La convergence sous "Fluent" est principalement surveillée suivant la valeur des résidus des différents paramètres de l'écoulement. Le logiciel cessera les itérations dès lors que tous les résidus calculés sont sous la valeur du critère de convergence entré par l'utilisateur.

D'après les recommandations de simulation pour assurer la convergence, les résidus pour l'équation d'énergie doivent être en dessous de 10^{-6} , et pour l'équation de continuité qui est de l'ordre de 10^{-4} .

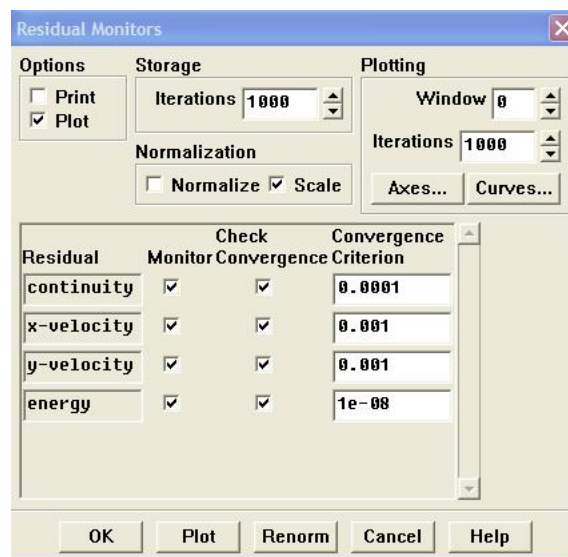


Fig. IV.16. Définition de la précision de la convergence.

IV.7.12. Initialisation des calculs :

Avant de lancer le calcul itératif on doit d'abord commencer par l'opération d'initialisation en activant la commande

Solve → *Initialize* → *Initialize*

IV.7.13. Sauvegarder le fichier case (Nom.cas).

Permet de sauvegarder le fichier et d'éviter de refaire les mêmes étapes à chaque utilisation.

File → *Write* → *Data & case*

IV.7.14. Le calcul itératif :

Permet de définir l'intervalle d'itération

Solve → *Iterate*

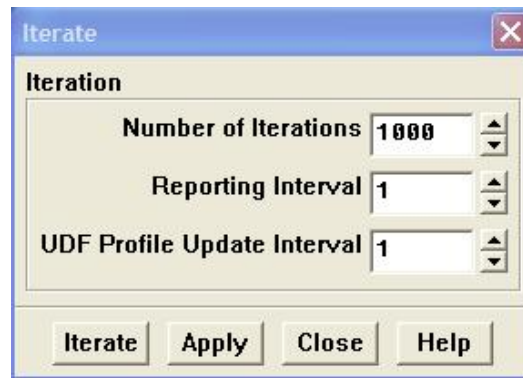


Fig. IV.17. Détermination de nombre d'itération.

IV.7.15. Détermination de la solution :**IV.7.15.1. Test de convergence :**

Les courbes des résidus des équations de continuité, quantité de mouvement sont toutes convergentes, la figure (IV.14) illustre cette convergence. La solution converge à 3931 itérations.

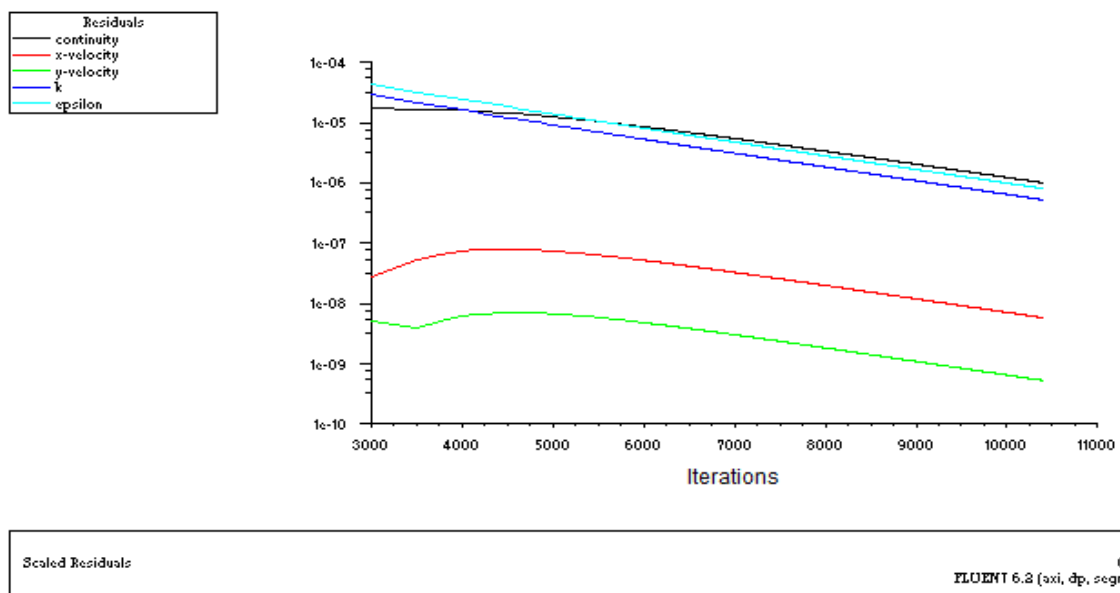


Fig. IV.18. Test de convergence.

IV.7.15.2. le champ des vitesses :

La figure (IV.19) nous montre l'évolution de la magnitude de la vitesse relative tout le long de l'intérieur des tiges, on remarque que la vitesse est minimum dans la section la plus grande, elle atteint son maximum dans la section la plus petite.

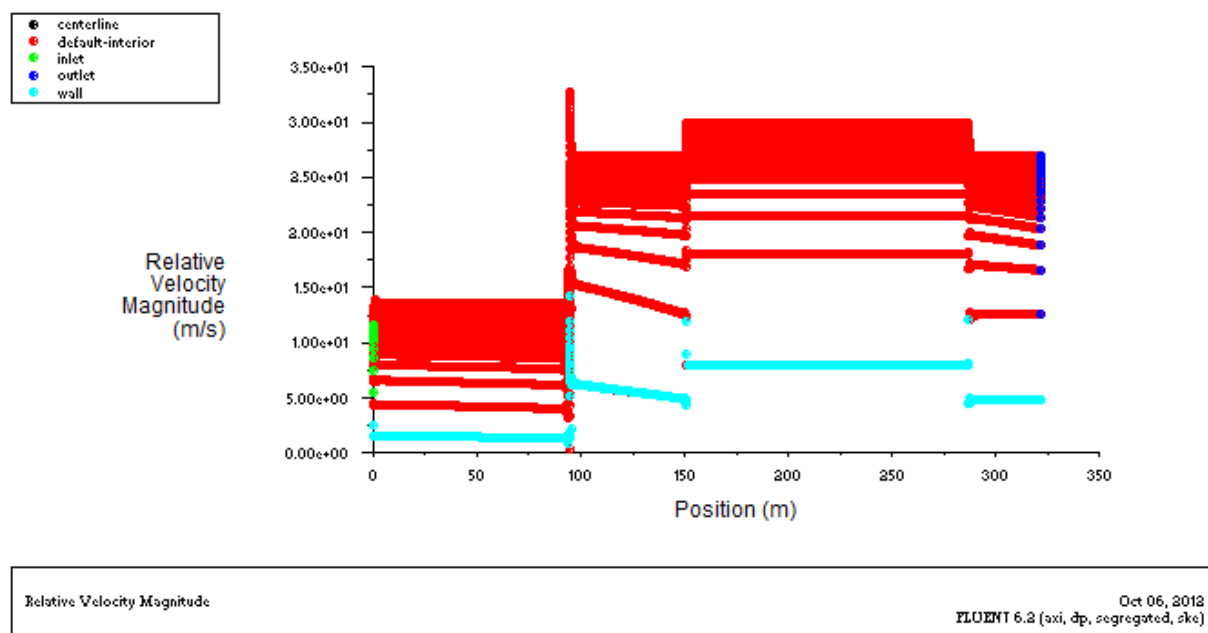


Fig. IV.19. La vitesse a l'intérieur des tiges.

A chaque changement de section (à 95 m, 151 m et 287 m) et au niveau de la paroi (la courbe en bleu clair), on remarque que la valeur de la vitesse est relativement faible, ceci est dû à la turbulence créée à cette profondeur par un élargissement ou par un rétrécissement.

La figure (IV.20) nous montre le développement du champ de vitesse au niveau du premier rétrécissement, à la profondeur 95 m.

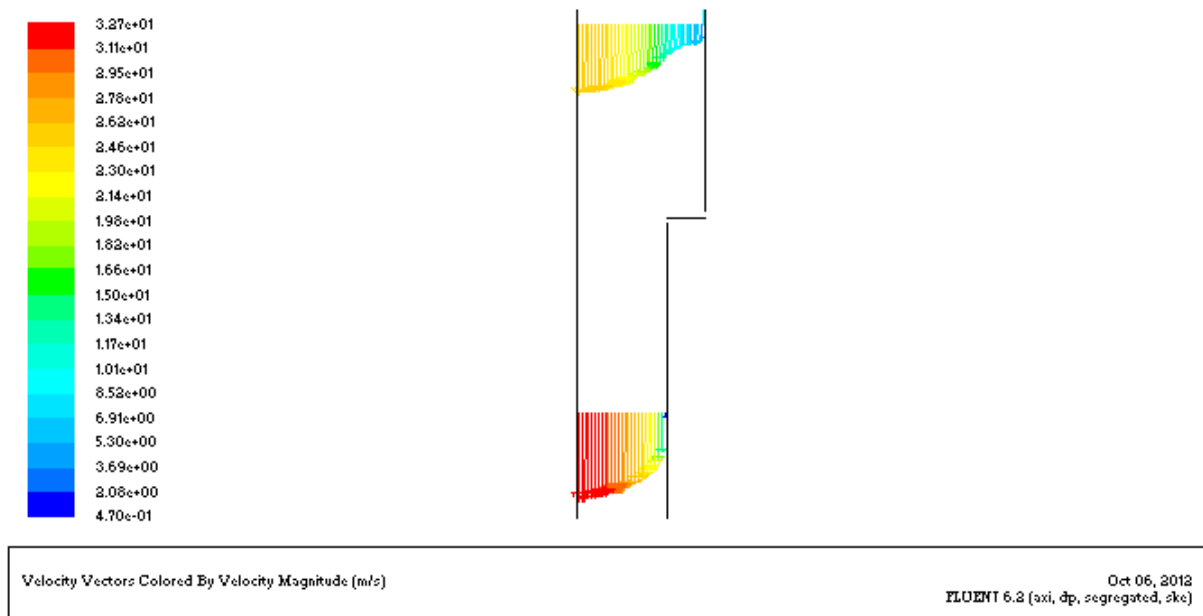


Fig. IV.20. le champ des vitesses au premier changement de section.

IV.7.15. 3. la courbe de pression :

Fluent est utilisé pour résoudre le problème d'écoulement la boue de forage dans un puits qui va être confronté à plusieurs singularités ainsi que des rétrécissements tout le long des tiges de forage qui vont se traduire par des pertes de charge.

On a utilisé un maillage aux pas d'espace réguliers, les résultats étaient très satisfaisants, le tracé de la courbe de pression (figure IV.21) montre son évolution tout le long de l'intérieur des tiges.

Comparant la courbe d'évolution de pression avec celle des pertes de charge (figure III.3), on remarque que la pression engendrée par le pompage à l'intérieur des tiges est dissipée totalement sous forme de pertes de pression tout le long du train de tige pour la première phase. Une bonne correspondance est visible entre les calculs analytiques et les résultats de la simulation numérique.

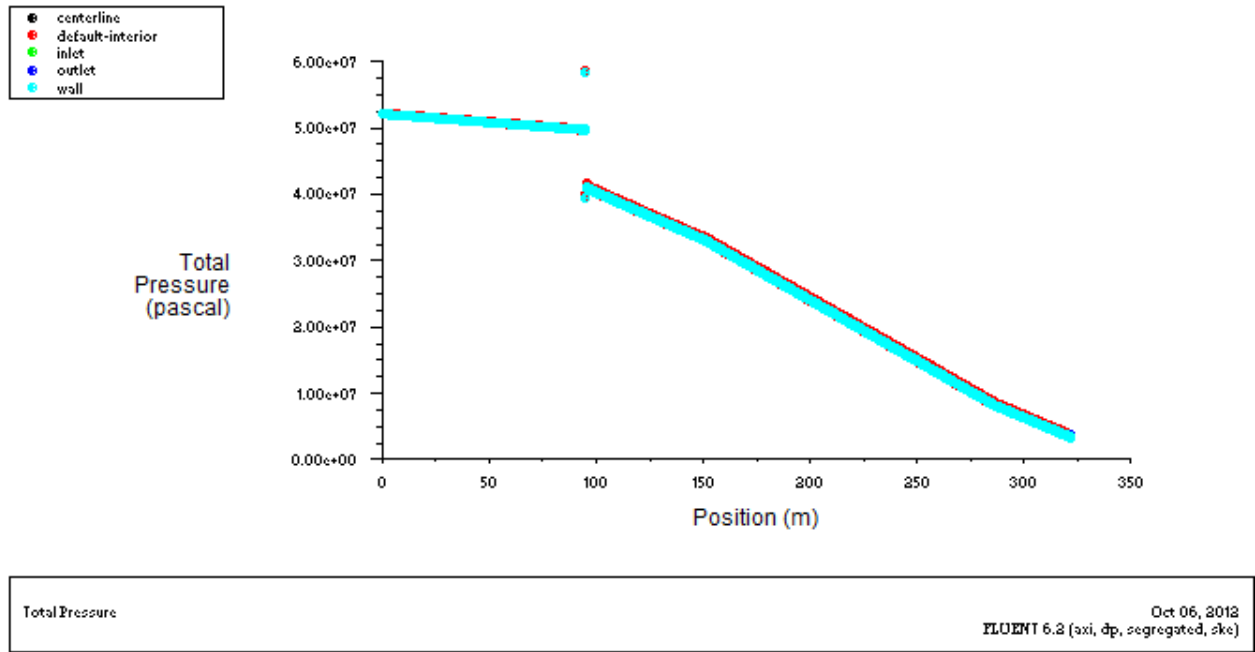


Fig. IV.21. évolution de la pression totale à l'intérieur des tiges.

IV.7.15. 4. la turbulence:

La figure (IV.22) nous montre le comportement de l'énergie cinétique de la turbulence, à l'intérieur, l'entrée, la sortie, au niveau de l'axe de symetrie et au niveau de la paroi du train de tige. On remarque que sa valeur est maximale au niveau de la paroi et nulle au niveau de l'axe, et diminue progressivement à travers la section des tiges.

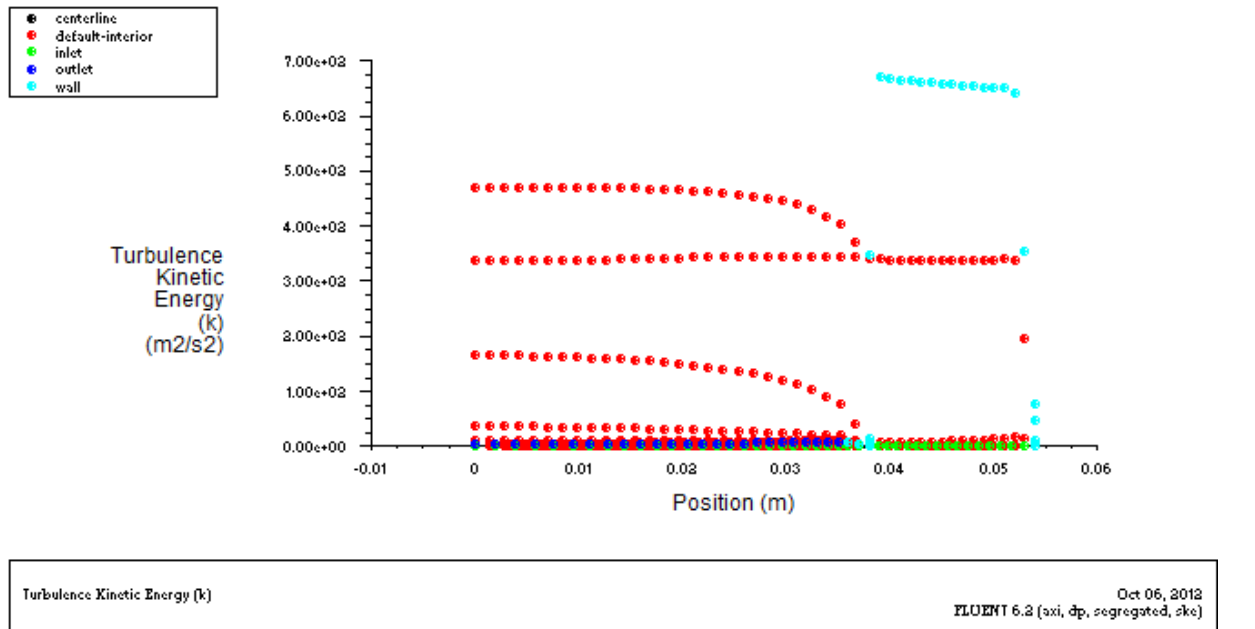


Fig. IV.22. L'énergie cinétique de la turbulence.

IV.8.Comparaisons entre les pressions de pompage et les résultats de la simulation numérique et les calculs analytiques :

Les différentes pressions	Phase 17"1/2		Phase 12"1/4			Phase 8"1/2		
	Pression de pompage [bar]	61,98	82,64	82,64	110,19	151,51	261,70	268,59
Pertes de charge globale [bar]	73,59	93,39	66,54	74,86	111,81	131,86	131,66	152,68
Perte de charge intérieur tige (analytique) [bar]	14,12	28,64	36,78	45,05	80,63	93,43	93,77	110,3
Perte de charge intérieur tige (simulation numérique) [bar]	15	25	/					

Tableau IV.1. Comparaisons entre les pressions de pompage et les résultats de la simulation numérique et les calculs analytiques

D'après le tableau et les données de pression de pompage on remarque que les pertes de charge globales varient d'une phase à une autre d'un ordre qui ne dépasse pas les 10%, ceci signifie que la variation des paramètres de la boue de forage tout le long de forage du puits REJ-01 engendre une différence entre les pertes de charge.

Dans la phase 8"1/2 on remarque une augmentation des pertes de charge globales ainsi que les pertes de charge à l'intérieur de train de tige, et cette augmentation est due à l'augmentation du nombre de singularités à l'intérieur des tiges de forage (différentes sections de passage) que la boue doit traverser tout le long de son parcours.

Notre simulation a été réalisée sur le train de tige de l'ordre de 322 m, et les résultats de la simulation numérique sont très proches des résultats trouvés en pratique ce qui concerne les pertes de charge intérieur tige pour la 1^{ère} phase.

Les pertes de charge sont très importantes dans le train tiges, juste après celles qui sont enregistrées au niveau de l'outil de forage (voir tableau III.7), qui peuvent atteindre les 50 % des pertes de charge globales.

IV.9. conclusion :

La simulation numérique de l'écoulement de boue à l'intérieur d'un train de tige de forage, a été réalisée en utilisant un pré-processeur de maillage Gambit et un post-processeur de calcul fluent.

Les résultats de simulation trouvés sont en parfaite correspondance avec les calculs analytiques. En conclusion, la simulation numérique est un bon moyen pour déterminer facilement les pertes de charge à l'intérieur des tiges de forage.

Conclusion générale

Les pertes de charge dans le circuit boue dépendant de plusieurs paramètres tels que la densité et la viscosité de la boue de forage ainsi que la nature de la formation géologique traversé, s'y ajoutent a cela le choix du modèle de fluide utilisé et les traitements physico-chimique subis.

La sélection du meilleur modèle rhéologique a une grande incidence sur la concordance des résultats du calcul analytique et de la simulation numérique.

Dans notre étude on a pu atteindre des résultats de la simulation numérique très proches des résultats calculés analytiquement, ce qui signifie que le modèle rhéologique de la loi de puissance choisi pour le calcul analytique concorde bien avec le modèle numérique de turbulence k- ϵ testé dans le logiciel fluent, l'écart entre les deux types de modélisation est inférieur à 10%.

En ce qui concerne les pertes de charge réelle sur la partie simulée, il est impossible de les déduire directement à partir de la pression d'injection en tête, du fait que pour connaître les pertes de charge dans l'espace annulaire et au niveau de l'outil de forage il faudrait pour cela effectuer une mesure très couteuse de la pression du fond en cours de pompage pour différentes valeur du débit.

Au final, la durée que j'ai passée au sein de l'entreprise **sonatrach** dans le cadre d'un stage pratique qui est la base de la réalisation de ce mémoire m'a donné l'occasion d'approfondir et d'élargir mes connaissances dans le domaine du forage en particulier et des hydrocarbures ainsi que les énergies fossiles en général, ainsi que l'aspect relations humaines dans le cadre professionnel.

Références Bibliographiques

[1] : **A. Slimani et C. Soussi**, Module M2 et M1, formation JDF, *Division forage SONATRACH*.

[2]: **J.Nougaro**, Le forage rotary (texte), *Edition Technip*, 1979

[3]: **K.R.Bork**. The rig and his components, Unit I, Lesson 1, Fourth Edition 1995; Publié par: *Petroleum Extension service* (Division of continuing education. The University of Texas at Austin). En coopération avec: *International Association of Drilling Contractors*.

[4]: **Jodie Lee craft**. Mud Pumps and Conditioning Equipment, Unit I, Lesson 12, Second Edition 1982; Publié par: *Petroleum Extension service* (Division of continuing education, the University of Texas at Austin).En coopération avec: *International Association of Drilling Contractors*. Houston, Texas

[5]: **M. Carlier et B. Garnier**, Les stations de pompages d'eau, Editions Technique et Documentation 1977.

[6]: **Jean Paul Nguyen**, Technique d'exploitation pétrolière, LE FORAGE, *Editions Technip*,1983.

[7]: **Gilles Gabolde et Jean Paul Nguyen**, Le formulaire du foreur, préface de A.LEBLOND, *Editions Technip*, 6e Edition, 1989.

[8]: Manuel technique de l'appareil HONGHUA ZJ50DBS.

[9]: **A. Slimani**, Module M3, formation JDF, *Division forage SONATRACH*.

[10]: **Cambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz, comité des techniciens**, Manuel de rhéologie des fluides de forages et laitiers de ciment, *Editions Technip*, 1979.

[11] : **P.Motard**, Traduction du cours "ROTARY DRILLING" groupe II, leçon I:

«Making Hole»; publié par: *Petroleum Extension Service, Editions Technip*, 1972.

[12] : **The Drilling Fluids Engineering MANUAL**, *PUBLICATIONS DE API* (1998)

ANNEXES

**CALCUL DES PERTES DE CHARGE DE L'APPAREIL ENF #18 AVEC LE
MODELE D'OSTWALD**

I. Détermination des contraintes et les paramètres rhéologique :

Phases	Jours	Tensions de cisaillement [Barye]				Coefficient de corrélation r		Le modèle choisi	Paramètres rhéologiques	
		τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	L'écart avec Bingham	L'écart avec Ostwald		n	K [barye.s ⁿ]
17"1/2	1 ^{er}	413,1	346,8	290,7	249,9	0,9283	0,9776	Ostwald	0,252	71,96
	2 ^e	351,9	275,4	224,4	214,2	0,9470	0,9890		0,353	30,39
	3 ^e	351,9	275,4	224,4	214,2	0,9470	0,9890		0,353	30,39
12"1/4	1 ^{er}	198,9	137,7	107,1	81,6	0,9944	0,9989		0,530	5,04
	2 ^e	198,9	137,7	107,1	76,5	0,9938	0,9974		0,530	5,04
	6 ^e	209,1	147,9	117,3	81,6	0,9817	0,9871		0,499	6,57
	7 ^e	198,9	137,7	102	76,5	0,9884	0,9952		0,530	5,04
8"1/2	1 ^{er}	408	234,6	173,4	112,2	0,9634	0,9916		0,798	1,63
	2 ^e	402,9	229,5	168,3	107,1	0,9918	0,9987		0,811	1,47
	4 ^e	408	234,6	163,2	96,9	0,9648	0,9960		0,798	1,63
	5 ^e	413,1	234,6	163,2	96,9	0,9672	0,9931		0,816	1,42

Tableau I : Les tensions de cisaillement, et les paramètres rhéologiques des trois premières phases du puits REJ-01.

II. Détermination du régime d'écoulement dans les tiges:

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_{int} [cm]	Section [cm ²]	Vitesse [cm /s]	R_e	R_{ec}	Régime
17"1/2	1 ^{er}	2960	7,62	45,60	1081,78	20173,85	3124,76	Turbulent
			7,13	40,01	1235,58	25028,23		
	2 ^e	3090	7,62	45,60	1129,29	25364,68	2986,39	
			7,13	40,01	1289,84	30840,53		
			10,87	92,82	554,95	8922,85		
			10,87	92,82	554,95	8922,85		
12"1/4	1 ^{er}	2900	7,62	45,60	1059,85	48597,22	2743,9	
			7,13	40,01	1210,53	57039,74		
			8,57	57,68	837,90	36613,26		
			10,87	92,82	520,83	20644,80		
	2 ^e	2888	7,62	45,60	1055,47	48302,28	2743,9	
			7,13	40,01	1205,52	56693,06		
			8,57	57,68	834,43	36390,58		
			10,87	92,82	518,67	20519,07		
	7 ^e	2890	7,62	45,60	1056,20	48351,40	2743,9	
			7,13	40,01	1206,36	56751,14		
			8,57	57,68	835,01	36427,77		
			8,57	57,68	835,01	36427,77		

			10,87	92,82	519,03	20540,09		
8"1/2	1 ^{er}	1700	7,13	40,01	709,62	24496,70	2376,74	Turbulent
			7,62	45,60	621,29	22016,53		
			10,87	92,82	305,31	12444,54		
	2 ^e	1650	7,13	40,01	688,75	24108,55	2358,93	
			7,62	45,60	603,02	21724,01		
			10,87	92,82	296,33	12450,40		
	5 ^e	1650	7,13	40,01	688,75	24169,62	2352,08	
			7,62	45,60	603,02	21800,77		
			10,87	92,82	296,33	12561,15		

Tableau II : Les diamètres, les sections, le nombre de Reynolds et le régime d'écoulement dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01

III. Détermination du régime d'écoulement dans l'espace annulaire :

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_0 [cm]	D_i [cm]	Section [cm ²]	Vitesse [cm /s]	R_e	R_{ec}	Régime
17"1/2	1 ^{er}	2960	44,45	24,13	1094,48	42,92	98,05	3124,76	Laminaire
				20,32	1227,49	38,27	83,79		
	2 ^e	3090		24,13	1094,48	44,81	180,74	2986,39	
				20,32	1227,49	39,95	158,95		
12"1/4	1 ^{er}	2900	32,04	24,13	348,94	110,81	1717,24	2743,90	Laminaire
				20,32	481,95	80,22	1315,50		
				12,70	679,57	56,89	1035,12		
	2 ^e	2888		24,13	348,94	110,35	1706,77		
				20,32	481,95	79,89	1307,56		
	7 ^e	2890		12,70	679,57	56,66	1028,97		
				24,13	348,94	110,42	1708,36		
				20,32	481,95	79,95	1309,06		
8"1/2	1 ^{er}	1700	22,04	16,51	167,42	78,71	1241,22	2376,74	Laminaire
				12,70	254,83	51,71	1138,10		
	2 ^e	1650		16,51	167,42	76,39	1247,30	2358,93	
				12,70	254,83	50,19	1157,91		
	5 ^e	1650		16,51	167,42	76,39	1247,30	2352,08	
				12,70	254,83	50,19	1157,91		

Tableau III: Les diamètres intérieurs et extérieurs, les sections de l'espace annulaire, le nombre de Reynolds et le régime d'écoulement dans l'espace annulaire pour les trois premières phases du puits REJ-01

IV. Calcul des pertes de charge dans les tiges :

Phases	Jours	Débits [l/min]	Diamètre [cm]	Longueur [cm]	Régime	ΔP_t [barye]	$\sum \Delta P_t$ [barye]
17"1/2	1 ^{er}	2960	7,62	3497	Turbulent	2,53.10 ⁶	14,12.10 ⁶
			7,13	12202		11,59.10 ⁶	
	2 ^e	3090	7,62	9182		9,04.10 ⁶	28,64.10 ⁶
			7,13	13551		17,66.10 ⁶	
			10,87	8867		1,90.10 ⁶	
12"1/4	1 ^{er}	2900	7,62	2930	Turbulent	3,63.10 ⁶	36,78.10 ⁶
			7,13	13693		22,8.10 ⁶	
			8,57	5609		4,12.10 ⁶	
			10,87	24168		6,23.10 ⁶	
	2 ^e	2888	7,62	2930		3,61.10 ⁶	45,05.10 ⁶
			7,13	13693		22,64.10 ⁶	
			8,57	5609		4,11.10 ⁶	
			10,87	57368		14,69.10 ⁶	
	7 ^e	2890	7,62	2930		3,61.10 ⁶	80,63.10 ⁶
			7,13	13693		22,67.10 ⁶	
			8,57	5609		4,11.10 ⁶	
			10,87	195968		50,24.10 ⁶	
8"1/2	1 ^{er}	1700	7,13	22530	Turbulent	37,90.10 ⁶	93,43.10 ⁶
			7,62	5614		6,93.10 ⁶	
			10,87	205856		48,60.10 ⁶	
	2 ^e	1650	7,13	22530		36,34.10 ⁶	93,77.10 ⁶
			7,62	5614		6,64.10 ⁶	
			10,87	225256		50,79.10 ⁶	
	5 ^e	1650	7,13	22530		34,46.10 ⁶	110,3.10 ⁶
			7,62	5614		6,66.10 ⁶	
			10,87	306356		69,18.10 ⁶	

Tableau IV: Les résultats des pertes de charge dans les tiges pour les trois premières phases du puits REJ-01

V. Calcul des pertes de charge dans l'espace annulaire :

Phases	Jours	Débits [l/min]	D_0 [cm]	D_i [cm]	Longueur [cm]	Régime	ΔP_a	$\sum \Delta P_a$
17"1/2	1 ^{er}	2960	44,45	24,13	3497	Laminaire	0,13.10 ⁶	0,49.10 ⁶
				20,32	12203		0,36.10 ⁶	
	2 ^e	3090		24,13	3573		0,079.10 ⁶	0,47.10 ⁶
				20,32	13551		0,230.10 ⁶	
				12,70	14476		0,161.10 ⁶	
	1 ^{er}	2900	32,04	24,13	2930		0,145.10 ⁶	0,723.10 ⁶
				20,32	13693		0,314.10 ⁶	
				12,70	29777		0,264.10 ⁶	
	2 ^e	2888		24,13	2930		0,145.10 ⁶	1,018.10 ⁶
				20,32	13693		0,314.10 ⁶	

12"1/4	7 ^e	2890	32,04	12,70	62977	Laminaire	0,559. 10 ⁶	2,347. 10 ⁶
				24,13	2930		0,145. 10 ⁶	
				20,32	13693		0,314. 10 ⁶	
				12,70	201277		1,788. 10 ⁶	
8"1/2	1 ^{er}	1700	22,04	16,51	22530	Laminaire	4,808. 10 ⁶	17,378. 10 ⁶
				12,70	211470		12,57. 10 ⁶	
	2 ^e	1650		16,51	22530		4,725. 10 ⁶	18,055. 10 ⁶
				12,70	230870		13,33. 10 ⁶	
	5 ^e	1650		16,51	22530		4,704. 10 ⁶	22,544. 10 ⁶
				12,70	311970		17,84. 10 ⁶	

Tableau V: Les résultats des pertes de charge dans l'espace annulaire pour les trois Premières phases du puits REJ-01.

VI. Calcul des pertes de charge dans les duses de l'outil :

Outils	Jours	Débits [l/min]	C _e	Nombre et diamètre des duses	A [cm ²]	ΔP _e [barye]
17"1/2	1 ^{er}	2960	0,95	(3×1,42) et (1×0,5)	4,93	58,98. 10 ⁶
	2 ^e	3090				64,28. 10 ⁶
12"1/4	1 ^{er}	2900		(9×1,031)	7,51	29,04. 10 ⁶
	2 ^e	2888				28,80. 10 ⁶
	7 ^e	2890				28,84. 10 ⁶
8"1/2	1 ^{er}	1700		(7×1,111)	6,78	21,06. 10 ⁶
	2 ^e	1650				19,84. 10 ⁶
	5 ^e	1650				19,84. 10 ⁶

Tableau VI: Les résultats des pertes de charge dans les duses des outils pour les trois Premières phases du puits REJ-01.

VII. Calcul des pertes de charge dans les équipements de surface :

Phases	Jours	Débits [l/min]	n	K [barye .s ⁿ]	ρ [g/cm ³]	ΔP _s
17"1/2	1 ^{er}	2960	0,252	71,96	1,05	274,83
	2 ^e	3090	0,353	30,39		424,32
12"1/4	1 ^{er}	2900	0,530	5,049	1,25	636,13
	2 ^e	2888	0,530	5,049		631,80
	7 ^e	2890	0,530	5,049		632,52
8"1/2	1 ^{er}	1700	0,798	1,632	2,15	773,20
	2 ^e	1650	0,811	1,479		747,02
	5 ^e	1650	0,816	1,428		751,45

Tableau VII: Les résultats des pertes de charge dans les équipements de surface pour les trois premières phases du puits REJ-01.

VIII. Calcul des pertes de charge globales :

Phases	Jours	ΔP_t [barye]	ΔP_a [barye]	ΔP_e [barye]	ΔP_s [barye]	ΔP_g [barye]
17"1/2	1 ^{er}	14,12. 10 ⁶	0,49. 10 ⁶	58,98. 10 ⁶	274,83	73,59. 10 ⁶
	2 ^e	28,64. 10 ⁶	0,47. 10 ⁶	64,28. 10 ⁶	424,32	93,39. 10 ⁶
12"1/4	1 ^{er}	36,78. 10 ⁶	0,723. 10 ⁶	29,04. 10 ⁶	636,13	66,54. 10 ⁶
	2 ^e	45,05. 10 ⁶	1,018. 10 ⁶	28,80. 10 ⁶	631,80	74,86. 10 ⁶
	7 ^e	80,63. 10 ⁶	2,347. 10 ⁶	28,84. 10 ⁶	632,52	111,81. 10 ⁶
8"1/2	1 ^{er}	93,43. 10 ⁶	17,378. 10 ⁶	21,06. 10 ⁶	773,20	131,86. 10 ⁶
	2 ^e	93,77. 10 ⁶	18,055. 10 ⁶	19,84. 10 ⁶	747,02	131,66. 10 ⁶
	5 ^e	110,3. 10 ⁶	22,544. 10 ⁶	19,84. 10 ⁶	751,45	152,68. 10 ⁶

Tableau VIII: Les résultats des pertes de charge globales pour les trois premières phases du puits REJ-01

CALCUL DES PUISSANCES REQUISES POUR LA FONCTION POMPAGE LORS DU FORAGE

IX. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 17.1/2" :

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	157	2960	6198.34	24	305.78	26419.392
2 ^e jour	159	3090	8264.46	24	425.61	36772.704
3 ^e jour	06	3090	8264.46	02	425.61	3064.392

Tableau IX : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 17.1/2"

X. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 12.1/4" :

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	142	2900	8264.46	11.50	399.44	16536.81
2 ^e jour	322	2888	11019.28	24	530.39	45825.69
3 ^e jour	401	2860	14090.90	24	671.66	58031.42
4 ^e jour	431	2880	14090.90	24	676.36	58437.50
5 ^e jour	299	2860	15151.51	24	722.22	62399.80

6 ^e jour	214	2890	15151.51	21	729.79	55172.12
7 ^e jour	76	2890	15151.51	10.50	729.79	27586.06

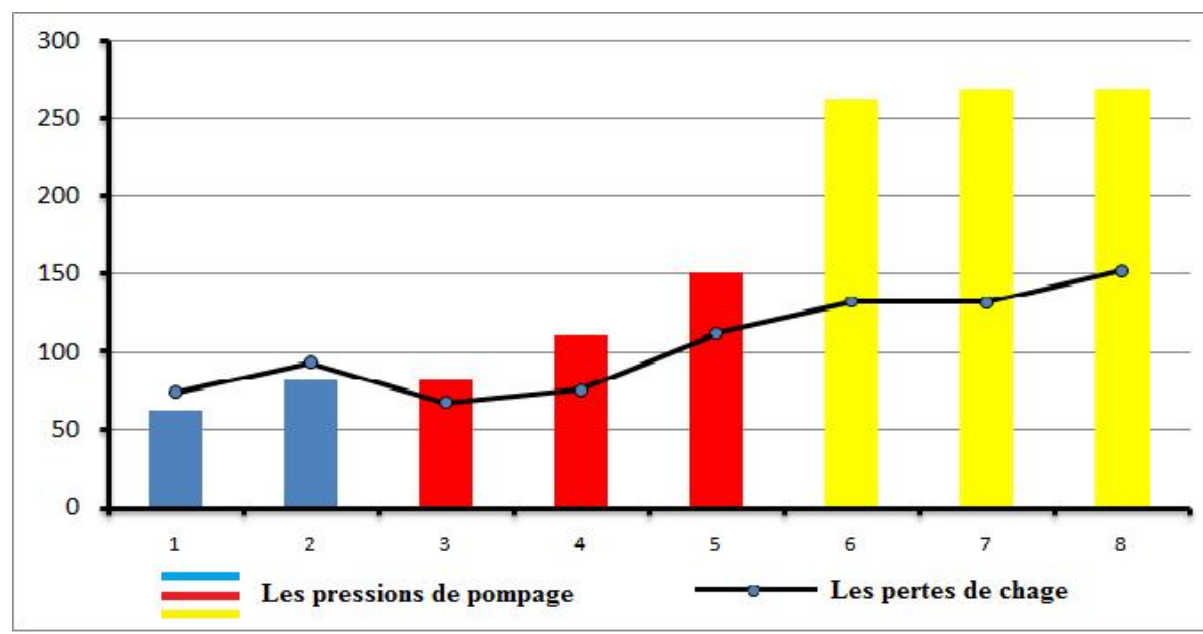
Tableau X : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 12.1/4".

XI. Calcul de la puissance requise pour la fonction pompage lors du forage de la phase 8" 1/2:

	La progression [m]	Débit moyen Q [l/min]	Pression moyenne P [KPa]	Temps de forage T [Heure]	Puissance Hydraulique P _{hy} [Kw]	Energie Hydraulique E _{hy} [MJ]
1 ^{er} jour	158	1700	26170,79	15,50	741,50	41376,01
2 ^e jour	194	1650	26859,50	18	738,63	47863,62
3 ^e jour	191	1650	26170,79	17	719,69	44045,43
4 ^e jour	333	1650	26170,79	24	719,69	62181,79
5 ^e jour	287	1650	26859,50	23,25	738,63	61823,85

Tableau XI : les puissances et les énergies de pompage mises en jeu en phase 8" 1/2.

XII. Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge :



Histogramme de comparaison entre les pressions de pompage et les pertes de charge dans le puits REJ-01.