

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



*UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU*

*FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION*

*DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE*

*Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme de MASTER Académique en Génie*  
*Mécanique*

*Option : Energétique*

*Thème*

*Transport des déblais de forage*  
*d'un puits incliné ou horizontal*

*Réalisé par :*

*M<sup>elle</sup>. AMEDAH Yamina*

*M<sup>elle</sup>. OUNOUH Fatma*

*Encadré par :*

*M<sup>r</sup>. ZOUAOUI Salah*

*M<sup>r</sup>. DJEBOURI Hassane*

*Promotion 2013-2014*

# REMERCIEMENT

*Louanges tout d'abord à dieu qui nous a donné la force  
pour terminer ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier nos chers parents pour leurs soutiens tout au  
long de nos études*

*Toutes nos infinies gratitudes à notre promoteur, Monsieur ZOUAOUI  
Salah pour son encadrement et ses aides précieuses.*

*Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur  
d'accepter le jugement de notre travail.*

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département de  
Génie mécanique.*

*Nos remerciements s'adressent aussi, à Monsieur DJEBOURI Hassane  
Et Monsieur BEHTANI*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à  
l'élaboration de ce modeste travail, qu'ils trouvent ici l'expression de  
notre profonde gratitude et respect.*

# DEDICACES

*Ce modeste travail est dédié :*

*Aux êtres les plus chers de ma vie, mon père et ma mère qui ont été les bougies allumant mon chemin vers la réussite; qui m'ont tout donné, leurs amours, leurs sacrifices pour que je puisse suivre mes études dans des bonnes conditions et qui ne cessent pas de m'encourager et de veiller pour mon bien.*

*A la mémoire de mon grand père « Djeddi OUACHKH »*

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*A ma petites sœur YASMINE*

*A mes belles-sœurs*

*A mes beaux-frères*

*A tous mes nièces et neveux*

*Surtout*

*« KENZA, SARA, LYNA et AMINE »*

*A tous mes cousines et cousins*

*A mes tantes et mes oncles*

*A ma chère AMINA*

*A tous mes amis et mes copines de chambre à Oued-Aissi*

*A ma binôme Ounouh Fatma*

*A toutes la promo de Génie mécanique Option énergétique de l'année d'étude  
2013-2014*

*A tous ceux qui sèment le bonheur dans mon chemin.*

*Et à toute la famille « AMEDAH »*

*AMEDAH YAMINA*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé durant  
mes études.*

*Ma grande mère maternelle.*

*Mes chers frères et mes chères sœurs.*

*Mes chères nièces et chers neveux*

*Ma binôme AMEDAH Yamina*

*A tous mes amis*

*O'UNO'UH Fatma*

## Liste des figures

---

### Liste des figures

#### Chapitre I

Figure (I-1) : Différentes phases de l'exploitation des hydrocarbures.....	03
Figure (I-2) : processus de forage.....	05
Figure (I-3) : Puits en J et Puits en S.....	07
Figure (I-4) : puits horizontaux et puits à long déport.....	08
Figure (I-5) : puits inclinés et puits multilatéraux.....	08
Figure (I-6) : Puits en re-entrée.....	09
Figure (I-7) : Représentation du circuit de boue de forage.....	12
Figure (I-8) : Déformation Newtonien.....	16
Figure (I-9) : Déformation plastique.....	17

#### Chapitre III

Figure (III-1) : Accumulation des déblais dans un puits incliné.....	23
Figure (III-2) : Facteur de correction en fonction de l'angle d'inclinaison pour un angle variant entre 55° et 90°.....	26
Figure (III-3) : Facteur de correction de diamètre des déblais.....	27
Figure (III-4) : le facteur de correction de la masse volumique de la boue.....	28
Figure (III-5) : la concentration des déblais dans l'annulaire .....	30
Figure (III-6) : organigramme représentatif du modèle de Larsen.....	31
Figure (III-7) : Facteur de correction de l'angle d'inclinaison de 0° à 90°.....	34
Figure (III-8) : Facteur de correction pour la masse volumique de la boue.....	35
Figure (III-9) : Facteur de correction de vitesse de rotation de la tige de forage.....	35
Figure (III-10) : Organigramme représentatif du modèle de Moore .....	37

## *Liste des figures*

---

Figure (III-11) : Organigramme représentatif du modèle de Rubiandini.....38

### **Chapitre IV**

Figure (IV-1) : La vitesse d'écoulement minimale en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs de la masse volumique de la boue .....41

Figure (IV-2) : La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs de ROP .....42

Figure (IV-3) : La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue.....43

Figure (IV-4) : La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais.....44

Figure (IV-5) : La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les trois différents diamètres de la tige de forage .....45

Figure (IV-6) : La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les trois valeurs de la masse volumique de la boue.....46

Figure (IV-7) : La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différents ROP .....47

Figure (IV-8) : La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour les petites tailles des déblais .....48

Figure (IV-9) : La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois différentes tailles des déblais .....49

Figure (IV-10) : La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour des trois valeurs des paramètres rhéologiques de la boue.....50

Figure (IV-11) : La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois valeurs différentes de RPM.....51

Figure (IV-12) : la variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois diamètres différents de la tige de forage .....52

## *Liste des figures*

---

Figure (IV-13) : Le débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différents ROP.....	54
Figure (IV-14) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour des valeurs différentes de la masse volumique de boue.....	55
Figure (IV-15) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais .....	56
Figure (IV-16) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour des différents paramètres rhéologiques de la boue.....	58
Figure (IV-17) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour des différentes valeurs de ROP.....	59
Figure (IV-18) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les valeurs de la masse volumique de la boue .....	60
Figure (IV-19) : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais .....	61
Figure (IV-20) : Le débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue .....	62

## *Liste des tableaux*

---

### *Liste des tableaux*

#### **Chapitre IV :**

Tableau-IV-1 : Les données utilisées dans la programmation du modèle de Larsen.....	41
Tableau-IV-2 : Les données utilisées dans la programmation du modèle de Rubiandini.....	45
Tableau-IV-3 : Les données utilisées dans le cas d'un puits réel.....	53
Tableau-IV-4 : les données réelles utilisées pour le calcul du débit.....	54
Tableau-IV-5 : Les résultats obtenus pour les différents ROP .....	55
Tableau-IV-6 : Les résultats obtenus pour les différentes masses volumiques .....	56
Tableau-IV-7 : Les résultats obtenus pour les différentes tailles des déblais .....	57
Tableau-IV-8: Les résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue.....	58
Tableau-IV-9 : Les résultats obtenus pour les différentes valeurs de ROP.....	60
Tableau-IV-10 : Les résultats obtenus pour les différentes valeurs de la masse volumique de la boue.....	61
Tableau-IV-11 : Les résultats obtenus pour les trois valeurs des tailles des déblais.....	62
Tableau-IV-12 : Les résultats obtenus pour les trois valeurs des paramètres rhéologiques de la boue.....	63

## *Nomenclature*

Symboles	Significations	unités
A	Surface de passage	$m^2$
$A_{an}$	Section annulaire	$m^2$
$A_p$	Section circulaire de puits	$m^2$
$A_t$	Section circulaire de la tige	$m^2$
$C_{déblais}$	Concentration des déblais	%
$D_{déblais}$	Diamètre des déblais	m
$D_p$	Diamètre de puits	m
$D_t$	Diamètre de la tige de forage	m
F	La force de poussée	N
L	Longueur des tiges de forage	m
P	Pression de refoulement	Pa
PV	Viscosité plastique	Pa.s
Q	Débit volumique	$m^3/s$
ROP	Taux de pénétration	m/h
RPM	Rotation de la tige de forage par minute	t/m
$V_{crit} (CTFV)$	Vitesse critique de transport de fluide	m/s
$V_d$	Vitesse des déblais	m/s
$\bar{V}_g$	La vitesse de glissement non corrigé de Larsen	m/s
$V_{gv}$	La vitesse de Moore	m/s
$V_m$	Vitesse moyenne dans le puits	m/s
$V_{min}$	Vitesse minimale	m/s
YP	Limite élastique	Pa
$\rho_b$	Masse volumique de la boue	$Kg/m^3$
$\rho_d$	Masse volumique des déblais	$Kg/m^3$
$\tau$	Effort de cisaillement	Pa
$\gamma_a$	Taux de cisaillement pour un fluide Newtonien	$s^{-1}$
$\gamma_s$	Taux de cisaillement pour le fluide qui entoure les particules	$s^{-1}$
$\mu_a$	Viscosité apparente	Pa.s
$\theta$	Angle de l'inclinaison	Degré (°)

***Symboles des nombres adimensionnels :***

Symboles	Significations
$C_{mv}$	Facteur de correction de la masse volumique de la boue
$C_i$	Facteur de correction pour l'angle d'inclinaison de Rubiandini
$C_{inc}$	Facteur de correction de l'angle d'inclinaison de Larsen
$C_{RPM}$	Facteur de correction pour RPM
$C_t$	Facteur de correction de diamètre des déblais
f	Facteur de frottement
$Re$	Nombre de Reynolds

# *Sommaire*

---

<b>Introduction générale .....</b>	<b>01</b>
<b>CHAPITRE I : Généralité sur le forage et les fluides de forage</b>	
I-1- Introduction .....	03
I-2- Le forage .....	04
I-2-1- Définition du forage .....	04
I-2-2-Description d'un processus de forage .....	04
I-2-2-1-Installation de forage .....	05
I-2-2-2-Garniture de forage .....	06
I-3-Profils et types de puits .....	06
I-3-1-Puits en J .....	06
I-3-2-Puits en S .....	06
I-3-4-Puits horizontaux .....	07
I-3-5-Puits à long déplacement .....	07
I-3-6-Puits inclinés .....	08
I-3-7-Puits multilatéraux .....	08
I-3-8-Puits en ré-entrée .....	09
I-4-Les boues de forage .....	09
I-4-1-Définition .....	09
I-4-2-Les différents types de fluides de forage .....	09
I-4-2-1-Les fluides à base d'eau.....	10
I-4-2-2-Les fluides à base d'huile .....	10
I-4-2-3-Les fluides de forage gazeux .....	10
I-4-2-4-Filtration des fluides de forage .....	10

## **Sommaire**

---

I-4-4-Les fonctions de la boue de forage .....	11
I-4-5-Le système de circulation de la boue de forage .....	11
I-5-Théorie liée au transport des déblais .....	12
I-5-1-Les régimes d'écoulements .....	12
I-5-2-Paramètres rhéologiques .....	13
I-5-2-1-Effort de cisaillement .....	13
I-5-2-2-Taux de cisaillement .....	14
I-5-2-3-La viscosité de fluide de forage .....	14
I-5-3-Comportements rhéologiques de la boue .....	15
I-5-3-1-Comportement Newtonien et non Newtonien .....	15
I-5-3-2- Comportement plastique .....	16
I-5-4-La masse volumique .....	17
I-5- Conclusion .....	17
<b>CHAPITRE II : Synthèses bibliographiques</b>	
II-Synthèse bibliographique .....	18
<b>CHAPITRE III : Présentation de Modèle de Larsen et de Rubiandini</b>	
III-1-Introduction .....	23
III-2-Modèle de Larsen .....	24
III-2-1-Données expérimentales .....	24
III-3-La vitesse minimale de fluide exigée pour le transport des déblais .....	24
III-3-1-La vitesse de glissement des déblais .....	24
III-3-1-1-La vitesse de glissement non corrigée .....	25
III-3-1-2- Facteur de correction pour l'angle d'inclinaison.....	25

## *Sommaire*

---

III-3-1-3-Facteur de correction pour la taille des déblais .....	26
III-3-1-4-Facteur de correction pour la masse volumique de la boue .....	27
III-3-2-La vitesse des déblais .....	28
III-3-2-1-Concentration des déblais dans l'espace annulaire estimé par Larsen.....	29
III-4-Organigramme représentatif de Larsen .....	30
III-5-Modèle de Rubiandini .....	32
III-5-1-Les corrélations de Moore .....	32
III-5-2-Modèle de Peden .....	33
III-6-Equation de la vitesse d'écoulement minimale développée par Rubiandini .....	33
III-6-1-Facteur de correction pour l'angle d'inclinaison .....	33
III-6-2-Facteur de correction de la masse volumique de la boue .....	34
III-6-3-Facteur de correction pour RPM .....	35
III-6-4-Equation de la vitesse minimale exigée pour le transport des déblais .....	35
III-7-Organigrammes représentatifs des modèles de Rubiandini et de Moore .....	36
III-7-1-Organigramme de Moore .....	36
III-7-2-Organigramme de Rubiandini .....	38
III-8- Conclusion .....	39
<b>CHAPITRE IV : Résultats et discussion</b>	
IV- Introduction .....	40
IV-1- Application1 : Calcul de la vitesse minimale .....	40
IV-1-1- Utilisation des corrélations de Larsen .....	40
IV-1-1-1-Effet de la masse volumique .....	41

## *Sommaire*

---

IV-1-1-2-Effet de ROP .....	42
IV-1-1-3-Effet des paramètres rhéologiques de la boue PV et YP .....	43
IV-1-1-4-Effet de la taille des déblais .....	43
IV-1-1-5-Effet de diamètre de la tige de forage .....	44
IV-1-2-Utilisation des corrélations de Rubiandini .....	45
IV-1-2-1-Effet de la masse volumique .....	46
IV-1-2-2-Effet de ROP .....	47
IV-1-2-3-Effet de la taille des déblais .....	47
IV-1-2-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue .....	49
IV-1-2-5-Effet de RPM .....	50
IV-1-2-6-Effet du diamètre de la tige de forage .....	51
IV-2- Application 2 : Calcul du débit d'écoulement.....	53
IV-2-1- L'équation du débit.....	53
IV-2-2- Calcul du débit requis en utilisant le modèle de Larsen.....	54
IV-2-2-1-Effet de ROP.....	54
IV-2-2-2-Effet de la masse volumique .....	55
IV-2-2-3-Effet de la taille des déblais .....	56
IV-2-2-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue .....	57
IV-2-3-Calcul du débit requis en utilisant le modèle de Rubiandini .....	59
IV-2-3-1-Effet de ROP .....	59
IV-2-3-2-Effet de la masse volumique .....	60
IV-2-3-3-Effet de diamètre des déblais .....	61
IV-2-3-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue .....	62

## ***Sommaire***

---

IV-3- Conclusion .....63

### **Chapitre V : Comparaison des deux modèles**

V-1-Introduction .....64

V-2- Comparaison des les deux modèles .....64

V-2-1- Comparaison des deux modèles dans le cas des données expérimentales.....64

V-2-2- Comparaison des deux modèles dans le cas d'un puits réel.....65

V-3-Avantages et inconvénients des modèles de Larsen et de Rubiandini .....66

V-3-1-Modèle de Larsen.....66

V-3-2-Modèle de Rubiandini.....66

**Conclusion générale .....68**

### **Introduction générale**

Le forage incliné et horizontal est de plus en plus employé, principalement dans les gisements de pétrole et de gaz. Les deux types se réalisent sur terre ou en mer. Les puits inclinés sont employés afin d'accéder à des réservoirs au-dessous des régions inaccessibles telles que les forêts, les marais, les marécages, les collines et pour ne pas endommager les régions peuplées. En parallèle à l'opération de forage, il s'effectue un nettoyage des puits forés. Le nettoyage des puits influe directement sur le coût, la période et la bonne réalisation de l'opération de forage. Le mauvais nettoyage peut mener à une série de problèmes tels qu'une forte traînée, le blocage de la tige à l'intérieur et de fortes exigences hydrauliques. Si la situation n'est pas manipulée correctement, ces problèmes peuvent finalement mener à la détérioration du puits. Les débris produits doivent être enlevés du puits à l'aide du fluide de forage afin d'éviter de tels problèmes. La capacité du fluide de forage remonté avec les débris est désignée généralement sous le nom de "la capacité de charge" du fluide de forage. Les paramètres les plus importants influençant sur leur capacité de déplacement peuvent être résumés en vitesse de fluide dans l'espace annulaire, la vitesse de rotation de la tige de forage, l'inclinaison du trou, les propriétés rhéologiques du fluide de forage, le taux de pénétration, et enfin la géométrie du trou et les propriétés des débris. La vitesse d'écoulement de fluide de forage est la variable dominante sur le nettoyage de trou et cela est dû à sa relation directe avec la contrainte de cisaillement agissant sur le sédiment des débris. S'il existe une couche des débris enfoncés à l'intérieur du puits, en général, une augmentation de la vitesse de fluide va l'éroder d'une manière significative. Cependant, selon les conditions de forage, les vitesses très élevées de fluides sont nécessaires pour l'élimination des sédiments, qui ne peuvent être appliquées en raison des limitations hydrauliques et physiques. Dans tels cas, la rotation de la tige peut améliorer mécaniquement le transport des déblais, et le nettoyage efficace du trou peut être réalisé même à des vitesses de fluide inférieures aux vitesses annulaires critiques de fluide requises pour empêcher le développement de lit stationnaire. L'évaluation appropriée des caractéristiques d'écoulement annulaire dans le puits, pendant les opérations de forage est tout à fait importante pour déterminer les conditions du nettoyage de trou et le choix de la pompe de boue appropriée, particulièrement quand l'inclinaison du puits est élevée.

Depuis les années 40, le problème du transport des déblais dans les puits horizontaux et inclinés a été un sujet de recherche dans l'ingénierie du pétrole. Des études initiales sont consacrées aux effets des paramètres des fluides de forage à base d'eau et d'huile sur le

## *Introduction générale*

---

transport des débris. Postérieurement des modèles mathématiques sont introduits afin de déterminer la vitesse critique de fluide pour empêcher le développement des sédiments en fonction de l'angle d'inclinaison.

En conséquence, bien que des études considérables sur le transport des déblais soient disponibles depuis des années, le mauvais nettoyage des puits horizontaux et inclinés reste toujours l'un des problèmes importants en relation avec le succès d'opération de forage. Pour cette raison, d'autres études expérimentales et théoriques sont menées, afin de comprendre le mécanisme du transport des déblais et déterminer la performance des fluides de forage à l'intérieur de puits. Tout en restant dans cet esprit, notre travail s'inscrit dans le transport des déblais de forage en puits incliné et horizontal en utilisant le modèle de Larsen et le modèle de Rubiandini. Les avantages et les inconvénients de l'un et de l'autre sont ressortis.

Ce mémoire comprend cinq chapitres :

Une vue générale sur l'opération de forage, les fluides de forage et les fonctions principales de ces derniers avec quelques notions sur la théorie du transport des déblais sont données dans le premier chapitre.

Une synthèse bibliographique des études et des recherches expérimentales effectuées sur le transport des déblais et le nettoyage des puits est exposée dans le chapitre II.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des modèles de Larsen et de Rubiandini et les corrélations utilisées pour la détermination de la vitesse de fluide exigée pour un bon nettoyage des puits.

Dans le quatrième chapitre, nous avons élaboré un code de calcul sous le logiciel MATLAB, qui permet de calculer la vitesse exigée et nous avons également étudié l'effet de la variation de certains paramètres de forage sur cette vitesse. Deux applications ont été réalisées.

Dans le dernier chapitre, nous avons effectué une comparaison de ces deux modèles et nous avons aussi déterminé les avantages et les inconvénients de chacun de ces derniers.

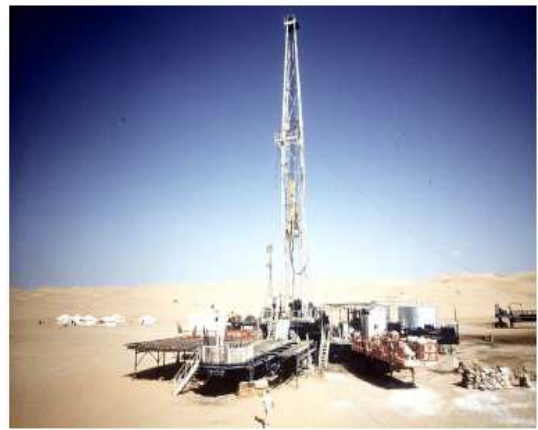
Une conclusion générale termine notre travail.

## I-1-Introduction

L'exploration pétrolière ou gazière, que ce soit en mer (offshore) ou sur terre (on shore), nécessite un processus de forage pour extraire la matière et la faire parvenir aux réservoirs d'hydrocarbures. L'acheminement des hydrocarbures impose de connecter les réservoirs à la surface par des canaux reliés à des systèmes de pompage (fig. (I-1)).



*Installation offshore*



*Installation onshore*



*Transfert des hydrocarbures*



*Système de pompages*

**Fig. (I-1) :** Différentes phases de l'exploitation des hydrocarbures

La production des hydrocarbures passe par le fonctionnement d'un processus de forage qui dépend de plusieurs organes regroupés en deux sous-ensembles :

- **Installation de forage:** L'installation de forage se situe à la surface et sert de support aux instruments nécessaires au pilotage de la garniture.
- **Garnitures:** représentent la partie opérative dans les puits.

L'application d'une force verticale, sur le trépan, orientée dans la direction du forage est nécessaire pour le déroulement des opérations. Cette action s'effectue parallèlement à la rotation du trépan dont les taillants désagrègent la roche.

La progression du forage requiert à la circulation continue et en boucle fermée **des fluides de forage** dont l'un des objectifs consiste à évacuer les déblais générés vers la surface. La nécessité de rechercher des gisements d'hydrocarbures dans des milieux de plus en plus profonds conduit à forer des puits qui s'étalent sur plusieurs kilomètres.

### I-2- Le forage

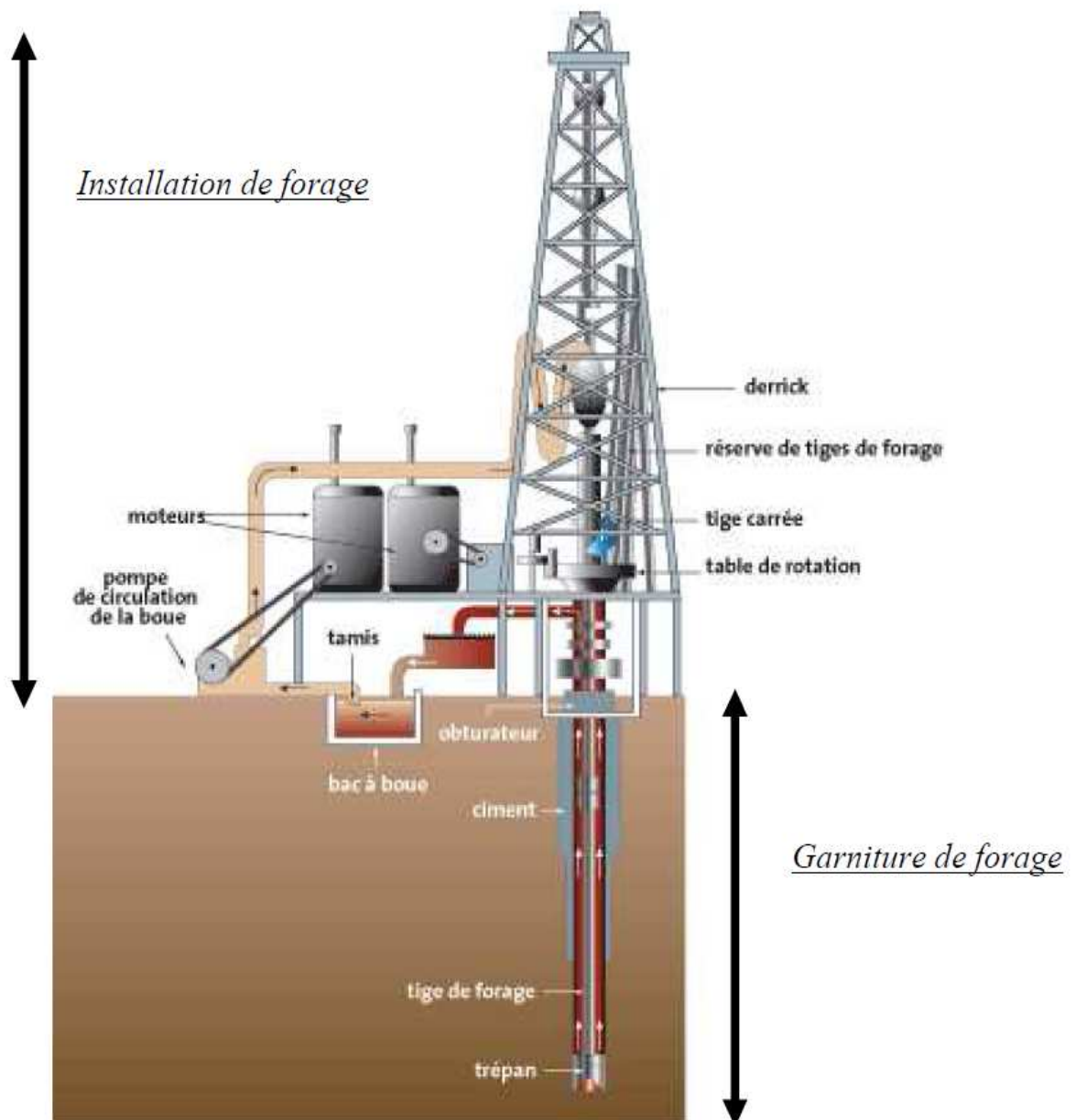
#### I-2-1-Définition

Le forage est l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses du sous-sol après avoir traversé plusieurs formations géologique qui nous permet d'atteindre le 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.

Le principe est de creuser un puits en utilisant un outil à forer « le trépan » qui doit être animé d'un mouvement de rotation autour de son axe et être appuyé avec une certaine force sur le fond du puits dont ces forces sont assurées 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, 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 <sup>[1]</sup>.

#### I-2-2-Description d'un processus de forage

Un processus de forage est un dispositif qui assure l'extraction de la matière pour réaliser un puits. Cette tâche se déroule via la contribution de plusieurs organes qui se composent de deux groupes : l'installation de forage (plate-forme) située à la surface et la garniture qui opère dans le puits. La figure (I-2) présente les différents constituants d'un processus de forage.



**Fig. (I-2) : Processus de forage**

**I-2-2-1- l'installation de forage**

Sur terre, l'équipement de forage est composé de l'installation de forage et de la garniture. L'installation de forage est la partie visible située à la surface du sol. Elle comprend une tour, appelée derrick ou mat, sur laquelle sont placés les équipements de

levage qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil.

### **I-2-2-2-Garniture de forage**

La garniture désignée aussi par arbre de forage est la partie active non visible, en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface (table de forage) et le trépan, elle correspond à la partie opérative dans le puits. Elle effectue plusieurs tâches dont la transmission de l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche, le guide et le contrôle de la trajectoire du puits, la transmission de la force de poussée ainsi que la circulation du fluide. Elle est constituée essentiellement des masses tiges et des trains de tiges. A cela se greffent des accessoires tels que les stabilisateurs des masses tiges, les amortisseurs de choc, les systèmes de mesures ... etc <sup>[2]</sup>.

### **I-3- Profils et types de puits**

La forme d'un puits entre la surface et la ou les cibles est appelée profil du puits. Autrefois limités à des profils simples essentiellement bidimensionnels, les techniques actuelles de forage dirigé permettent la réalisation de profils tridimensionnels complexes, combinant à la fois des variations d'inclinaison et d'azimut.

Les profils classiques sont:

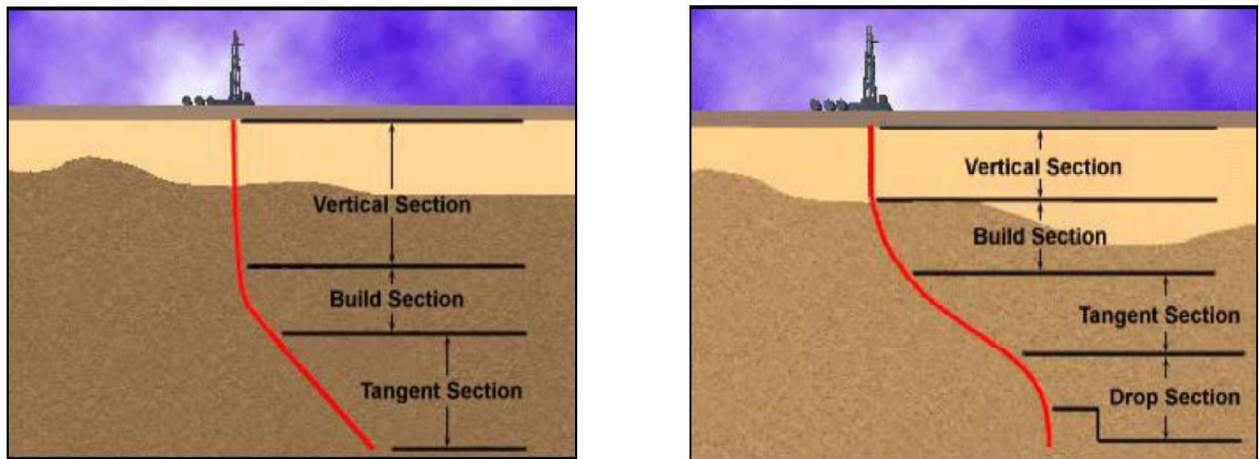
- Puits en J
- Puits en S
- Puits à double montée
- Puits horizontaux
- Puits à long déport (extended reach ou long reach wells)
- Puits inclinés dès la surface
- Puits de ré-entrée
- Puits multilatéraux

#### **I-3-1-Puits en J**

C'est la forme la plus simple et la plus commune des puits déviés. Ils débutent par une phase verticale, suivie d'une phase de montée et se terminent par une phase rectiligne.

**I-3-2-Puits en S**

D'une forme légèrement plus élaborée, ces puits commencent comme un puits en J, mais se terminent par une chute en inclinaison, quelquefois jusqu'à la verticale, le plus souvent pour des considérations de production (installation de la pompe).



**Fig. (I-3) : Puits en J et Puits en S**

**I-3-3-Puits Horizontaux**

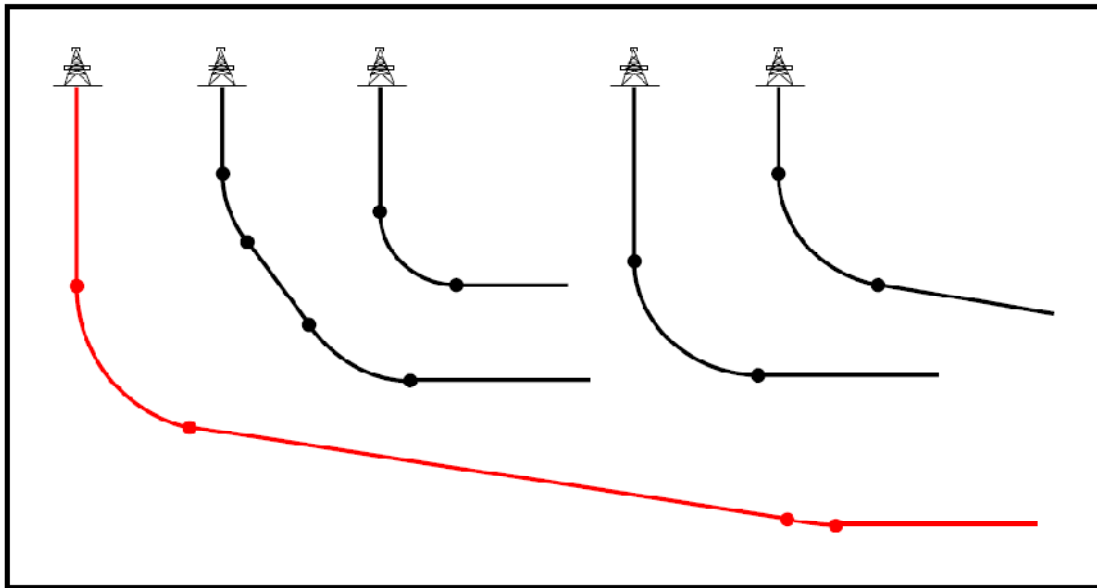
Cette terminologie couvre les puits où le réservoir est percé par une section horizontale ou subhorizontale (d'une inclinaison de 80° à 100°).

Ils peuvent être:

- à montée unique
- à montées multiples, séparées par des sections rectilignes (dites tangentielles).

**I-3-4-Puits à long déplacement**

Puits avec un déplacement horizontal de plusieurs kilomètres, foré à haute inclinaison et se terminant par un drain horizontal.



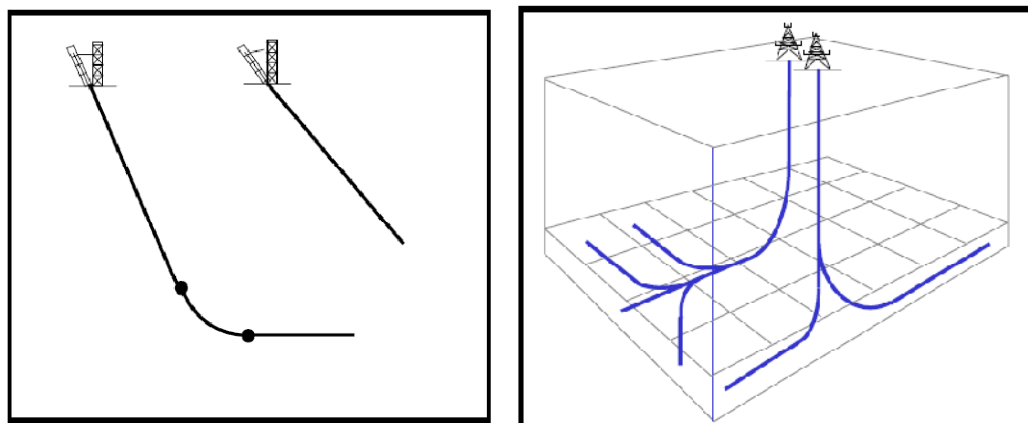
**Fig. (I-4):** puits horizontaux et puits à long déplacement

**I-3-5-Puits inclinés**

Puits avec une inclinaison dès la surface, pouvant atteindre 45 degrés, et nécessitant un appareil de forage spécial. L'utilisation de cette technique permet d'atteindre l'horizontale dans des réservoirs peu profonds.

**I-3-6-Puits multilatéraux**

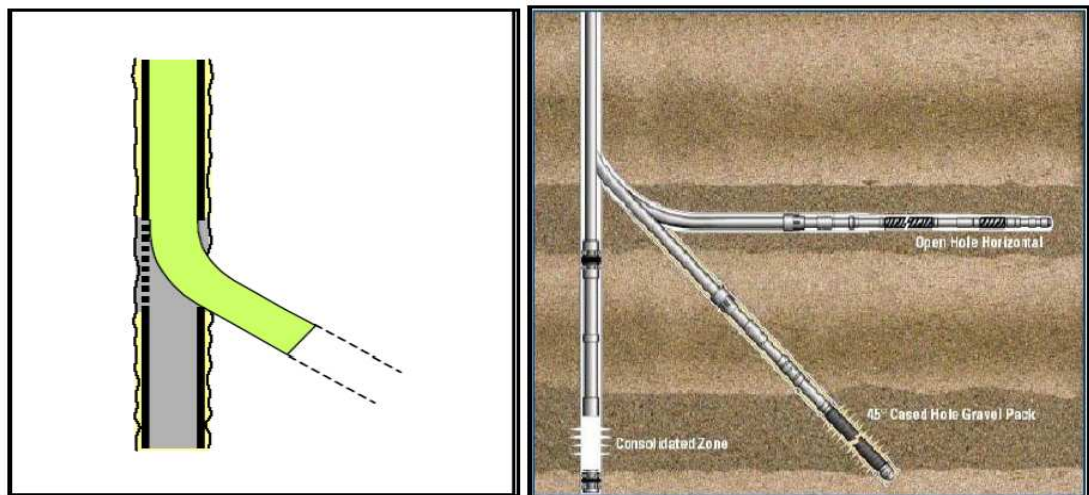
Cette technique consiste à forer plusieurs "drains" à partir d'un puits principal et donc une seule tête de puits.



**Fig. (I-5):** puits inclinés et puits multilatéraux

**I-3-7-Puits en ré-entrée**

Cette technique est utilisée intensivement depuis les années 80, consiste à abandonner le fond d'un puits existant (vertical ou dévié) pour forer latéralement un nouveau puits qui se termine souvent par un drain horizontal<sup>[3]</sup>.



**Fig. (I-6): Puits en re-entrée**

**I-4- Boues de forage**

**I-4-1- Définition**

La boue de forage, appelée aussi le fluide de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...). La boue est préparée dans des bacs à boues, elle est injectée à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où elle remonte dans l'annulaire, chargée des déblais formés au fond de puits. À la sortie du puits, elle subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Elle est ensuite réutilisée.

**I-4-2- Différents types des fluides du forage**

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

nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile.

#### **I-4-2-1- Fluides à base d'eau**

Ces fluides sont souvent désignés par "**Water-Based Muds**" ou **WBM**. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères.

#### **I-4-2-2- Fluides à base d'huile**

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. Ces fluides sont souvent désignés par "**Oil-Based Muds**" ou **OBM**. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques.

#### **I-4-2-3- Fluides de forage gazeux**

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

#### **I-4-2-4- Filtration des fluides de forage**

La filtration du fluide de forage se produit sous l'effet de la pression différentielle (différence entre la pression du fluide et celle de la formation) lorsque le fluide se trouve au contact d'une paroi poreuse et perméable. La pression dans le puits étant supérieure à celle de la formation, du liquide pénètre dans la formation tandis que les solides présents dans la boue sont déposés. Deux sortes de filtration ont lieu pendant le forage: la filtration statique, lors de l'arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide, qui entraîne une érosion des solides formés.

#### **I-4-4- Fonctions des boues du forage**

La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits. En général, les principaux rôles du fluide de forage sont:

1. Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu' à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire. Ces déblais donnent des informations géologiques sur les formations traversées lors du forage.
2. Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide.
3. Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
4. Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées. Le fluide de forage joue donc un rôle déterminant dans la résolution du problème de stabilité des parois du puits par sa densité mais également par sa capacité à former une barrière limitant les transferts de fluides entre l'espace annulaire et la formation.
5. Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie <sup>[4]</sup>.

#### **I-4-5- Le système de circulation de la boue de forage**

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.

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 un *top drive*.
- Train de tige.

- Trépan.
- Canalisation de retour de boue.
- Bac à boue <sup>[5]</sup>

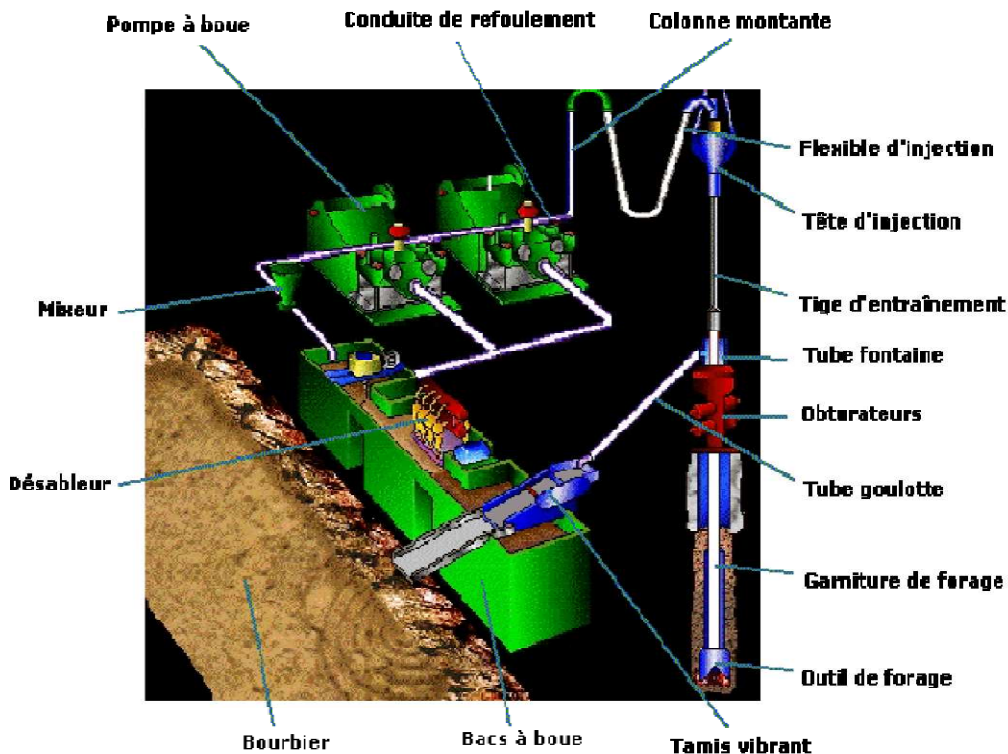


Fig. (I-7) : Représentation du circuit de la boue de forage <sup>[5]</sup>

**I-5- Théorie liée au transport des déblais**

Les paramètres rhéologiques de fluide de forage, tels que la viscosité, la densité, l'effort de cisaillement, et le taux de cisaillement, sont expliqués. En outre, certains concepts comme les régimes d'écoulement, les modèles rhéologiques tels que les fluides newtoniens et non newtoniens sont définis.

**I-5-1- Les régimes d'écoulement**

Les régimes d'écoulement ont un impact direct sur le transport des déblais, et l'écoulement peut être laminaire ou turbulent. Le régime d'écoulement dépend de la vitesse du fluide, de sa masse volumique et de sa viscosité, aussi de la taille et de la forme de l'annulaire. Le régime d'écoulement de fluide entre laminaire et turbulent est défini par le régime de transition. Pendant le forage, la rotation de la tige de forage peut créer un écoulement turbulent, ce dernier peut être aussi créé par une vitesse d'écoulement élevée

d'un fluide de basse viscosité par contre l'écoulement laminaire est créé par une faible vitesse d'écoulement d'un fluide de grande viscosité.

Le régime transitoire est commandé par les forces visqueuses et les forces d'inertie. Dans l'écoulement laminaire, les forces visqueuses sont dominantes, alors que dans l'écoulement turbulent les forces d'inertie sont les plus importantes. Le rapport des forces d'inertie sur les forces visqueuses est connu par le nombre de Reynolds. Le nombre adimensionnel de Reynolds dans l'annulaire est défini comme suit [6]:

$$Re = \frac{(D_P - D_T) * V * \rho}{\mu} \dots \dots \dots (I - 1)$$

La nature du régime d'écoulement, laminaire, turbulent ou transitoire, dépend de sa vitesse, chacun d'entre eux étant caractérisé par une valeur critique. Pour un fluide de forage typique, le nombre de Reynolds de la zone de transition séparant les régimes laminaire et turbulent varie entre 2000 et 4000 [6].

**I-5-2-Paramètres rhéologiques**

**I-5-2-1-Effort de cisaillement**

L'effort de cisaillement est la force exigée pour maintenir un taux particulier de flux de fluide, et il est mesuré comme une force par une unité de surface. L'effort de cisaillement est défini par l'équation suivante [6]:

$$\tau = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (I - 2)$$

Afin de calculer l'effort de cisaillement dans l'annulaire, on doit déterminer d'abord la force qui pousse le fluide contre les parois de puits et la surface de passage de fluide dans le puits et elles sont calculées par les relations suivantes [6]:

- La force de poussée :

$$F = P * \pi * \frac{D_P^2 - D_T^2}{4} \dots \dots \dots (I - 3)$$

- La surface de contact fluide-paroi :

$$A = \pi * L(D_P + D_T) \dots \dots \dots (I - 4)$$

D'où l'équation de l'effort du cisaillement devient :

$$\tau = \frac{P(D_p^2 - D_T^2)}{4L(D_p + D_T)} \dots \dots \dots (I - 5)$$

**I-5-2-2-taux de cisaillement**

Le taux de cisaillement est défini comme le gradient de vitesse mesuré à travers le diamètre du puits. Le gradient de vitesse peut être exprimé comme le taux de changement de la vitesse avec la distance à la paroi.

Le taux de cisaillement peut être exprimé mathématiquement comme suit [6] :

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta r} \dots \dots \dots (I - 6)$$

Le taux de cisaillement à la paroi du puits pour un fluide newtonien est défini par la relation suivante :

$$\gamma_a = \frac{12V_m}{D_p - D_T} \dots \dots \dots (I - 7)$$

Où la vitesse moyenne dans le puits ( $V_m$ ) est exprimée comme suit :

$$V_m = \frac{4Q}{\pi[D_p^2 - D_T^2]} \dots \dots \dots (I - 8)$$

La densité des déblais est plus élevée que celle de fluide de forage, et elle permet aux particules rocheuses de se déposer dans le fluide de forage. Le fluide qui entoure des particules est soumis à un taux de cisaillement ( $\gamma_s$ ) qui est défini par la relation suivante [6]:

$$\gamma_s = \frac{12 * V_m}{D_{\text{déblais}}} \dots \dots \dots (I - 9)$$

**I-5-2-3- Viscosité du fluide de forage**

La viscosité dépend avant tout de la teneur en solides contenue dans la boue et de la présence des polymères. Une augmentation de la viscosité ne pourra donc être combattue que par l'élimination de solides. D'un point de vue pratique, on définit deux types de viscosité : une viscosité apparente ( $\mu_a$ ) et une viscosité plastique (PV) souvent liée à la taille des particules, et à leur forme. La viscosité est définie comme étant le rapport de

l'effort de cisaillement par le taux de cisaillement et elle peut être calculée par l'équation suivante [4]:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \dots \dots \dots (I - 10)$$

La viscosité varie pour la plupart des fluides de forage avec la variation de taux de cisaillement.

La viscosité apparente est définie comme la viscosité d'un fluide mesurée à un taux de cisaillement donné et à une température constante. En outre, la viscosité apparente est une propriété rhéologique calculée à partir de la lecture de rhéomètre réalisé sur le fluide de forage. Pour qu'une mesure de viscosité soit significative, le taux de cisaillement doit être donné ou défini. La viscosité apparente est exprimée comme suit [7]:

$$\mu_a = PV + \frac{5YP(D_P - D_T)}{V_{crit}} \dots \dots \dots (I - 11)$$

**I-5-3- Comportements rhéologiques de la boue**

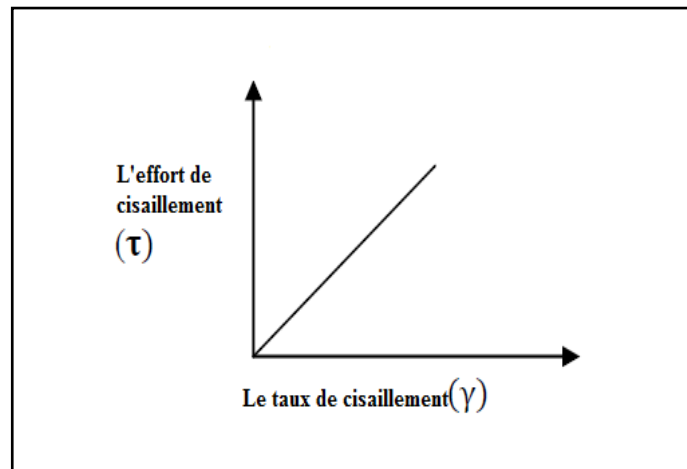
La détermination des paramètres rhéologiques de fluide de forage est importante pour donner une meilleure condition de bon nettoyage de trou. Des modèles rhéologiques sont employés pour donner une aide dans la caractérisation d'écoulement des fluides. Pour avoir une meilleure condition de la performance du fluide, la connaissance des modèles rhéologiques combinés avec l'expérience pratique est nécessaire.

**I-5-3-1- Comportement newtoniens et non newtoniens**

Les fluides de forage sont classifiés par leur comportement rhéologique. Les fluides dont la viscosité reste constante avec le changement du taux de cisaillement, on les appelle fluides newtoniens, où on peut citer comme un simple exemple l'eau. La contrainte de cisaillement en fluide newtonien est proportionnelle au taux de cisaillement.

On trouve aussi les fluides non-newtoniens, où la viscosité change avec le changement de taux de cisaillement. Dans les fluides non newtoniens, l'effort de cisaillement n'est pas proportionnel au taux de cisaillement. La plupart des fluides de forage sont des fluides non newtoniens et leur viscosité peut être influencée par le changement de la température et de la pression. La majorité de ces fluides ont des capacités

de cisaillement faibles. Cela signifie que la viscosité des fluides de forage est faible à un taux de cisaillement élevé et vice versa [6].



**Fig. (I-8) : Déformation Newtonien**

**I-5-3-2- Comportement plastique**

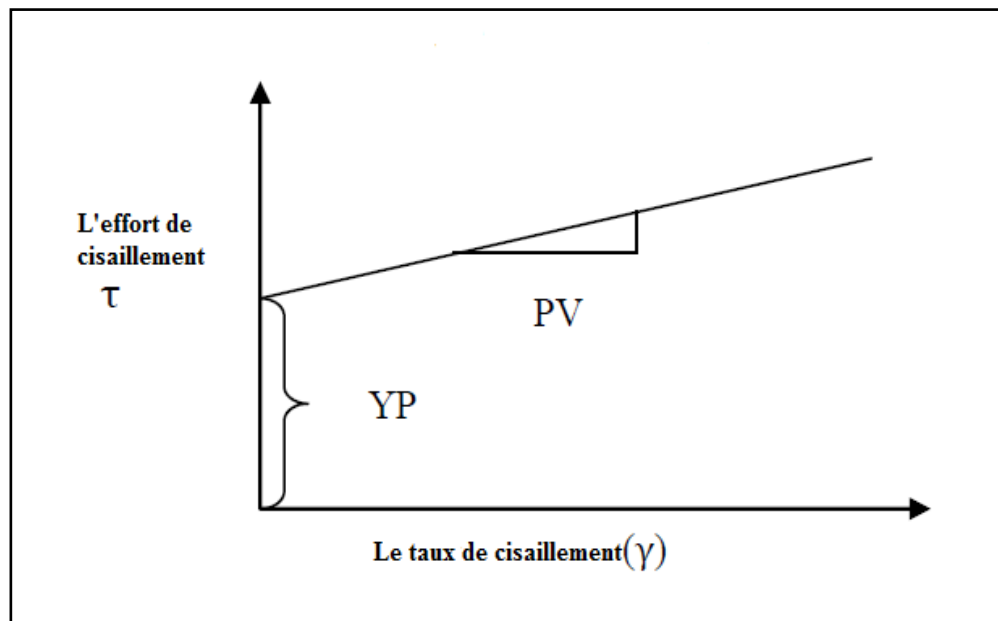
La viscosité plastique (PV) et la limite élastique (YP) sont les deux paramètres employés dans le modèle de la rhéologie plastique de Bingham qui est déterminé par l'équation suivante :

$$\tau = YP + PV(\gamma) \dots \dots \dots (I-12)$$

Ce modèle caractérise les fluides à un taux de cisaillement élevé. Il montre que la relation entre l'effort de cisaillement et le taux de cisaillement est linéaire. La viscosité plastique est la pente de la ligne au-dessus de la limite élastique (YP: yield point) représentant l'effort de cisaillement en fonction de taux de cisaillement, et la limite élastique est l'effort seuil.

Pendant un forage avec un taux de pénétration élevé, la viscosité plastique devrait être maintenue aussi basse que possible, et elle peut être obtenue en réduisant au minimum la taille des particules solides aussi petite que deux microns. Cependant, la limite élastique doit être suffisante pour transporter les déblais hors du trou, mais pas très grande puisqu'elle crée une grande pression sur la pompe centrifuge pendant la circulation [6].

Un rhéogramme type d'un fluide de Bingham en coordonnées cartésiennes :



**Fig. (I-9) : Déformation plastique**

#### I-5-4-La masse volumique

La masse volumique définie aussi par la densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions.

Cependant elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation <sup>[6]</sup>.

#### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralités sur le forage, les fluides de forage avec leurs fonctions principales. Et nous avons aussi cité quelques notions et théories liées au transport des déblais.

## **Synthèse bibliographique**

Pour étudier le transport des déblais dans des puits horizontaux et déviés ou inclinés, un certain nombre d'études a été réalisé. Ces études peuvent être séparées en deux approches basiques: i) empiriques et ii) théoriques.

**Zeidler** <sup>[8]</sup> a réalisé une des études expérimentales novatrices de nettoyage des puits. Des essais ont été effectués sur le transport des déblais avec un appareillage d'essai de 19,8 (m) de longueur. L'espace annulaire est de 0,22 (m) et le diamètre du tube de forage est de 0.11m. Il a montré que l'écoulement turbulent et la rotation du tube de forage accentuent le transport des déblais.

**Tomren et al** <sup>[8]</sup> ont expérimentalement étudié les effets de rotation de la tige, l'angle d'inclinaison du puits, l'excentricité tige/puits et les régimes d'écoulement de fluide sur le nettoyage des puits verticaux et inclinés. Des expériences ont été faites en utilisant un tube de 12,2 (m) de longueur, l'espace d'écoulement ayant 0,13 m de largeur et la tige intérieure est d'un diamètre de 0.05m. D'après ces auteurs, les facteurs principaux affectant la capacité de charge des fluides de forage dans les puits sont la vitesse du fluide, l'inclinaison du puits, et les propriétés rhéologiques de la boue. Ainsi, l'augmentation de l'inclinaison du puits réduit nettement la capacité de charge du fluide alors que l'augmentation de la viscosité de la boue améliore les performances du système de nettoyage. Par ailleurs, ils montrent que la rotation de la tige a des effets relativement peu importants sur le transport des déblais.

**Becker et al** <sup>[8]</sup> ont effectué des expériences dans des circuits à grande échelle en utilisant des fluides aux caractéristiques rhéologiques différentes (limite élastique du fluide (YP), viscosité plastique (PV), loi de comportement, etc....) et ils ont étudiés l'influence de ces paramètres sur le nettoyage des trous. Ils ont noté que l'écoulement turbulent améliore le transport des déblais pour les puits à forte inclinaison, tandis que pour les puits de faible inclinaison, les caractéristiques rhéologiques des fluides jouent un plus grand rôle.

**Sifferman et al** <sup>[8]</sup> ont effectué des recherches expérimentales sur le transport des déblais en utilisant un système d'écoulement vertical de 42,7 (m) de longueur et plusieurs tubes de forage pour déterminer les variables affectant le transport des déblais. D'après ces auteurs, ces facteurs sont la vitesse du fluide dans l'espace annulaire et ses propriétés rhéologiques. La taille des déblais et la densité des fluides de forage ont une influence modérée sur le nettoyage de trou.

**Luo et al** <sup>[9]</sup> ont proposé un modèle pour déterminer le débit minimum requis pour empêcher la formation d'un lit stationnaire et enlever les particules accumulées. La technique d'analyse employée est la méthode de Rayleigh dans laquelle les divers paramètres affectant le transport des déblais sont arrangés dans des groupements adimensionnels. Les résultats de ce modèle sont comparés aux expériences effectuées par ces mêmes auteurs.

**Larsen et al** <sup>[8]</sup> ont développé un nouveau modèle de transport de déblais pour des inclinaisons de puits élevées. Le modèle est basé sur un essai expérimental approfondi de nettoyage des puits dans l'intervalle d'inclinaison de 55° à 90° par rapport à la verticale. L'expérience est focalisée sur la vitesse de liquide minimale exigée pour empêcher les déblais de s'accumuler dans le puits et les maintenir en mouvement.

**Belavadi et Chukwu** <sup>[7]</sup> ont fait une étude expérimentale sur le transport des déblais dans les puits verticaux. Pour classer par ordre d'importance les paramètres qui affectent le transport des déblais, une unité de simulation a été construite pour observer et analyser le déplacement des déblais dans l'annulaire. Les données combinées de cette simulation ont été représentées graphiquement sous forme adimensionnelle en fonction du "rapport de transport" défini comme le rapport de la vitesse des déblais sur celle du fluide. L'analyse de ces résultats a montré que la différence entre la masse volumique des déblais et celle de fluide de forage a un effet principal sur le transport des déblais. Belavadi et Chukwu ont conclu que l'augmentation du débit de liquide augmente la performance du transport des déblais quand la masse volumique de la boue est élevée. Lorsque le fluide est de faible masse volumique et lorsque les déblais sont de grande taille, cet effet est négligé.

**Sanchez et al** <sup>[9]</sup> ont réalisé une étude expérimentale sur l'effet de la rotation de la tige sur le nettoyage du trou de forage. Ils utilisent dans leur expérience, un tube de forage de 10 cm de diamètre, un simulateur de puits de 20 cm de diamètre et 31 m de longueur. Ils ont fait varier les paramètres suivants: la vitesse de rotation, l'inclinaison de trou, la rhéologie de la boue, la taille des déblais, et le débit d'écoulement. Sanchez a constaté que la rotation de la tige de forage a un effet plus ou moins important sur le nettoyage du trou en fonction de l'angle d'inclinaison du puits. Il conclue la rotation de la tige de forage conduit à l'amélioration du nettoyage de trou, plus encore dans le cas des puits à forte inclinaison c'est-à-dire à 90 degré.

**Rubiandini** <sup>[9]</sup> a développé un modèle pour estimer la vitesse minimale de la boue requise pour le transport des particules solides en apportant une modification au modèle de Moore de

calcul de la vitesse de glissement des déblais dans les puits verticaux, pour l'adapter au cas des puits inclinés. Des facteurs de correction sont obtenus en utilisant l'analyse de régression à partir des données expérimentales du modèle de Peden et du modèle de Larsen de calcul de la vitesse minimale de transport ( $V_{min}$ ) dans les puits verticaux. Rubiandini a abouti à une équation modifiée pour déterminer la vitesse d'écoulement minimale requise pour transporter les déblais dans un puits incliné. Cependant des différences importantes avec les autres modèles existants sont apparues lors des tests de validation de son modèle.

**Ford et al** <sup>[9]</sup> ont mis en point un programme informatique qui pourrait être employé dans les calculs de la vitesse minimale de transport (MTV). Ce programme basé sur de nombreux travaux théoriques et expérimentaux, est conçu comme un outil de conception d'analyse et d'optimisation des procédés du transport des déblais. Il pourrait également être pour permettre de choisir convenablement les paramètres de forage et les propriétés du fluide requis pour l'opération du nettoyage.

**Yu et al** <sup>[8]</sup> ont étudié expérimentalement l'effet de la rhéologie des fluides de forage, la masse volumique de la boue, l'inclinaison du puits foré, la vitesse de rotation de la tige, l'excentricité trou-tige, le taux de pénétration (ROP) et le débit de fluide. Les résultats expérimentaux ont montré que la rotation du tube de forage, et les paramètres rhéologiques des fluides de forage ont des effets importants sur l'efficacité de transport des déblais.

**Mirhaj et al** <sup>[8]</sup> ont mené des travaux expérimentaux sur le transport des déblais dans les puits fortement inclinés, dont l'objet principal porte sur la détermination de la vitesse minimale de transport exigée pour porter tous les déblais hors du puits. L'influence des variables suivantes est étudiée: le débit d'écoulement, l'angle d'inclinaison, les propriétés rhéologiques de la boue et sa masse volumique, la taille des déblais et l'excentricité de la tige de forage. Ils ont développé un modèle basé sur les données obtenues aux angles d'inclinaison compris entre  $55^\circ$  et  $90^\circ$ . Les résultats du modèle sont confrontés aux valeurs expérimentales pour tester sa validité.

**Bilgesu et al** <sup>[8]</sup> ont examiné l'effet des propriétés de la boue sur l'efficacité de transport des déblais pour des puits verticaux et horizontaux. Ils ont remarqué que l'augmentation du débit de fluide a un effet nettoyant plus remarquable les particules de petites dimensions et dans les cas des puits horizontaux.

**Nazari et al** <sup>[8]</sup> ont fait une revue exhaustive des études portant sur les modèles de transport des déblais dans le cas des puits inclinés et ont proposé une méthode de gestion et contrôle des opérations de nettoyage de ce type de puits.

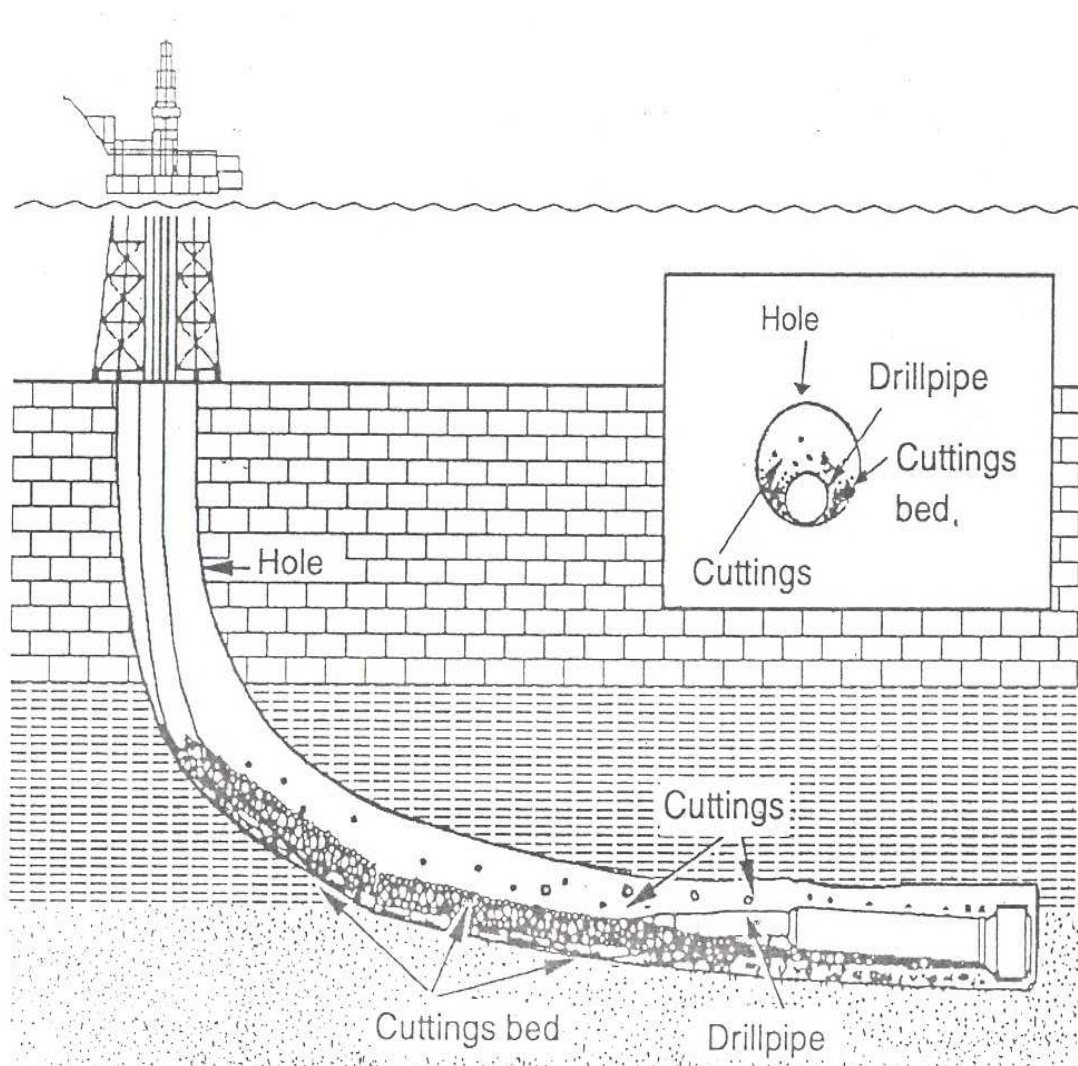
**Clark et Bickham** <sup>[9]</sup> ont établi un modèle mécaniste pour analyser le transport des déblais en s'appuyant sur les propriétés du fluide. Un ensemble de quatre équations est proposé pour décrire les trois modes du transport des déblais : roulement, soulèvement et mis en ordre des déblais. Les deux premières équations servent à calculer la vitesse critique pour assurer le roulement et la suspension des particules. La troisième équation est basée sur la théorie de la stabilité de Kelvin-Helmholtz et sert à déterminer la vitesse qui permet de casser le lit formé par les déblais au fond de la conduite et de les disperser dans la section transversale du puits. La quatrième équation détermine la vitesse du mélange dans le cœur de l'espace annulaire apte à assurer que la concentration des déblais en suspension ne dépasse pas cinq pour cent. La plus grande vitesse annulaire obtenue est considérée comme la vitesse critique pour un transport efficace des déblais. Ils ont remarqué que les différences notables existant entre les prédictions des modèles théoriques et les valeurs réelles trouvées lors des expériences pour ces vitesses des fluides de nettoyage.

**Okrajni et Azar** <sup>[8]</sup> ont étudié expérimentalement l'influence des caractéristiques rhéologiques de la boue sur le nettoyage des puits. Dans cette étude, ils ont identifié trois zones pour le transport des déblais en fonction de l'angle d'inclinaison : la première zone de 0 à 45°, la deuxième de 45 à 55° et la troisième zone de 55° à 90°. Ils montrent qu'en régime turbulent, le transport des déblais n'est pas affecté par les propriétés rhéologiques de la boue ceci dans l'ensemble des trois zones. Si l'écoulement est laminaire, une valeur plus élevée de débit de la boue réduit la concentration en déblais et conduit à une meilleure efficacité du transport. Cet effet est plus significatif dans la gamme des puits de faible inclinaison (la région 1) et devient presque négligeable dans la région 3. Les auteurs ont également observé un nettoyage inefficace (c.-à-d. une concentration plus élevée en déblais) dans les puits fortement inclinés (40 à 45 °) surtout quand le débit est faibles. Ils ont également montré que l'excentricité a peu d'effet lorsque l'inclinaison est faible (zones 1 et 2) et ce quelque soit le régime d'écoulement. Son effet devient modéré dans la zone 3 pour un écoulement turbulent et significatif pour un écoulement laminaire. Ils ont également observé que le débit de la boue a un effet dominant sur le nettoyage de puits.

**Ali Piroozian et al** <sup>[10]</sup> ont étudié expérimentalement l'influence de la viscosité, la vitesse du fluide de forage et de l'inclinaison sur le transport des déblais dans les puits horizontaux et inclinés. Dans leur étude, les auteurs ont considéré trois types de fluide de forage, en écoulement dans une conduite de 5.2 m de longueur et de 0.05 m de diamètre comme section d'essai. Ils ont déterminé la quantité des déblais transportés à partir des mesures de poids. Le résultat de l'expérience montre que pour une vitesse d'écoulement constante, l'augmentation de la viscosité du fluide de forage améliore la CTP (CTP: cuttings transport performance) approximativement de 8 % pour tous les angles d'inclinaison à condition que le régime d'écoulement reste turbulent. Aussi bien, l'augmentation de la viscosité que la transition vers un régime d'écoulement laminaire conduit à une diminution du CTP d'une valeur de 12% en moyenne.

**III-1-Introduction**

Ce chapitre est consacré à la présentation de deux modèles empiriques: le modèle de Larsen et le modèle de Rubiandini et nous nous intéressons aux corrélations développées par chacun d'entre eux afin de déterminer la vitesse d'écoulement du fluide exigée pour avoir un nettoyage efficace et éviter l'accumulation des déblais dans les puits notamment inclinés comme le montre la figure (III-1). Les démarches à suivre sont résumées dans des organigrammes représentatifs.



**Fig. (III-1) : Accumulation des déblais dans un puits incliné [8]**

### III-2-Modèle de LARSEN

Larsen dans son modèle a développé des corrélations empiriques basées sur des travaux expérimentaux considérables. Ses études ont analysé plusieurs facteurs qui affectent le transport des déblais dans l'espace annulaire. Les paramètres considérés pour l'étude sont l'angle d'inclinaison, le débit de la boue dans l'espace annulaire, la rhéologie et la masse volumique de la boue, l'excentricité, la taille des déblais et la vitesse d'avancement. Larsen a proposé trois équations essentielles sur la base de l'étude expérimentale, la première est celle de la vitesse des déblais tandis que la deuxième équation porte la vitesse de glissement. La troisième équation est celle de la vitesse critique de transport qui est la somme des deux premières vitesses<sup>[7]</sup>.

#### III-2-1-Données expérimentales

L'expérience a été effectuée dans un tube avec un diamètre intérieur de 0.127 m et une tige de forage de diamètre extérieur 0.060 m et de longueur 9.144 m. Pendant l'expérience, trois différents débits d'injection des déblais ont été utilisés, à savoir 0.076 kg/s, 0.15 kg/s, et 0.23 kg/s qui correspondent aux vitesses d'avancement de la tige de forage (ROP) de: 8, 16 et 24 (m/h) respectivement. L'effet de la rotation de la tige de forage étudié pendant cette recherche est négligeable pour ces différents paramètres. La tige tourne à une vitesse constante de 50 tr/mn durant l'expérience.<sup>[9]</sup>

### III-3- Vitesse minimale du fluide exigée pour le transport des déblais

Larsen a défini la vitesse critique de transport des déblais (CTFV) comme la vitesse minimale de fluide qui est exigée pour garder les déblais en mouvement sans interruption. À une vitesse supérieure ou égale à la vitesse critique, les déblais ne s'accumulent pas dans la partie inférieure du puits et ça signifie que le nettoyage de puits est bien réussi.

La vitesse critique du fluide pour le transport des déblais se calcule comme la somme de la vitesse des déblais ( $V_d$ ) et la vitesse de glissement ( $V_g$ )<sup>[11]</sup>:

$$V_{crit} = V_d + V_g \dots\dots\dots (III.3)$$

#### III-3-1-Vitesse de glissement des déblais ( $V_g$ )

La vitesse de glissement des particules est un paramètre important. Elle est définie comme vitesse à laquelle une particule tend à se poser dans un fluide en raison de son propre

poids. La vitesse de glissement dépend des dimensions de la particule, de sa géométrie, de sa masse volumique, et des propriétés rhéologiques des fluides [12].

Larsen dans son travail a défini la vitesse de glissement comme étant la différence entre la vitesse de transport des déblais et la vitesse d'écoulement du fluide de forage. L'équation de la vitesse de glissement est définie comme étant le produit du facteur de correction de l'angle d'inclinaison, par le facteur de correction de la taille des débris, et par celui de la masse volumique de la boue multipliés par la vitesse de glissement  $\bar{V}_g$  utilisée dans le cas des puits verticaux, et elle est représentée comme suit [11] :

$$V_{g=} \bar{V}_g * C_{inc} * C_t * C_{mv} \dots \dots \dots (III.3.1)$$

**III-3-1-1- Vitesse de glissement non corrigée**

Afin de déterminer la vitesse de glissement dans l'équation (III.3.1), Larsen a effectué une correction pour la vitesse de glissement non corrigée qui est utilisée dans les puits verticaux et aussi pour les paramètres utilisés dans ses expériences.

La vitesse de glissement non corrigée est calculée en fonction de la viscosité apparente, elle exprimée dans deux intervalles comme suit [11]:

- **Pour**  $\mu_a < 0.053$  (Pa. s) :

$$\bar{V}_g = 1.57 * 10^{-3} * \mu_a + 0.916 \dots \dots \dots (III.3.2)$$

- **Pour**  $\mu_a > 0.053$ (Pa. s)

$$\bar{V}_g = 7.78 * 10^{-3} * \mu_a + 0.587 \dots \dots \dots (III.3.3)$$

Où la viscosité apparente ( $\mu_a$ ) est calculée par la relation suivante [7]:

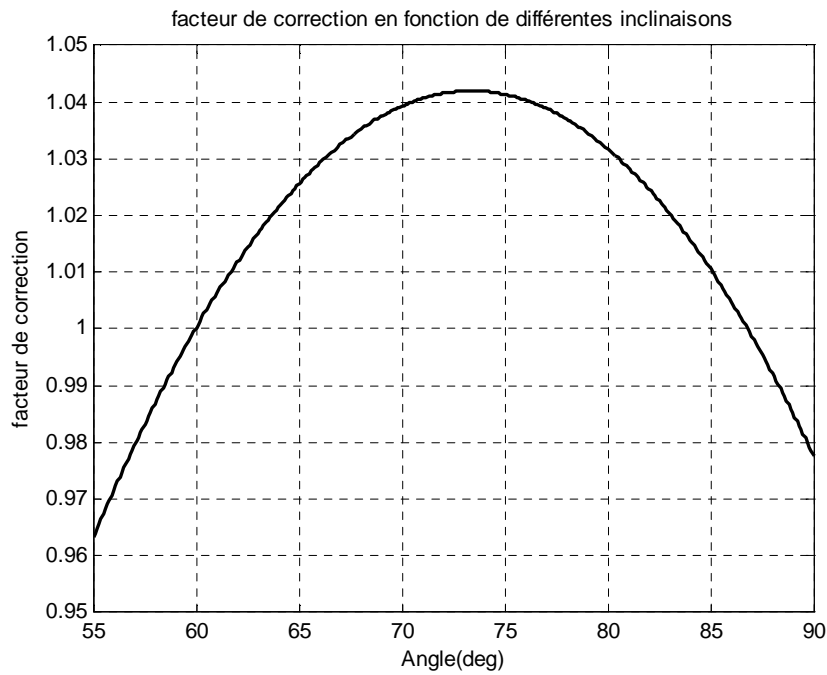
$$\mu_a = PV + \frac{5*YP(D_P-D_T)}{V_{crit}} \dots \dots \dots (III.3.4)$$

**III-3-1-2- Facteur de correction pour l'angle d'inclinaison**

Le facteur de correction pour l'angle d'inclinaison est calculé par l'expression suivante [11]:

$$C_{inc} = 0,0342\theta_{inc} - 0,000233\theta_{inc}^2 - 0,213 \dots \dots \dots (III.3.5)$$

La représentation graphique de l'équation (III.3.5) est illustrée par la figure (III-2).



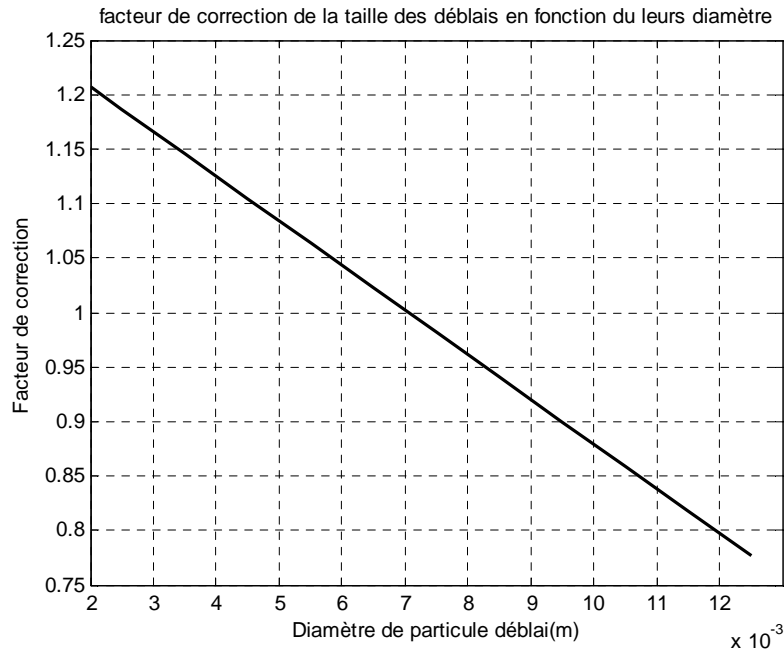
**Fig. (III-2):** Facteur de correction en fonction de l'angle d'inclinaison pour un angle variant entre 55° et 90°

**III-3-1-3- Facteur de correction pour la taille des déblais**

Le facteur de correction pour la taille des déblais est exprimé comme suit <sup>[11]</sup>:

$$C_t = -40.9 * D_{\text{déblais}} + 1,288 \dots\dots\dots (III.3.6)$$

A partir de l'équation (III.3.6), nous avons représenté la courbe qui donne la variation du facteur de correction de la taille en fonction de diamètre des particules déblais (fig. III-3) :



**Fig. (III-3):** Facteur de correction des diamètres des déblais

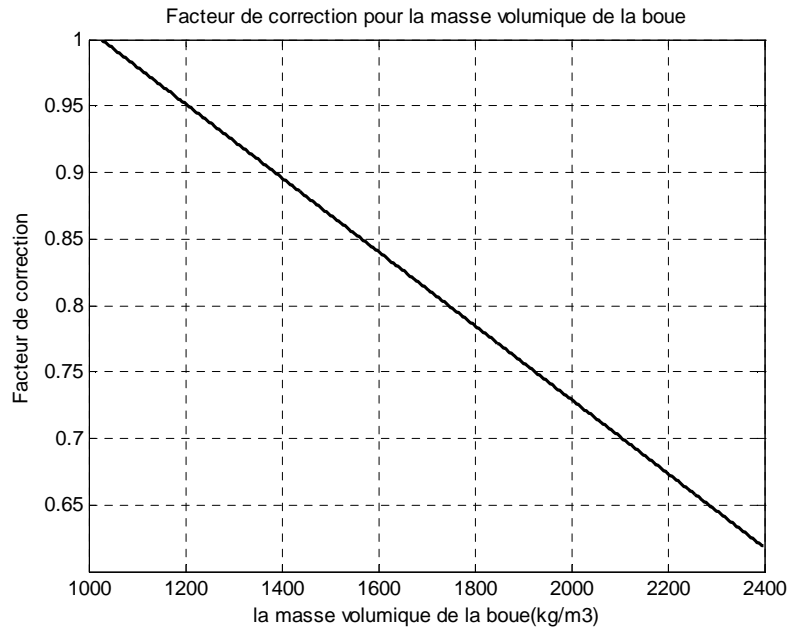
**III-3-1-4- Facteur de correction pour la masse volumique de la boue**

Ce facteur de correction peut être exprimé pour deux intervalles de valeurs de la masse volumique de la boue [10]:

$$C_{mv} = 1 - 2.779 * 10^{-4}(\rho_{boue} - 1042.5) \quad \rho_{boue} > 1042.5 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots \text{(III.3.7)}$$

$$C_{mv} = 1 \quad \rho_{boue} < 1042.5 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots \text{(III.3.8)}$$

La figure (III-4) suivante indique que le facteur de correction diminue quand la masse volumique de la boue augmente, cela signifie qu'une masse volumique de la boue élevée réduit la vitesse de glissement des déblais.



**Fig. (III-4):** le facteur de correction de la masse volumique de la boue

**Remarque**

On remarque dans les courbes qu'on a tracées que le facteur de correction du chaque paramètre diminue avec l'augmentation de sa valeur, cela indique que la vitesse de glissement des déblais de forage diminue avec l'augmentation de la masse volumique de la boue et la taille des déblais. Par contre pour l'angle d'inclinaison la vitesse de glissement augmente pour un angle variant de 55 jusqu'à 74° et diminue pour de fortes inclinaisons (de 74 jusqu'a 90°).

**III-3-2-Vitesse des déblais**

La vitesse des déblais est la vitesse que doit accomplir une particule pour arriver en surface. Larsen a déterminé la vitesse de transport des déblais (CTV ou  $V_d$ ) par une équation simple d'un bilan massique qui s'exprime comme suit <sup>[9]</sup> :

**La masse produite par l'outil de forage = La masse transportée par la boue**

$$\rho_d * Q_{inj} = V_d * A_{anl} * C_{déblais} * \rho_d \dots \dots \dots (III.3.10)$$

La vitesse de transport des déblais dans l'équation (III.3) est calculée comme suit <sup>[11]</sup>:

$$V_d = \frac{Q_{inj}}{A_{anl} * C_{déblais}} \dots \dots \dots (III.3.11)$$

Pour déterminer la vitesse des déblais en fonction de taux de pénétration, on doit convertir le débit volumétrique d'injection ( $Q_{inj}$ ) en vitesse d'avancement ROP en utilisant l'équation (III.3.12) [9]:

$$ROP = Q_{inj} * \left( \frac{1}{A_{anl}} \right) \dots\dots\dots (III.3.12)$$

Par la substitution de taux volumétrique d'injection ( $Q_{inj}$ ) de l'équation (III.3.11) par le ROP dans l'équation (III.3.12), il est possible de calculer la vitesse de transport des déblais en fonction du ROP, de diamètre de la tige de forage, de diamètre de trou, et la concentration des déblais par l'équation (III.3.13) suivante [11]:

$$V_d = \frac{ROP}{3600 \left[ 1 - \left( \frac{A_T}{A_P} \right) \right] C_{déblais}} \dots\dots\dots (III.3.13)$$

En développant l'équation (III.3.13), on arrivera à l'équation (III.3.14) ci-dessous :

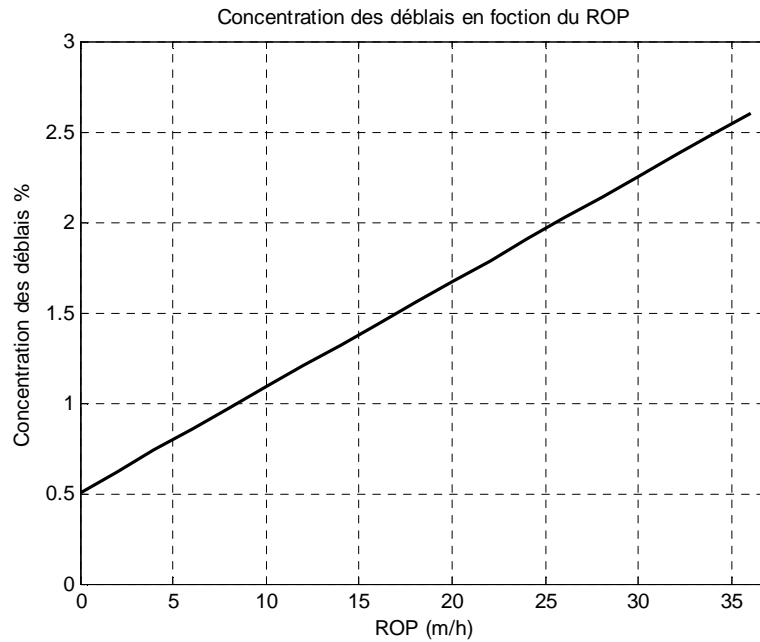
$$V_d = \frac{ROP}{3600 \left[ 1 - \left( \frac{D_T}{D_P} \right)^2 \right] C_{déblais}} \dots\dots\dots (III.3.14)$$

**III-3-2-1-Concentration des déblais dans l'espace annulaire estimée par Larsen**

À partir des études expérimentales, Larsen et al ont développé une équation pour la concentration des déblais dans l'espace annulaire qui est donnée comme suit:

$$C_{déblais} = 0.0583 * ROP + 0,505 \dots\dots\dots (III.3.15)$$

L'évaluation de la concentration des déblais dans l'espace annulaire est exprimée en fonction de la vitesse d'avancement ROP. La figure (III.5) montre la concentration des déblais dans l'espace annulaire pour un ROP variant entre 0 et 35m/h (données expérimentales).



**Fig. (III-5) :** La concentration des déblais dans l’annulaire

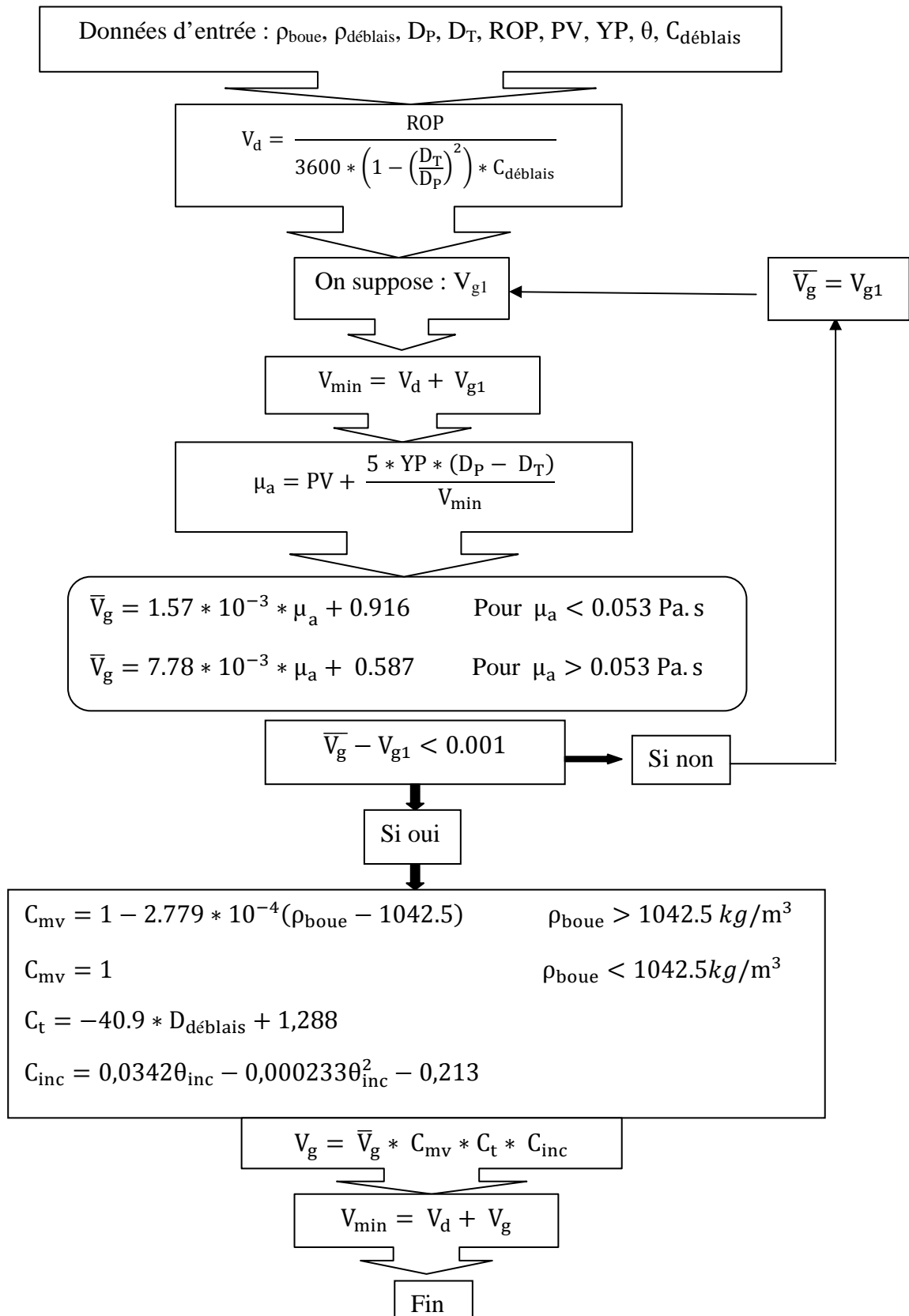
En combinant les équations (III.3.15) et (III.3.14), la vitesse de transport des déblais (CTV ou  $V_d$ ) devient <sup>[11]</sup>:

$$V_d = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{D_T}{D_P}\right)^2\right] \left[209,88 + \frac{1818}{ROP}\right]} \dots\dots\dots (III.3.16)$$

L’équation (III.3.16) indique que la vitesse de transport des déblais  $V_d$ , à une vitesse égale à la vitesse de transport critique de fluide  $V_{crit}$ , n'est pas affectée ni par les paramètres rhéologiques de la boue, ni par la masse volumique de la boue et ni par l'angle d'inclinaison du puits.

**III-4-Organigramme représentatif du modèle de Larsen <sup>[11]</sup>**

Nous présentons dans cet organigramme la méthode de calcul de la vitesse minimale de fluide exigée pour transporter les déblais de forage vers la surface et avoir un bon nettoyage des puits en utilisant la méthode de Larsen.



**Fig. (III-6):** Organigramme représentatif du modèle de Larsen

**III-5-Modèle de Rubiandini**

Le modèle de Rubiandini est basé sur le modèle de Moore pour le cas des puits verticaux, et sur le modèle empirique de Peden avec les données expérimentales de Larsen pour le cas des puits inclinés. Il a affirmé que la vitesse des déblais dépend de la géométrie des puits et la valeur de taux de pénétration ROP. Il a estimé que la masse volumique de la boue, l'angle d'inclinaison, et la rotation de la tige de forage (RPM : Drill-pipe rotation par min) sont les facteurs les plus affectant les mécanismes de transport des déblais. Par conséquent, le facteur de corrections de ces paramètres joue un rôle principal dans son modèle.

En résumé, Rubiandini a présenté une nouvelle équation pour la détermination de la vitesse minimale de la boue nécessaire pour enlever les déblais dans le puits incliné et horizontal [9].

**III-5-1- Corrélations de Moore**

Pour le calcul de la vitesse de glissement par l'utilisation des corrélations de Moore, la viscosité apparente du fluide est calculée en utilisant l'équation (III-3-4). Le nombre Reynolds est évalué comme suit :

$$Re = \frac{\rho_{boue} V_{gv} D_{déblais}}{\mu_a} \dots\dots\dots III.5.1)$$

Rubiandini a effectué une correction pour l'équation de la vitesse de glissement utilisée dans le cas d'un puits vertical et qui est déterminée par l'équation de Moore suivante [10]:

$$V_{gv} = f \sqrt{D_{déblai} \frac{\rho_{déblais} - \rho_{boue}}{\rho_{boue}}} \dots\dots\dots (III.5.2)$$

Où f le coefficient de frottement déterminé comme suit [10]:

- Pour un nombre de Reynolds supérieur à 300, le régime d'écoulement est turbulent et le facteur de frottement est égale 1.54
- Pour un nombre de Reynolds inférieur à 3, quand l'écoulement est considéré laminaire, le facteur de frottement peut être calculé par la relation suivante:

$$f = \frac{40}{Re} \dots\dots\dots (III.5.3)$$

- Pour des valeurs intermédiaires de nombre de Reynolds ( $3 < Re < 300$ ) correspondant au régime d'écoulement transitoire, le facteur de frottement peut être calculé comme suite :

$$f = \frac{22}{\sqrt{Re}} \dots\dots\dots (III.5.4)$$

**III-5-2-Modèle de Peden**

Peden a effectué une recherche expérimentale, il s'est concentré principalement sur les forces affectant le transport des déblais dans les puits inclinés. Il a aussi employé le concept de la vitesse minimale de transport. Les résultats de cette recherche expérimentale ont indiqué que l'inclinaison de puits a un effet important sur la vitesse minimale de transport (MTV). Le transport des déblais sous un mouvement de roulement n'exige pas une vitesse d'écoulement importante en comparaison au transport des particules en suspension. Peden a observé que les petits annulaires concentriques demandent une  $V_{min}$  (MTV) moins importante pour le nettoyage de puits que les plus grands annulaires, et le régime d'écoulement turbulent a un effet significatif sur le nettoyage des puits. Selon Peden, un fluide de grande viscosité est le meilleur pour un nettoyage efficace de trou et pour transporter les particules en suspension. Les fluides de faible et de moyenne viscosité sont efficaces pour le transport des déblais. En changeant le fluide de moyenne viscosité par un autre d'une grande viscosité a donné comme conséquence une vitesse minimale de transport faible et c'est un avantage. L'expérience a prouvé que la rotation de la tige a conduit à une bonne amélioration dans le transport des déblais dans un espace annulaire plus petit, cependant, elle n'a aucun effet significatif sur le nettoyage de trou dans un espace annulaire plus grand. Enfin, Peden a noté que la vitesse de transport minimale la plus élevée est dans l'intervalle d'inclinaison de 40° au 60°, et cet intervalle est l'un des paramètres qui affecte un nettoyage de trou efficace <sup>[9]</sup>.

**III-6-Equation de la vitesse d'écoulement minimale développée par Rubiandini**

Rubiandini avant qu'il ne détermine l'expression de son équation, a commencé par la modification des différents facteurs de corrections effectués par Larsen et Moore utilisés dans l'équation de la vitesse d'écoulement minimale.

**III-6-1-Facteur de correction pour l'angle d'inclinaison  $C_i$**

Ce facteur peut être exprimé comme suit <sup>[13]</sup>:

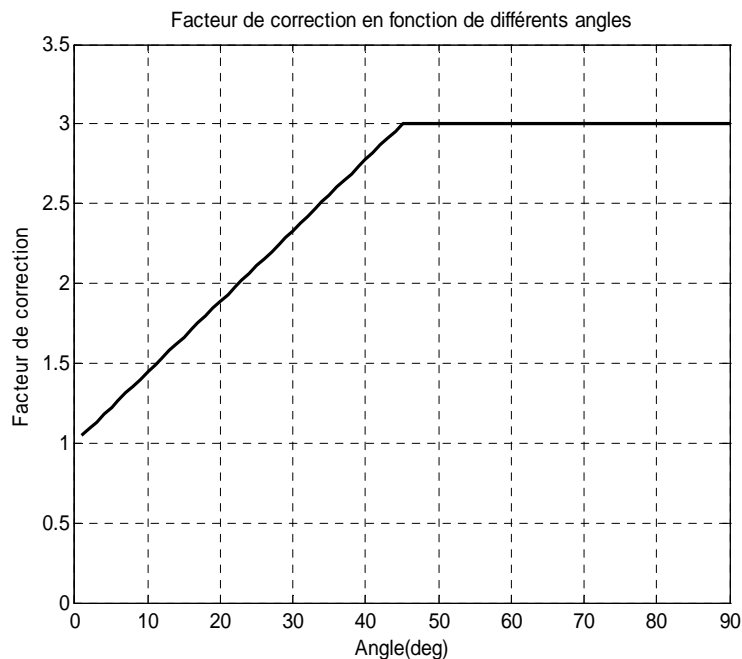
- Pour  $\theta \leq 45^\circ$

$$C_i = \left[ 1 + \frac{2\theta}{45} \right] \dots\dots\dots (III.6.1)$$

- Pour  $\theta \geq 45^\circ$

$$C_i=3 \dots\dots\dots (III.6.2)$$

La courbe représentative de ce facteur en fonction de l'angle d'inclinaison est donnée par la figure III-7.



**Fig. (III-7):** Facteur de correction de l'angle d'inclinaison de 0° à 90°

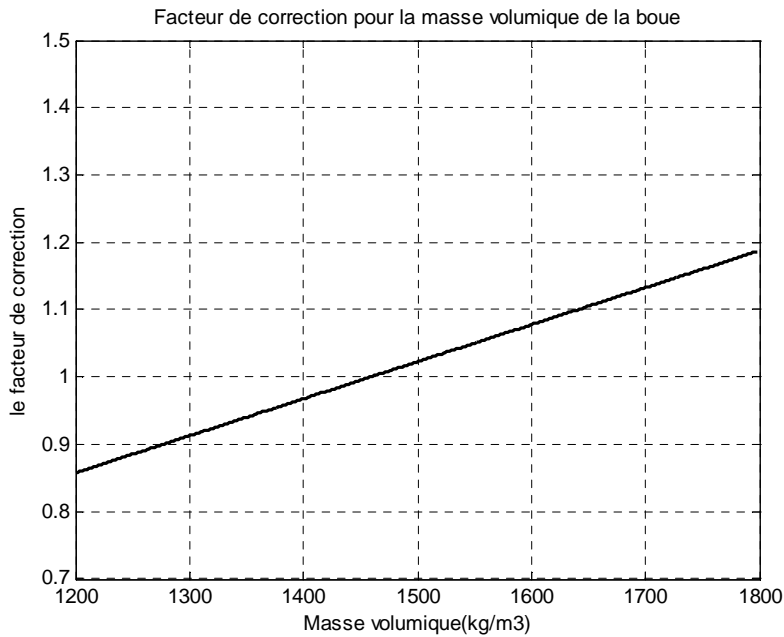
Cette figure (III-7) indique que le facteur de correction augmente avec l'augmentation de l'inclinaison jusqu'à 45°. Il reste constant de 45 à 90°.

**III-6-2-Facteur de correction de la masse volumique de la boue**

Ce facteur de correction est donné par la relation suivante :

$$C_{mv} = \frac{360 + \rho_{boue}}{1797} \dots\dots\dots (III.6.3)$$

La figure (III-8) montre l'évolution de ce facteur en fonction de la masse volumique. Elle indique que le facteur de correction augmente avec l'augmentation de la masse volumique de la boue.



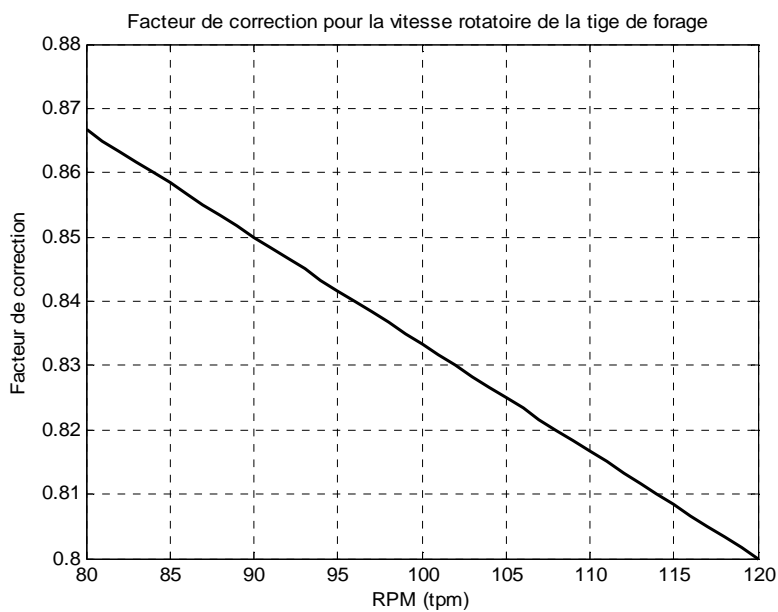
**Fig. (III-8):** Facteur de correction pour la masse volumique de la boue

**III-6-3-Facteur de correction pour RPM :**

Le facteur de correction de RPM est déterminé en basant aussi sur la méthode de Peden, et il est défini comme <sup>[13]</sup>:

$$C_{RPM} = \frac{600 - RPM}{600} \dots\dots\dots (III.6.4)$$

La représentation graphique de cette équation est donnée sur la figure III-9.



**Fig. (III-9):** Facteur de correction de vitesse de rotation de la tige de forage

**III-6-4-Equation de la vitesse minimale exigée pour le transport des déblais**

L'équation de la vitesse minimale pour les puits inclinés ou horizontaux est écrite comme suit <sup>[11]</sup>:

$$V_{\min} = V_d + [1 + C_i * C_{mv} * C_{RPM}] * V_{gv} \dots\dots\dots (III.6.5)$$

Où la vitesse des déblais  $V_d$  est calculée en utilisant l'équation du modèle de Larsen.

En conclusion, Rubiandini a validé l'équation de la vitesse minimale pour deux intervalles d'angles d'inclinaison et elle est donnée par les équations suivantes <sup>[13]</sup>:

- Pour un angle d'inclinaison  $\theta \leq 45^\circ$  :

$$V_{\min} = V_{\text{crit}} = V_d + \left[ 1 + \left( \frac{45+2\theta}{45} \right) * \left( \frac{360+\rho_{\text{boue}}}{1797} \right) * \left( \frac{600-RPM}{600} \right) \right] * V_{gv} \dots\dots\dots (III.6.6)$$

- Pour un angle d'inclinaison  $\theta \geq 45^\circ$  :

$$V_{\min} = V_{\text{crit}} = V_d + \left[ 1 + 3 * \left( \frac{360+\rho_{\text{boue}}}{1797} \right) * \left( \frac{600-RPM}{600} \right) \right] * V_{gv} \dots\dots\dots (III.6.7)$$

Le modèle de Rubiandini est appliqué pour des inclinaisons de 0° à 90°. Pour le cas particulier où l'angle d'inclinaison est de 0° (c'est-à-dire dans le cas d'un puits vertical), ce modèle correspond au modèle de Moore.

**III-7-Organigrammes représentatifs des modèles de Rubiandini et de Moore**

Les schémas suivants résument les corrélations utilisées par Rubiandini pour déterminer la vitesse minimale de fluide exigée pour le transport des déblais vers l'extérieur.

**III-7-1-Organigramme de Moore**

Nous donnons dans la figure (III.10) suivante l'organigramme du modèle de Moore:

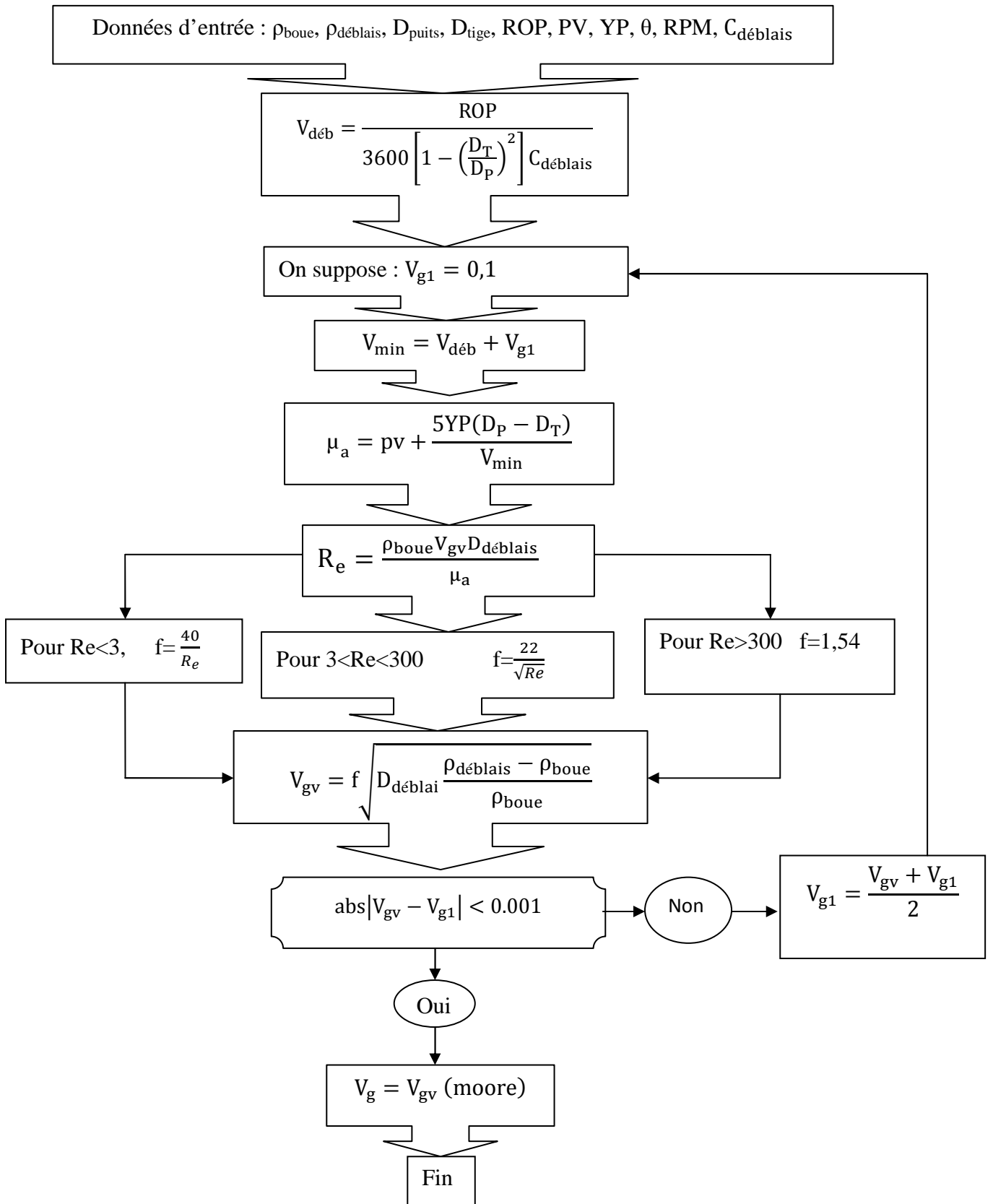


Fig. (III-10) : Organigramme représentatif du modèle de Moore

III-7-2-Organigramme de Rubiandini

La figure (III.11) suivante représente l'organigramme du modèle de Rubiandini

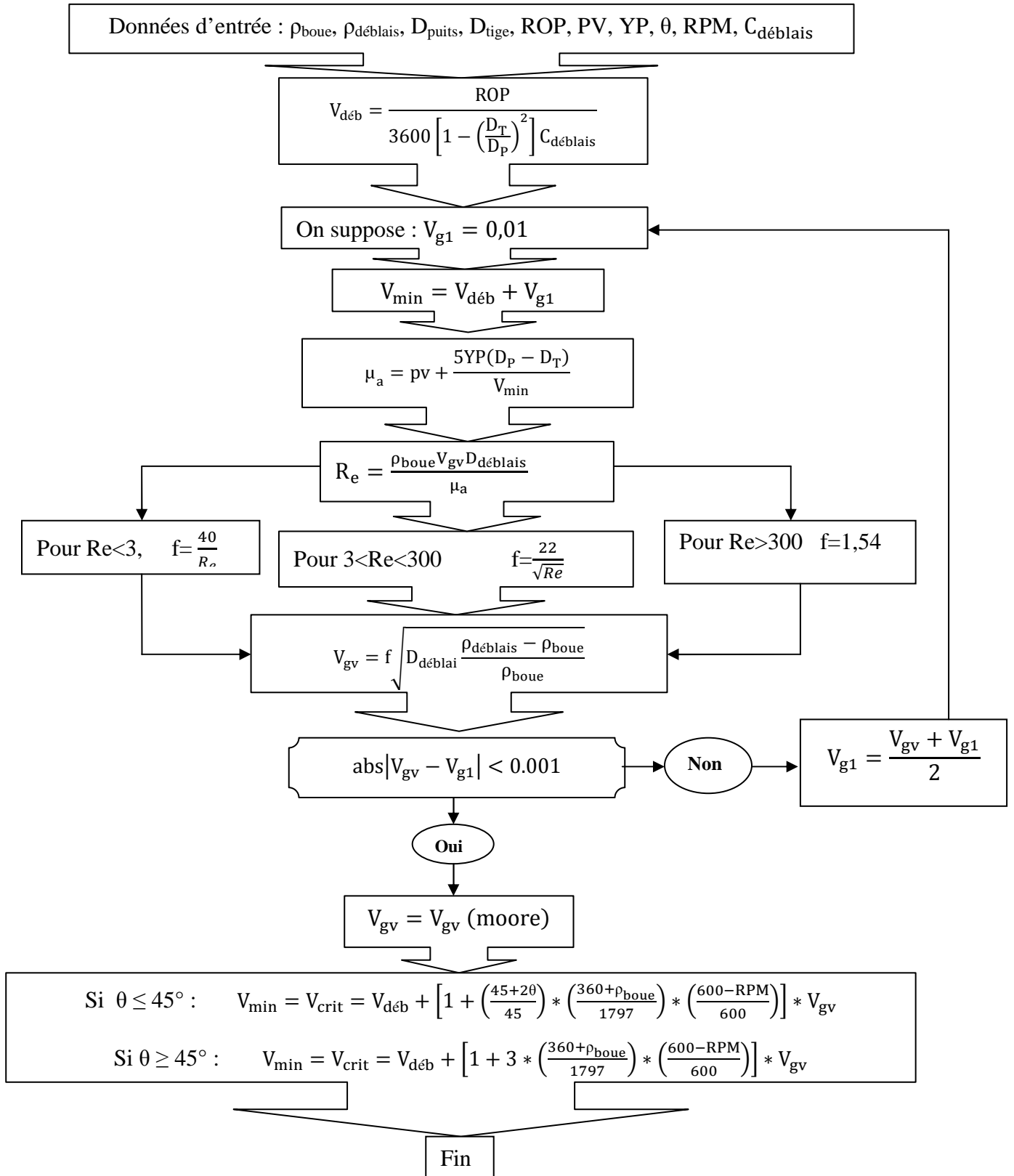


Fig. (III-11) : Organigramme représentatif du modèle de Rubiandini

**Conclusion :**

Dans ce chapitre le modèle de Larsen et le modèle de Rubiandini ont été présentés d'une façon détaillée où nous avons donné les différentes corrélations développées par ces deux auteurs afin de déterminer la vitesse du fluide de forage exigée pour le transport des déblais.

Par la suite nous avons procédé à la programmation de ces deux modèles sous l'environnement Matlab. Les résultats obtenus, notamment les vitesses minimales de transport et les débits du mélange de fluide/déblais, pour chacun des modèles sont donnés dans le chapitre IV.

**IV- Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons deux cas d'applications des deux modèles "Larsen et Rubiandini". La première est basée sur des données expérimentales de Larsen, tandis que la deuxième repose sur des données réelles. Le but principal de ce chapitre est de montrer comment les différents paramètres de forage affectent le transport des déblais.

**IV-1-Application 1: Calcul de la vitesse minimale**

Dans cette application nous représentons les résultats de modèle de Larsen et de Rubiandini. Les valeurs des paramètres utilisés sont prises de l'ensemble de données expérimentales effectuées par Larsen. À partir des programmes effectués sous l'environnement MATLAB, nous sommes arrivées à tracer des courbes représentatives. Pour tracer chacune de ces courbes, on varie l'un de ces paramètres et on maintient les autres constants. Les différents paramètres de forage utilisés dans cette étude sont cités ci-dessous:

- La masse volumique de la boue ( $\rho$ ).
- La masse volumique des déblais ( $\rho_{\text{déblais}} = 2276.7 \text{ kg/m}^3$ ).
- La vitesse d'avancement de la tige de forage ou le taux de pénétration ROP.
- La taille des déblais (ils sont assimilés à des sphères).
- La rhéologie de la boue (viscosité plastique PV, limite élastique YP).
- Le diamètre extérieur de la tige de forage.
- La rotation de la tige de forage (nombre de tours par minute RPM).
- L'angle d'inclinaison du puits.

**IV-1-1- Utilisation des corrélations de Larsen**

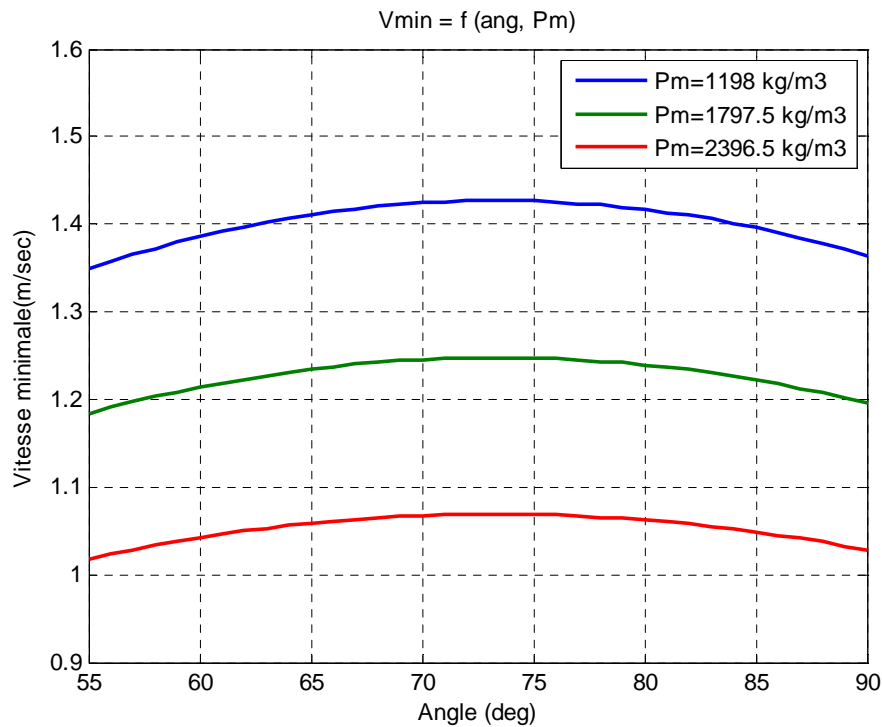
Comme on l'avait souligné précédemment, Larsen a développé un modèle empirique qui détermine la vitesse critique de fluide nécessaire pour transporter les débris issus d'un forage des puits à fortes inclinaisons entre  $55^\circ$  à  $90^\circ$ . Afin d'effectuer la programmation de ce modèle, les valeurs des paramètres utilisés sont prises de l'ensemble de données expérimentales effectuées par ce dernier et sont mentionnés dans le tableau suivant :

Paramètres	PV (Pa.s)	YP (Pa)	ROP (m/h)	D <sub>déb</sub> (m)	D <sub>puits</sub> (m)	D <sub>tige</sub> (m)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	θ (degré)
Valeurs	0.007	0.007	16.5	0.004	0.13	0.06	1027	55°-90°

**Tableau-IV-1-** Les données utilisées dans la programmation du modèle de Larsen

**IV-1-1-1-Effet de la masse volumique de la boue**

La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison est déterminée pour trois valeurs de la masse volumique de la boue qui sont : 1198, 1797.5, et 2396.5 kg/m<sup>3</sup> et les autres paramètres sont considérés constants.



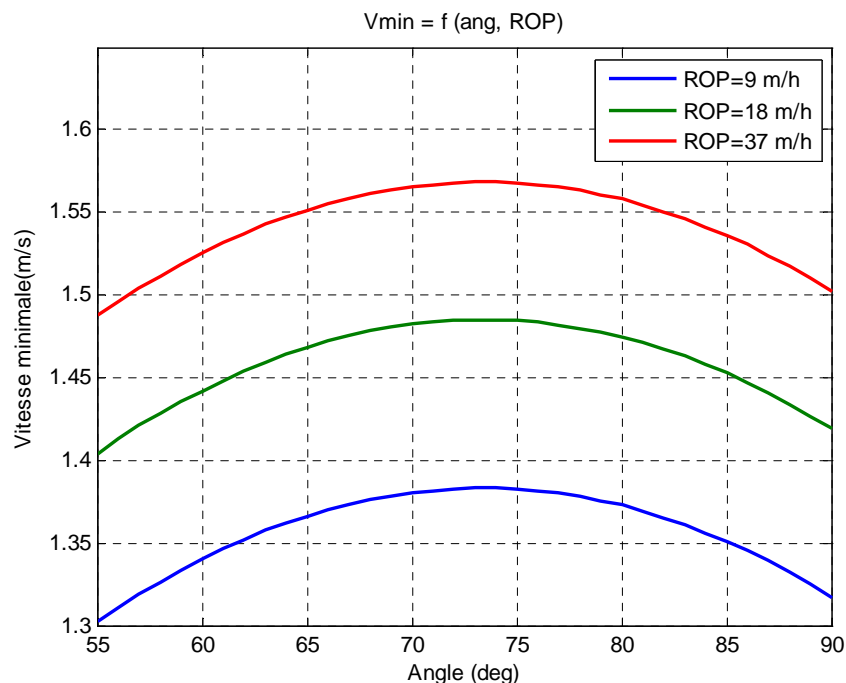
**Fig. (IV-1):** La vitesse d'écoulement minimale en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs de la masse volumique de la boue

La figure (IV-1) représente la vitesse d'écoulement dans l'espace annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison du puits, et la masse volumique de la boue. Elle indique que la vitesse d'écoulement diminue avec l'augmentation de la masse volumique. Aussi, le transport des déblais s'améliore à une masse volumique plus élevée de boue. On remarque

aussi que les courbes de la vitesse d'écoulement sont plus arrondies dans l'intervalle d'angle de  $65^\circ$  à  $80^\circ$  signifiant qu'une vitesse d'écoulement plus élevée est nécessaire pour transporter les déblais dans cette gamme d'angle. De plus, la courbe de la vitesse d'écoulement à une masse volumique égale à  $2396.5 \text{ kg/m}^3$  (courbe rouge) est moins arrondie en comparaison aux autre courbes cela signifie que la vitesse d'écoulement (CTFV) d'une boue à une masse volumique élevée est légèrement affectée par l'angle d'inclinaison.

#### IV-1-1-2-Effet de ROP

La variation de la vitesse minimale d'écoulement est donnée aussi pour trois valeurs différentes de la vitesse d'avancement de la tige de forage ROP qui sont 9, 18 et 37 m/h.

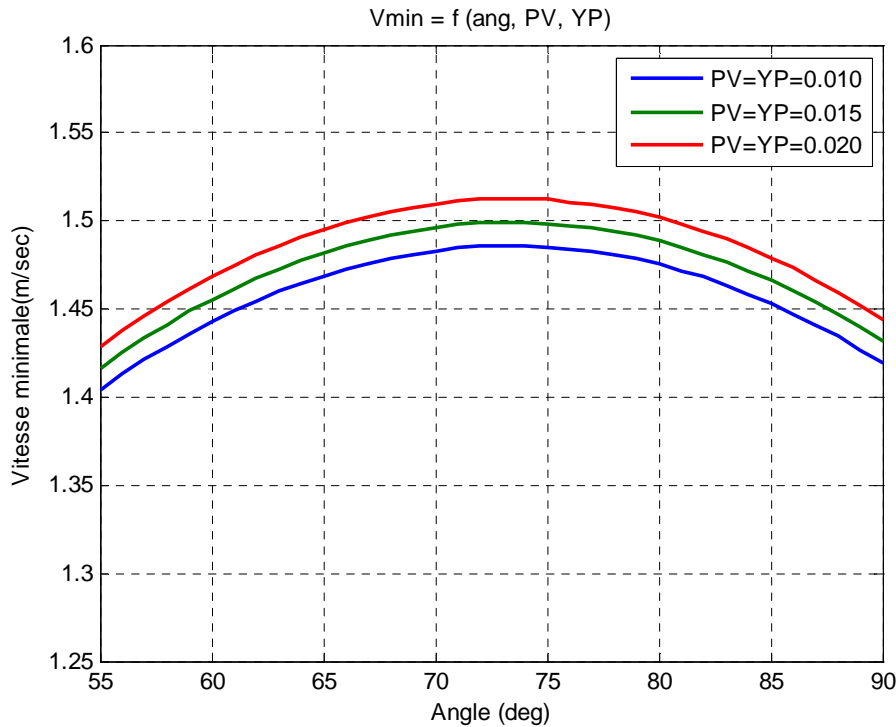


**Fig. (IV-2) :** La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs de ROP

La figure (IV-2) représente la vitesse d'écoulement de la boue dans l'espace annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison, et la vitesse d'avancement de la tige de forage ROP. Une valeur plus élevée du taux de pénétration exige une vitesse d'écoulement plus élevée pour le transport des déblais, cela est dû à l'augmentation de la concentration des déblais dans l'annulaire.

#### IV-1-1-3-Effet des paramètres rhéologiques de la boue PV et YP

Dans la figure (IV-3), on représente la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison qui est déterminée pour trois valeurs différentes des paramètres rhéologiques de la boue qui sont: PV=0.01 Pa.s (YP=0.01Pa), PV=0.015Pa.s (YP=0.015Pa), et PV=0.020 Pa.s (YP=0.020Pa).

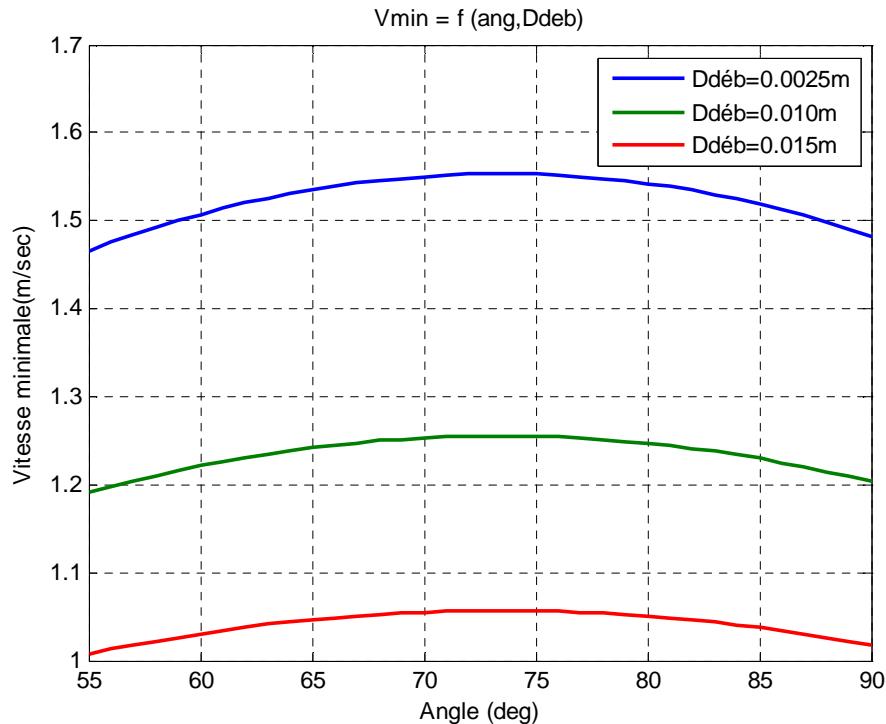


**Fig. (IV-3):** La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue

La figure (IV-3) représente la vitesse d'écoulement (CTFV) dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison et les paramètres rhéologiques de la boue. Cette figure montre que dans un puits horizontal, un fluide du forage avec une faible viscosité exige une vitesse d'écoulement faible pour transporter les déblais. Ceci indique qu'avec des paramètres rhéologiques faibles, le transport des déblais s'améliore.

#### IV-1-1-4-Effet de la taille des déblais

Les trois valeurs données pour le diamètre des déblais (0.0025, 0.010 et 0.015 m) sont utilisées pour déterminer la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison.



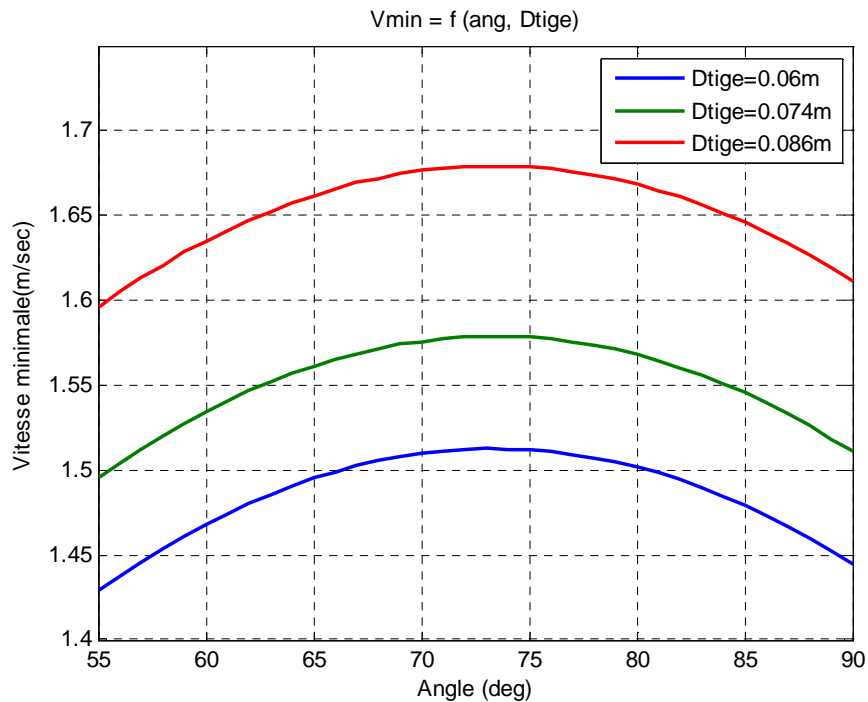
**Fig. (IV-4):** La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais

La figure (IV-4) représente l'évolution de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois tailles différentes des déblais.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure qu'il est plus difficile de transporter les déblais à faible taille dans les puits inclinés puisqu'ils exigent une vitesse d'écoulement plus élevée que les grands déblais. On donne comme explication l'infiltration ou la pénétration des déblais de dimensions assez réduites dans les pores des parois du puits.

#### IV-1-1-5-Effet de diamètre de la tige de forage

Nous avons pris trois valeurs différentes du diamètre de la tige de forage à savoir 0.06, 0.074 et 0.086 m pour calculer la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison (la figure IV-5).



**Fig. (IV-5):** La variation de la vitesse d’écoulement en fonction de l’angle d’inclinaison pour les trois différents diamètres de la tige de forage

La figure (IV-5) représente la vitesse d’écoulement dans l’annulaire en fonction de l’angle d’inclinaison, et le diamètre de la tige du forage. On remarque d’après la figure, pour un grand diamètre de la tige de forage (une petite zone annulaire) exige une vitesse d’écoulement plus élevée pour le transport des déblais.

**IV-1-2-Utilisation des corrélations de Rubiandini**

Le modèle de Rubiandini est employé pour des angles d’inclinaison entre 0° et 90°. Il a utilisé l’équation de la vitesse de glissement effectuée par Moore pour les puits verticaux en introduisant des facteurs de correction pour les différents paramètres utilisés, pour calculer la vitesse minimale de transport (V<sub>min</sub>). Les données utilisées dans le modèle de Rubiandini sont les suivantes :

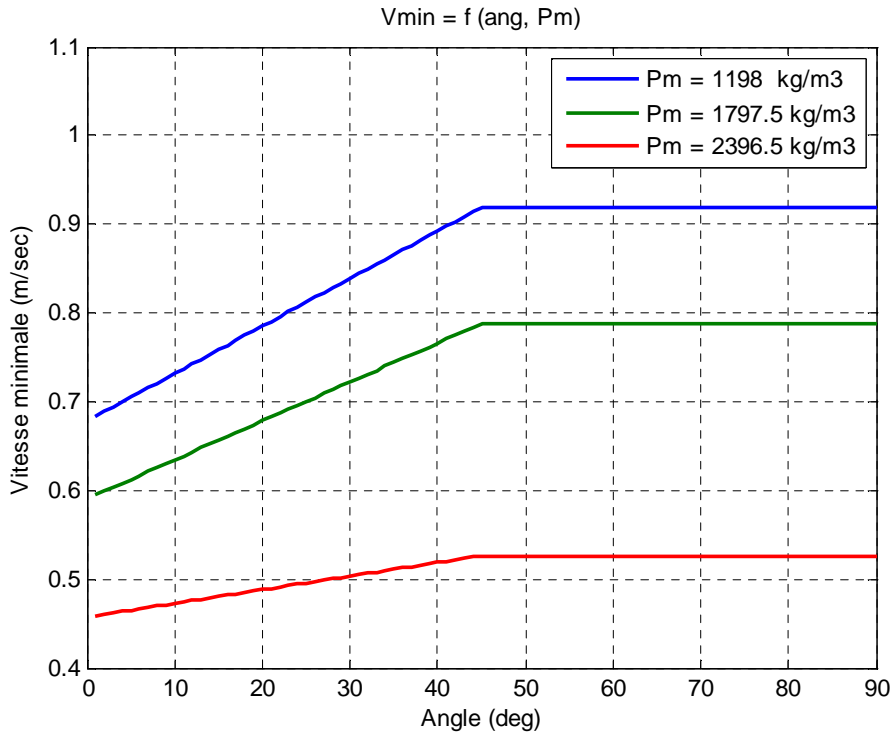
Paramètre	YP (Pa)	PV (Pa.s)	RPM (tr/mn)	ρ <sub>boue</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	D <sub>déblais</sub> (m)	D <sub>trou</sub> (m)	D <sub>tige</sub> (m)	θ (°)	ROP (m/h)
Valeurs	0.007	0.007	80	1027	0.004	0.13	0.06	0-90	16.5

**Tableau-IV-2-**Les données utilisées pour la programmation du modèle de Rubiandini

Pour effectuer la programmation et tracer les courbes, seulement l'un de ces paramètres se varie pour chaque calcul.

**IV-1-2-1-Effet de la masse volumique**

La figure (IV-6) représente la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois valeurs différentes de la masse volumique de la boue qui sont 1198, 1797.5 et 2396.5 kg/m<sup>3</sup>.



**Fig. (IV-6):** La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les trois valeurs de la masse volumique de la boue

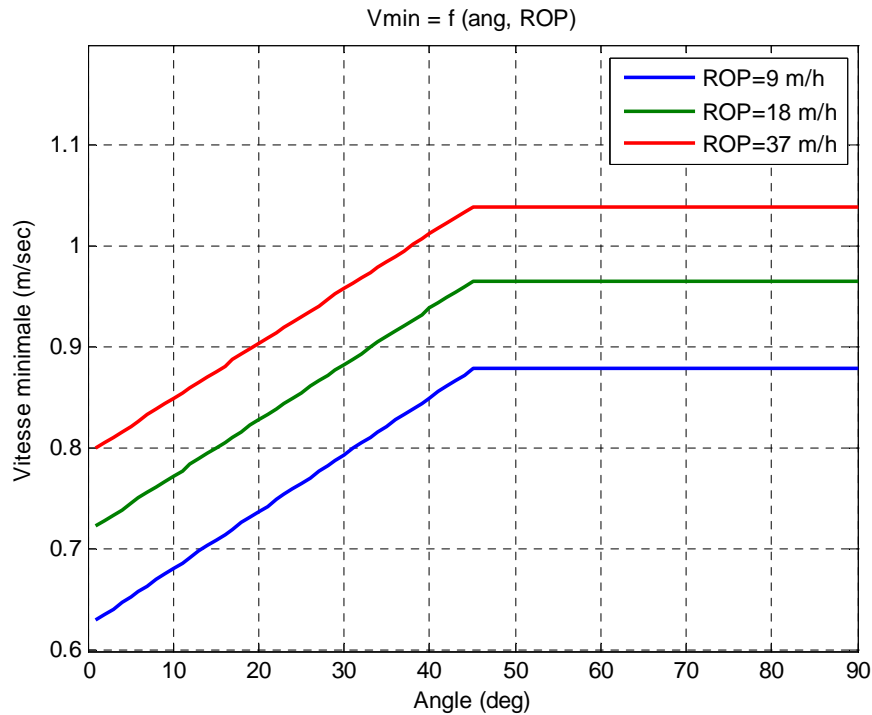
Ce modèle donne les mêmes résultats que ceux obtenus par le modèle de Larsen, c'est-à-dire quand la masse volumique de la boue augmente, la vitesse d'écoulement diminue. Par conséquent, le transport des déblais s'améliore à une masse volumique élevée de la boue. La vitesse d'écoulement augmente linéairement jusqu'à 45°, et à partir de cette valeur la vitesse d'écoulement devient constante.

On remarque aussi que pour une masse volumique élevée de la boue, il n'y a pas une grande différence pour la vitesse d'écoulement minimale exigée dans la section horizontale

en comparaison à celle exigée dans la section verticale. Ceci prouve qu'une masse volumique élevée de la boue améliore le transport des déblais dans les puits inclinés.

**IV-1-2-2-Effet de ROP**

La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison est déterminée pour trois valeurs différentes de la vitesse d'avancement de la tige de forage ROP qui sont: 9, 18 et 37 m/h.

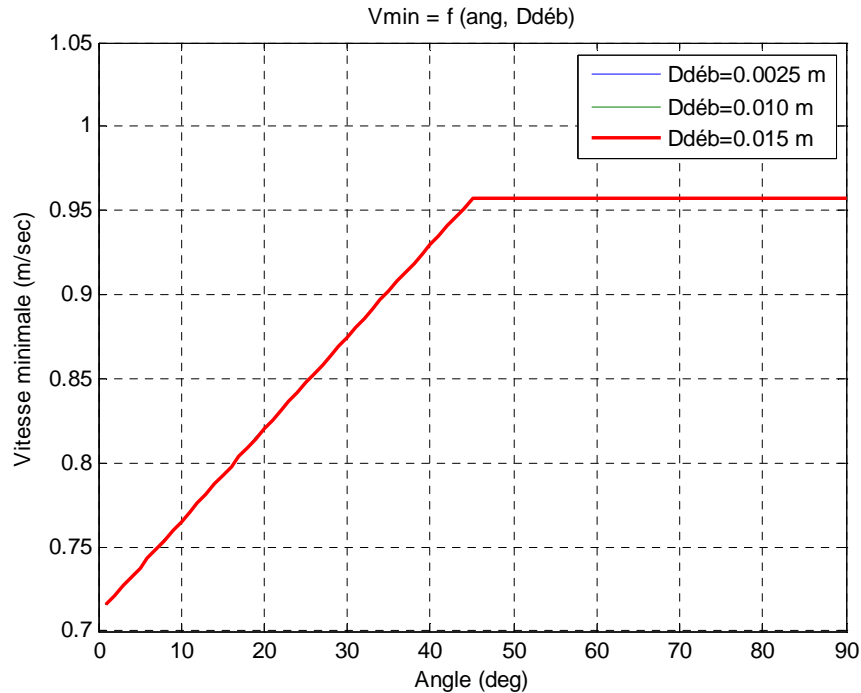


**Fig. (IV-7):** La variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différents ROP

De la figure (IV-7), on remarque qu'une valeur plus élevée de ROP exige une vitesse d'écoulement plus élevée, en raison de l'augmentation de la concentration des déblais dans l'annulaire. La vitesse minimale d'écoulement augmente constamment jusqu'à 45° et dans la gamme de 45 à 90°, la vitesse minimale d'écoulement exigée reste constante.

**IV-1-2-3-Effet de la taille des déblais**

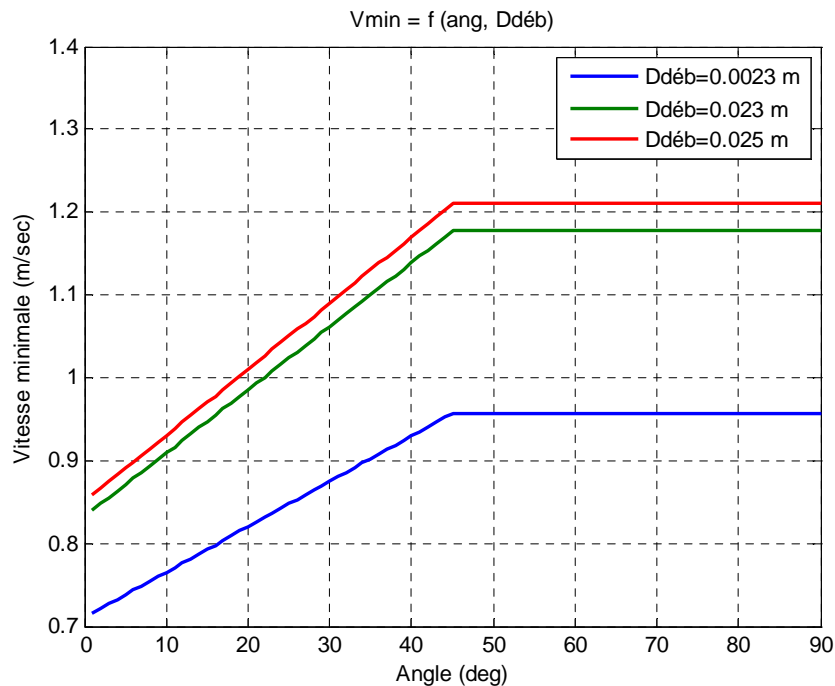
La figure (IV-8) représente l'évolution de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois différentes valeurs du diamètre des déblais qui sont 0.0025, 0.010, 0.015m.



**Fig. (IV-8):** La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour les petites tailles des déblais

On remarque que les trois valeurs de diamètre choisies donnent une même valeur de la vitesse minimale exigée (les lignes sont superposées). Ces valeurs sont les mêmes que celles employées avec le modèle de Larsen. Ceci signifie que le modèle de Rubiandini ne montre aucune variation dans la vitesse d'écoulement exigée pour transporter les petits déblais.

Dans la figure suivante, Rubiandini a choisi des grandes tailles des déblais pour déterminer l'effet du diamètre des déblais sur la vitesse de transport. Les valeurs considérées sont: 0.0023, 0.023 et 0.025 m.

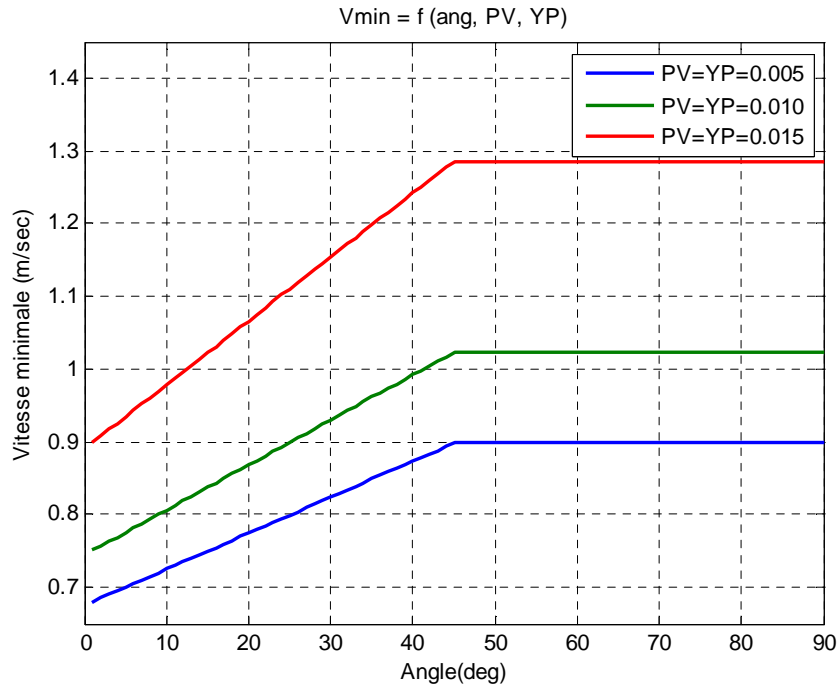


**Fig. (IV-9):** La variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois différentes tailles des déblais

La figure (IV-9) représente la variation de la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois tailles des déblais. Le résultat obtenu montre qu'il est plus difficile de transporter les grands déblais à la surface puisqu'il exige une vitesse d'écoulement plus élevée en comparant aux petits déblais. Ce résultat est totalement opposé à celui de Larsen. La raison principale est que le modèle de Rubiandini n'a pas introduit des facteurs de correction pour la taille des déblais.

#### IV-1-2-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue

Dans la figure (IV-3), on représente la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison qui est déterminée pour trois valeurs différentes des paramètres rhéologiques de la boue qui sont:  $PV=0.01$  Pa.s ( $YP=0.01$ Pa),  $PV=0.015$ Pa.s ( $YP=0.015$ Pa), et  $PV=0.020$  Pa.s ( $YP=0.020$ Pa).

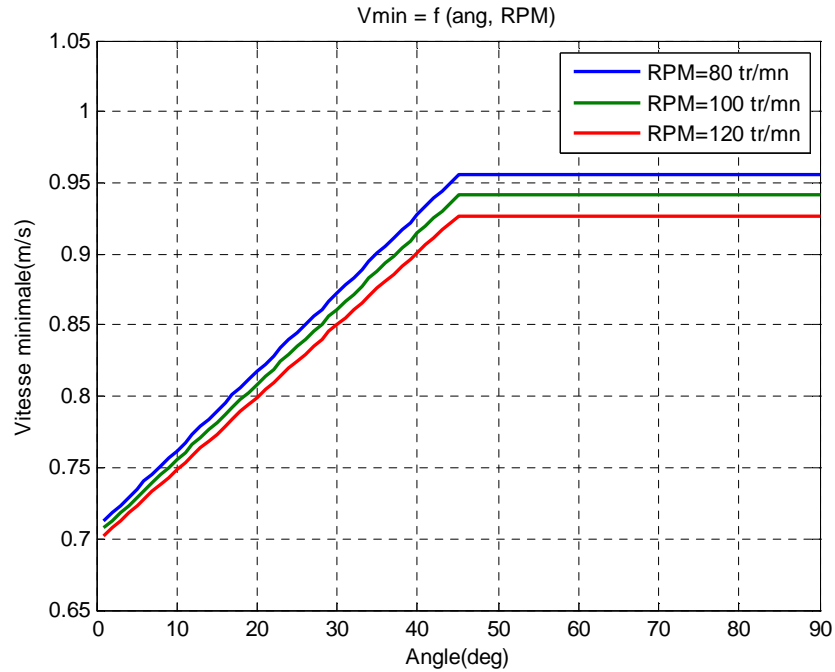


**Fig. (IV-10):** La variation de la vitesse minimale dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois valeurs des paramètres rhéologiques de la boue

La figure indique que le fluide de forage avec des paramètres rhéologiques (tels que la viscosité plastique et la limite élastique) élevés exige une vitesse d'écoulement plus élevée. Selon la figure (IV-10), des faibles paramètres rhéologiques (les fluides à de faible viscosité) sont nécessaires pour avoir un transport efficace des déblais.

#### IV-1-2-5-Effet de RPM :

Rubiandini, dans son modèle, a pris en considération l'effet de la vitesse de rotation de la tige de forage (RPM) afin de déterminer la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison. Les valeurs utilisées sont: 80, 100 et 120 tr/mn.

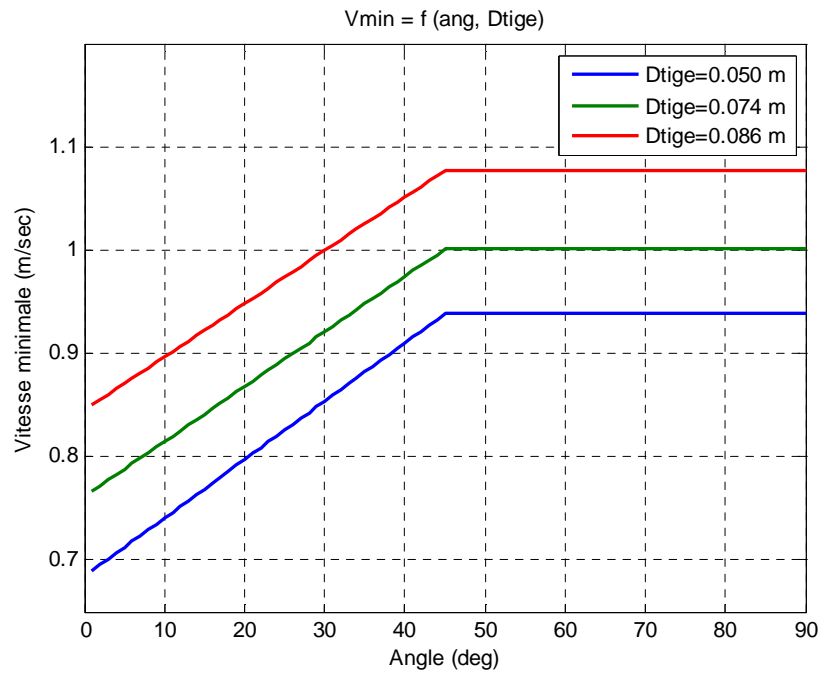


**Fig. (IV-11):** La variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois valeurs différentes de RPM

La figure (IV-11) représente la vitesse d'écoulement dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison pour des différents RPM. Cette figure montre que les valeurs élevées de RPM améliorent la capacité de transport des déblais, puisque la vitesse d'écoulement minimale diminue avec l'augmentation de RPM.

#### IV-1-2-6-Effet du diamètre de la tige de forage

Nous avons pris trois valeurs différentes du diamètre de la tige de forage à savoir 0.06, 0.074 et 0.086 m pour calculer la variation de la vitesse minimale d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison (la figure IV-5).



**Fig. (IV-12):** la variation de la vitesse d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois diamètres différents de la tige de forage

La figure (IV-12) montre la vitesse d'écoulement exigé dans l'annulaire en fonction de l'angle d'inclinaison et les diamètres différents de la tige de forage. On remarque de la figure qu'un grand diamètre de la tige mène à une augmentation de la vitesse d'écoulement (l'obtention des petites sections annulaires avec l'utilisation des grandes tiges du forage), ce résultat est le même que celui obtenu par le modèle de Larsen.

**IV-2-Application 2 : Calcul du débit d'écoulement**

Dans cette application, nous calculons le débit d'écoulement de fluide exigé pour le transport des déblais en utilisant les modèles de Larsen et Rubiandini pour le cas d'un puits réel, où on a choisi trois angles d'inclinaison (55, 75 et 90°) pour l'utilisation du premier puis deux cas (cas d'un puits vertical et cas d'un puits horizontal) pour le deuxième. Les calculs sont basés sur des données réelles utilisées dans la pratique où le diamètre de puits est de 0.216 m forée avec une tige de 0.127 m de diamètre [9].

Le but de ces calculs est de vérifier si l'utilisation des deux modèles donne des débits appartenant à l'intervalle [1500, 2000] l/min (débits typiques utilisés dans la pratique).

**IV-2-1- L'équation du débit**

Le débit d'écoulement de fluide exigé pour le transport des déblais est donné par la relation suivante :

$$Q = A * V_{min} \dots \dots \dots (IV-1)$$

Où:

A: est la section annulaire calculée comme suit :

$$A = \frac{\pi}{4} [D_{puits}^2 - D_{tige}^2] \dots \dots \dots (IV - 2)$$

$V_{min}$  : est la vitesse minimale exigée pour le transport des déblais, elle est donnée par les calculs effectués en utilisant le modèle de Larsen et le modèle de Rubiandini.

Dans ce qui suit, nous allons utiliser les différentes corrélations de cette vitesse pour calculer le débit exigé.

Pour effectuer ces calculs, nous allons adopter les valeurs des paramètres de forage citées dans le tableau ci-dessous:

Paramètres	D <sub>tige</sub> (m)	D <sub>puits</sub> (m)	ROP (m/h)	PV (Pa.s)	YP (Pa)	D <sub>déblais</sub> (m)	$\rho_{boue}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{déblais}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	RPM (tr/mn)
Valeurs	0.127	0.216	10	0.007	0.007	0.0076	1297.72	2276.7	80

**Tableau-IV-3-** Les données utilisées dans le cas d'un puits réel

Dans les calculs, les variables suivantes ont été employées pour les deux modèles et seulement l'un de ces paramètres varie dans chaque calcul:

ROP (m/h)	10	30	50
Masse volumique de la boue (kg/m <sup>3</sup> )	1297.72	1497.83	1797.4
Diamètre des déblais (m)	0.0025	0.0076	0.015
Rhéologie de la boue (YP=PV)	0.007	0.01	0.015

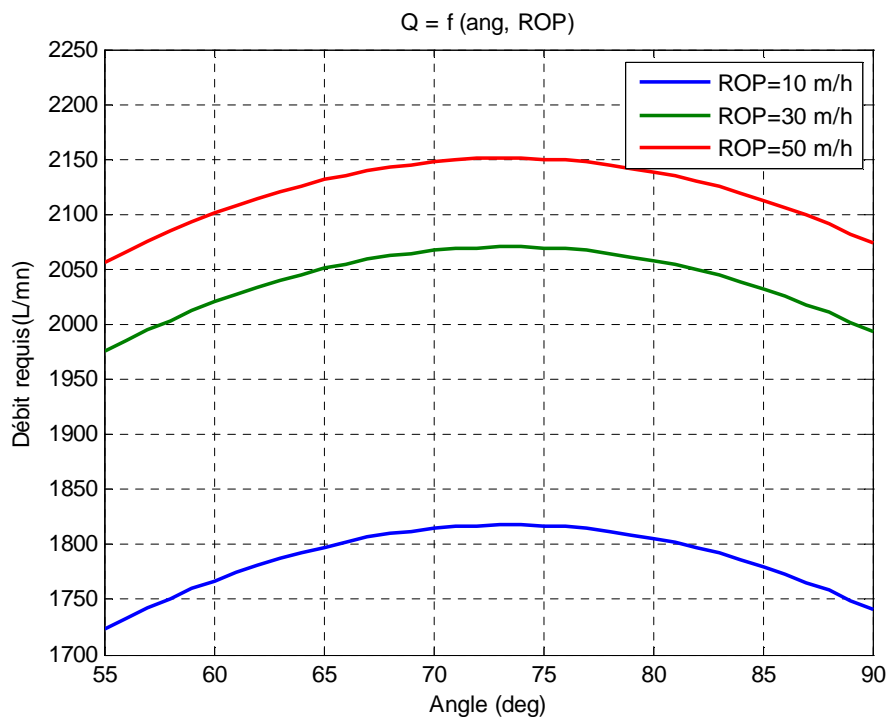
Tableau-IV-4 : les données réelles utilisées pour le calcul du débit

**IV-2-2- Calcul du débit requis en utilisant le modèle de Larsen**

Les graphes représentés dans ce chapitre sont tracés par une programmation effectuée à l'aide de logiciel MATLAB.

**IV-2-2-1-Effet de ROP**

La figure (IV-13) représente la variation du débit requis en fonction de l'angle d'inclinaison pour des valeurs différentes de ROP.



**Fig. (IV-13) :** Le débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différents ROP

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

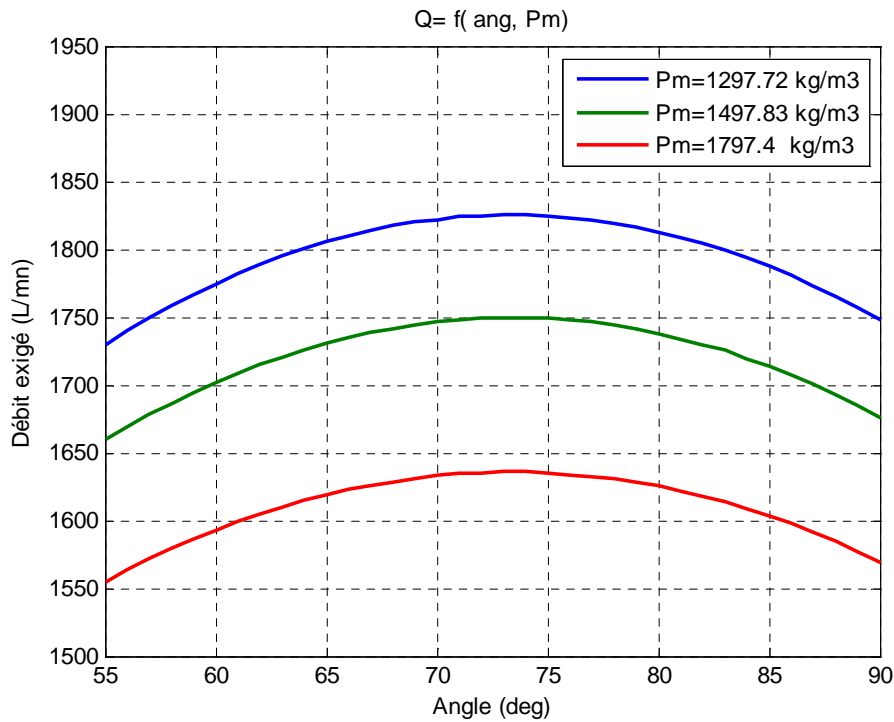
ROP (m/h) \ Débit d'écoulement (l/min)	Débit d'écoulement à 55°	Débit d'écoulement à 75°	Débit d'écoulement à 90°
ROP : 10 m/h	1728	1824	1746
ROP : 30 m/h	1980	2076	1998
ROP : 50 m/h	2064	2154	2076

**Tableau-IV-5** : Les résultats obtenus pour les différents ROP

Du tableau (IV-5) ci-dessus ; on remarque que les ROP élevés (50 m/h) exigent des débits d'écoulement élevés qui dépassent les débits typiques vus dans la pratique. Aussi les débits requis obtenus pour 75° d'inclinaison sont supérieurs à ceux dans la gamme typique de 1500-2000 l/min.

**IV-2-2-2-Effet de la masse volumique**

La figure suivante représente la variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois différentes valeurs de la masse volumique de la boue.



**Fig. (IV-14)** : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour des valeurs différentes de la masse volumique de boue

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour les trois angles d'inclinaison choisis:

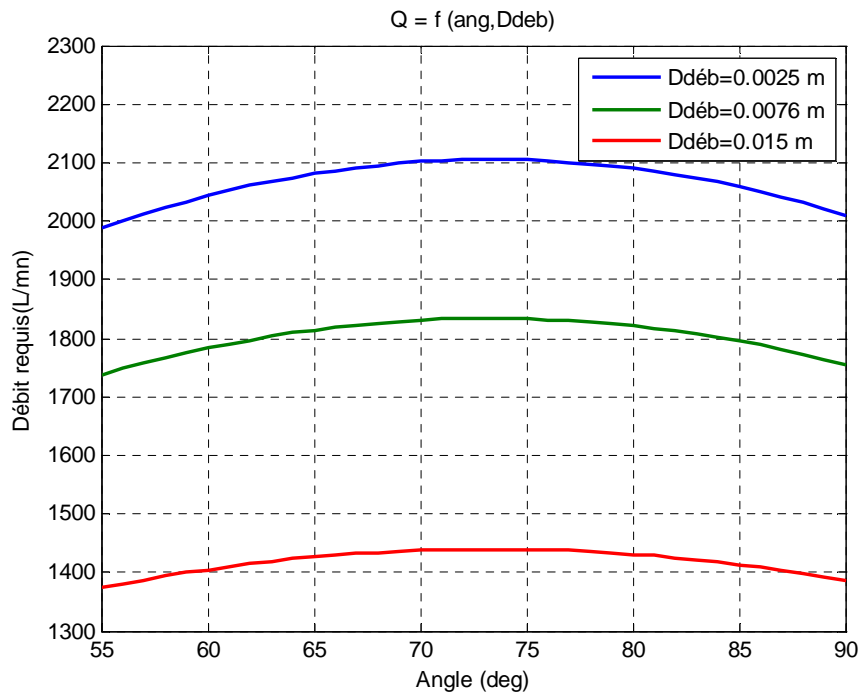
Débit d'écoulement (l/min) $\rho_{\text{boue}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Débit d'écoulement à 55°	Débit d'écoulement à 75°	Débit d'écoulement à 90°
$\rho_{\text{boue}} : 1297.7 \text{ kg/m}^3$	1734	1830	1752
$\rho_{\text{boue}} : 1498.7 \text{ kg/m}^3$	1668	1752	1680
$\rho_{\text{boue}} : 1797.4 \text{ kg/m}^3$	1560	1644	1578

**Tableau-IV-6 :** Les résultats obtenus pour les différentes masses volumiques

Le tableau (IV-6) montre qu'une masse volumique élevée est plus favorable pour le transport des déblais, puisqu'elle n'exige pas un débit d'écoulement important, on remarque aussi qu'une inclinaison de 75° exige un débit d'écoulement plus élevé pour transporter les déblais. Les trois valeurs de la masse volumique donnent des débits inclus dans l'intervalle des valeurs typiques de débit (1500 - 2000 l/min).

**IV-2-2-3-Effet de la taille des déblais**

La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois différentes tailles des déblais qui sont 0.0025, 0.0076, 0.015m.



**Fig. (IV-15) :** La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais

La figure (IV-15) représente le débit d'écoulement requis en fonction de l'angle d'inclinaison et le diamètre des déblais.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus avec la variation de la taille des déblais :

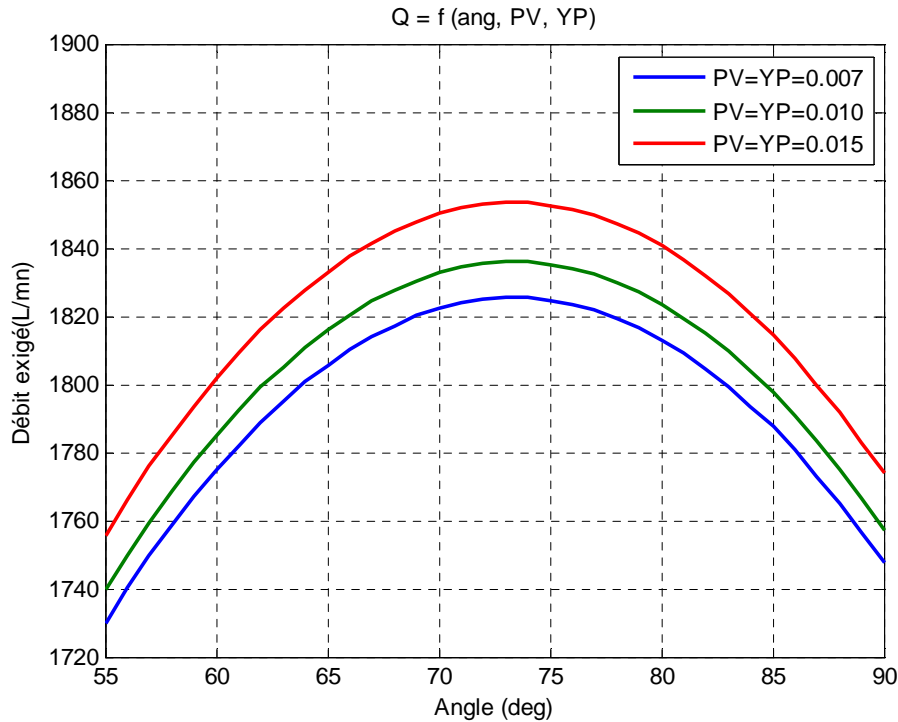
Débit d'écoulement (l/min) Diamètre (m)	Débit d'écoulement à 55°	Débit d'écoulement à 75°	Débit d'écoulement à 90°
D <sub>déblais</sub> : 0.015 m	1356	1422	1368
D <sub>déblais</sub> : 0.0076 m	1716	1806	1734
D <sub>déblais</sub> : 0.0025 m	1962	2076	1980

**Tableau-IV-7** : Les résultats obtenus pour les différentes tailles des déblais

Le Tableau (IV-7) montre qu'il est difficile de transporter les petits déblais puisqu'ils exigent un débit plus élevé que les grands déblais. À 75° d'inclinaison, le débit requis est plus élevée. On remarque aussi que le débit exigé pour le transport des particules d'un grand diamètre est dans la marge du débit typique de 1500-2000 l/min; mais pour le transport des petits déblais, le débit exigé est supérieur au débit de cette gamme.

**IV-2-2-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue**

La représentation de la variation du débit d'écoulement requis en fonction de l'angle d'inclinaison pour trois valeurs différentes des paramètres rhéologiques de la boue à savoir 0.007, 0.010 et 0.015 Pa.s (Pa) est donnée par la figure (IV-16) suivante.



**Fig. (IV-16):** La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour des différents paramètres rhéologiques de la boue

La figure (IV-16) représente le débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison et la rhéologie de la boue.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour ces paramètres :

Débit d'écoulement (l/min) PV (Pa.s) et YP(Pa)	à	à	à
	55°	75°	90°
PV=YP=0.007	1740	1836	1758
PV=YP=0.010	1746	1842	1764
PV=YP=0.015	1764	1860	1782

**Tableau-IV-8 :** Les résultats obtenus pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue

Le tableau (IV-8) montre que les paramètres rhéologiques de la boue affectent le transport des déblais considérablement. Pour toutes les valeurs de la viscosité de la boue, les valeurs de débit requis sont dans la marge du débit typique de 1500-2000 l/min. On remarque aussi que le débit exigé pour le transport des déblais dans l'inclinaison 75° est

plus élevé en comparaison aux autres inclinaisons. Ceci montre que les faibles paramètres rhéologiques de la boue sont efficaces pour le transport de déblais.

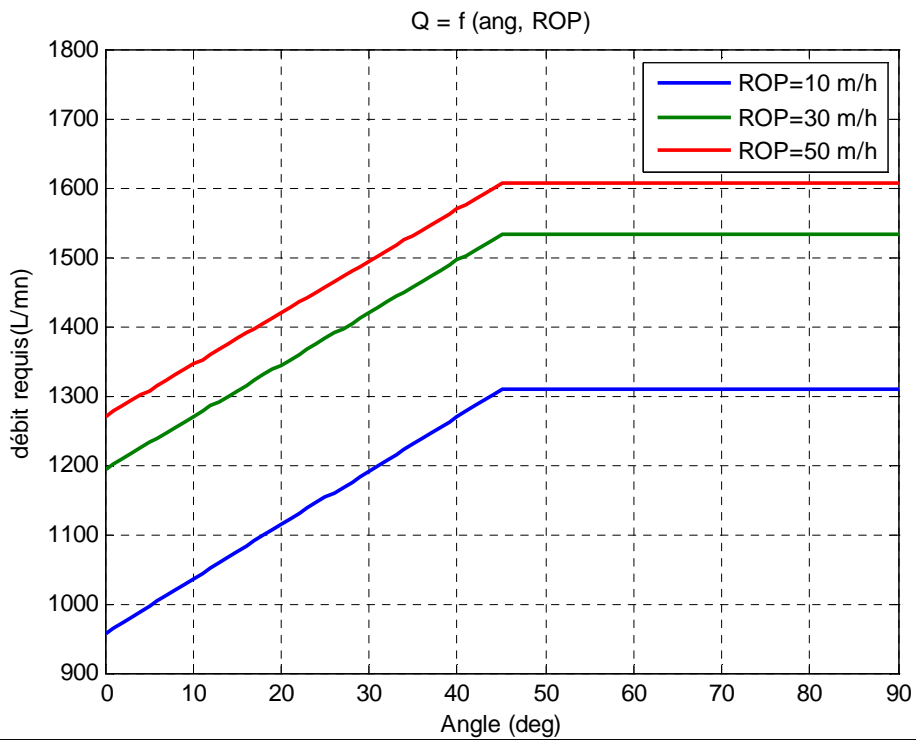
**IV-2-3-Calcul du débit requis en utilisant le modèle de Rubiandini**

Comme il s’est décrit précédemment, ces calculs sont effectués en utilisant les mêmes paramètres du forage qui sont employés avec le modèle de Larsen pour un débit requis dans un puits réel. Les graphes qui représentent les résultats de calculs sont tracés à l’aide d’un programme informatique MatLab.

Pour réaliser ces calculs, on prend dans chaque calcul l’un des paramètres utilisés comme variable et on considère les autres comme étant des constantes. Les résultats obtenus sont donnés dans ce qui suit.

**IV-2-3-1-Effet de ROP**

La figure (IV-17) représente la variation du débit exigé en fonction de ROP et l’angle d’inclinaison en employant le modèle de Rubiandini.



**Fig. (IV-17) :** La variation du débit d’écoulement en fonction de l’angle d’inclinaison pour des différentes valeurs de ROP

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Débit d'écoulement	Débit d'écoulement (l/min)	Débit d'écoulement (l/min)
L'angle d'inclinaison	0° (puits vertical)	45° à 90° (puits horizontal)
ROP : 10 m/h	996	1308
ROP : 30 m/h	1200	1530
ROP : 50 m/h	1278	1608

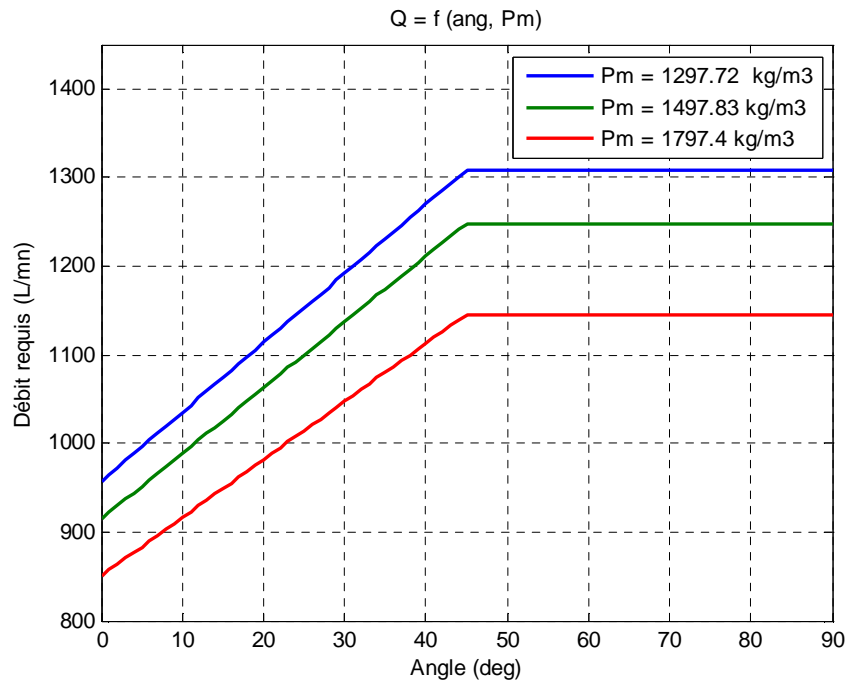
**Tableau-IV-9-** Les résultats obtenus pour les différentes valeurs de ROP

Le Tableau (IV-9) montre qu'un puits horizontal exige un débit de la boue plus élevé pour le transport de déblais en comparaison au puits vertical, et ce débit exigé augmente avec l'augmentation de ROP, cela est dû à l'augmentation de la concentration des déblais en formant des lits stables sur la paroi inférieure du puits.

On remarque de tableau que le débit exigé dans le cas d'un puits vertical est petit en le comparant au débit typique de la pratique; par contre dans le puits horizontal, ce débit est dans la gamme de débit typique.

**IV-2-3-2-Effet de la masse volumique:**

La figure (IV-18) représente la variation du débit d'écoulement exigé en fonction de l'angle d'inclinaison pour des masses volumiques de la boue différentes.



**Fig. (IV-18) :** La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les valeurs de la masse volumique de la boue

Le tableau suivant résume les résultats obtenus cités au dessus:

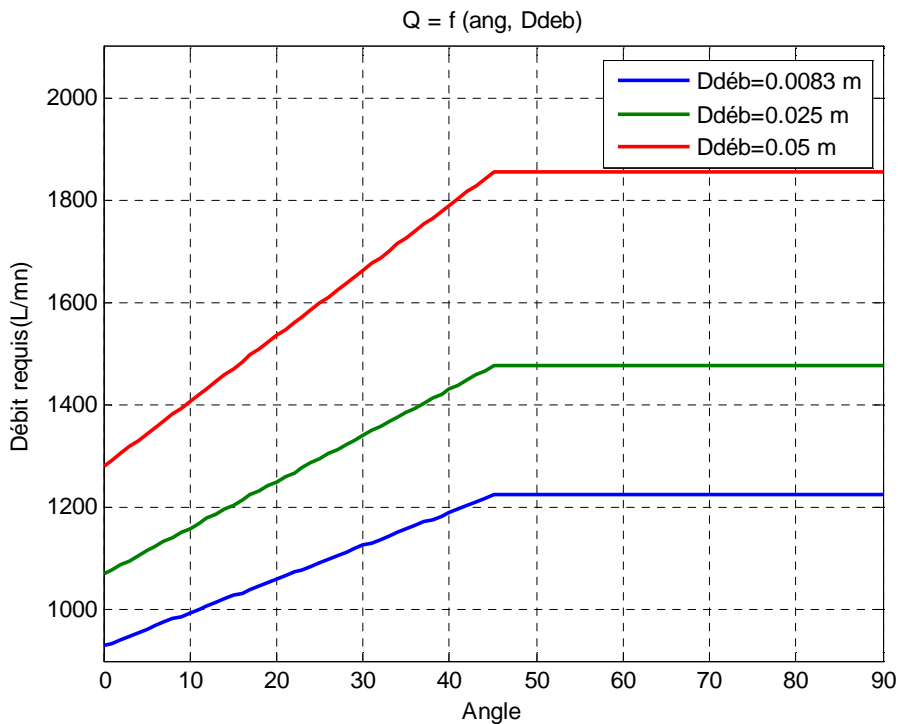
Débit d'écoulement	Débit d'écoulement (l/min)	Débit d'écoulement (l/min)
L'angle d'inclinaison	0° (puits vertical)	45° à 90° (puits horizontal)
Masse volumique: 1297.7kg/m <sup>3</sup>	996	1308
Masse volumique: 1497.8kg/m <sup>3</sup>	924	1248
Masse volumique: 1797.4kg/m <sup>3</sup>	858	1146

**Tableau-IV-10** : Les résultats obtenus pour les différentes valeurs de la masse volumique de la boue

Le Tableau (IV-10) montre que l'augmentation de la masse volumique de la boue améliore le transport des déblais. On remarque que le débit exigé pour assurer le transport des déblais dans la section verticale est faible par rapport au débit typique utilisé en forant une section de «0.216 m ». Pour le cas horizontal, le débit exigé n'est pas vraiment éloigné de la petite valeur de débit typique.

**IV-2-3-3-Effet de la taille des déblais**

La figure ci-dessous représente le débit d'écoulement nécessaire pour le transport des déblais en fonction de l'angle d'inclinaison pour les valeurs données des diamètres des déblais.



**Fig. (IV-19)** : La variation du débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes tailles des déblais

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

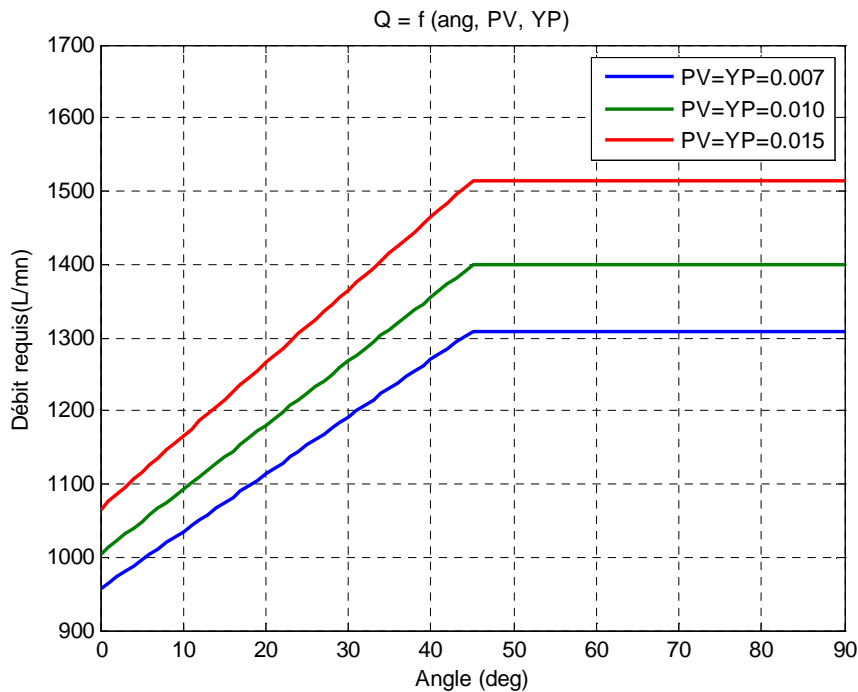
Débit d'écoulement	Débit d'écoulement (l/min)	Débit d'écoulement (l/min)
L'angle d'inclinaison	0° (puits vertical)	45° à 90° (puits horizontal)
Diamètre : 0.0025 m	996	1308
Diamètre : 0.0076 m	1098	1554
Diamètre : 0.015 m	1122	1596

**Tableau-IV-11-** Les résultats obtenus pour les trois valeurs des tailles des déblais

Le tableau (IV-11) montre que le débit exigé augmente avec l'augmentation de la taille des déblais dans tous les cas d'inclinaison, c'est contradictoire aux résultats obtenus en utilisant le modèle de Larsen. On remarque aussi de ce tableau que le débit d'écoulement exigé est dans la gamme de débit typique pour le cas horizontal car les grosses particules sédimentent les premiers et donc sont difficile à enlever ; mais pour le cas d'un puits vertical, le débit d'écoulement est inférieur.

**IV-2-3-4-Effet des paramètres rhéologiques de la boue**

La figure (IV-20) représente le débit d'écoulement déterminé par le modèle de Rubiandini en fonction de l'angle d'inclinaison pour les valeurs des paramètres rhéologiques de la boue.



Les résultats

**Fig. (IV-20) :** Le débit d'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison pour les différentes valeurs des paramètres rhéologiques de la boue

Débit d'écoulement	Débit d'écoulement (l/min)	Débit d'écoulement (l/min)
L'angle d'inclinaison	0° (puits vertical)	45° à 90° (puits horizontal)
PV=YP = 0.007	996	1308
PV=YP= 0.010	1014	1398
PV=YP= 0.015	1074	1512

**Tableau-IV-12-** Les résultats obtenus pour les trois valeurs des paramètres rhéologiques de la boue

Ce tableau montre que des paramètres rhéologiques de boue élevés mènent à une augmentation du débit requis pour le transport des déblais. Ainsi ce modèle et le modèle de Larsen démontrent cette disposition. On remarque que les débits dans la section verticale du puits ne sont pas à l'intérieur de la gamme des valeurs typiques de débit (1500 - 2000 l/min). Par contre, on remarque que pour le cas des puits horizontaux, les débits sont assez proches des débits pratiques.

### IV-3- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons calculé la vitesse d'écoulement du fluide exigée pour l'évacuation des déblais vers la surface du puits ; cette vitesse est calculée pour chaque modèle par l'utilisation des données expérimentales de Larsen, puis elle est calculée pour le cas d'un puits réel afin de calculer le débit d'écoulement du fluide remonté et le comparé au débit typique vu dans la pratique.

**V-1-Introduction**

Dans la première partie de ce chapitre, les résultats obtenus par le modèle de Larsen sont comparés à ceux obtenus par le modèle de Rubiandini en employant les données expérimentales de Larsen. Les deux auteurs ont pris dans leurs expériences les mêmes paramètres comme variables; puis dans la deuxième partie, nous les avons comparés l'un à l'autre en employant des données réelles afin de déterminer les avantages et les inconvénients de chacun de ces deux modèles.

**V-2- Comparaison des deux modèles****V-2-1-Comparaison des deux modèles dans le cas des données expérimentales**

Nous avons les modèles de Larsen et de Rubiandini en nous basant sur les données expérimentales de Larsen afin d'établir les différences entre ces deux modèles et déterminer l'influence des divers paramètres de forage sur le transport des déblais. D'après les résultats obtenus on peut relever les points communs suivants :

- **L'influence de la masse volumique de la boue :** les deux modèles ont montré la même tendance, c'est-à-dire la vitesse d'écoulement diminue avec l'augmentation de la masse volumique de boue. Ceci signifie qu'une masse volumique élevée améliore le transport de déblais.
- **L'influence de ROP :** les deux modèles ont abouti à des mêmes résultats, à savoir les valeurs élevées de ROP exigent des vitesses d'écoulement élevées.
- **L'influence des paramètres rhéologiques de la boue:** les deux modèles ont donné les mêmes résultats : la vitesse d'écoulement doit être plus grande pour des paramètres rhéologiques élevés.
- **L'influence du diamètre de tube de forage:** des résultats semblables sont notés par les deux modèles. En effet, la vitesse d'écoulement exigée augmente en utilisant des tubes de forage de plus grands diamètres.

Les points de divergence des deux modèles sont :

- **L'influence de la taille des déblais :** dans le domaine des tailles inverties dans les travaux de Larsen [0.25 cm- 2.5 cm], le modèle de Rubiandini donne de très faible variation de la vitesse minimale, tandis que le modèle de Larsen indique que cette vitesse augmente quand la taille des déblais diminue.

- **L'influence de la vitesse de rotation de la tige du forage RPM:** Larsen n'a pas pris en considération l'effet de ce paramètre, tandis que le modèle de Rubiandini montre que la vitesse du fluide diminue avec l'augmentation de RPM.

### V-2-2- Comparaison des deux modèles dans le cas d'un puits réel

La simulation de ces deux modèles a été effectuée en se basant sur des données utilisées dans la pratique. Les débits de fluide obtenus pour chacun des modèles sont comparés aux valeurs typiques de débit exigé (1500-2000 l/min) pour une section de diamètre 0.216 m, nous obtenons les résultats suivants :

- **Pour la masse volumique de la boue:** les débits calculés par le modèle de Larsen correspondent au débit typique, alors que les débits obtenus par le modèle de Rubiandini sont inférieurs aux débits pratiques.
- **L'influence de ROP:** Dans le modèle de Larsen, les débits obtenus pour de faibles valeurs de ROP sont à l'intérieur de la gamme typique ; tandis que pour des valeurs élevées de ROP, on obtient des débits supérieurs aux débits typiques.  
Pour le modèle de Rubiandini, les débits obtenus pour le puits incliné (45°-90°) sont pratiquement dans la gamme typique des débits. Les débits dans le puits vertical sont inférieurs aux débits typiques.
- **L'influence de la taille des déblais:** Le modèle de Larsen donnent des débits typiques pour les petites particules par contre le modèle de Rubiandini les donne pour le transport des grandes particules dans les puits inclinés. Dans les puits verticaux, le débit d'écoulement calculé par le modèle de Rubiandini est inférieur au débit pratique.
- **L'influence des paramètres rhéologiques de la boue:** Les deux modèles ont abouti aux même résultats, les deux modèles conduisent à des débits typiques quelque soit la valeur de ces paramètres dans le cas des puits inclinés ; les débits obtenus sont inférieurs aux débits typiques dans le cas des puits verticaux.

En nous basant sur l'analyse et les observations notées ci-dessus, nous pouvons dire que:

Le modèle de Rubiandini donne un débit inférieur au débit qui correspond à la gamme typique pour les puits verticaux. Tandis que les valeurs de débit obtenues pour les puits horizontaux sont pratiquement toutes à l'intérieur de la gamme typique.

Le modèle de Larsen donne des débits d'écoulement qui sont pratiquement tous dans la gamme typique. Sauf dans le cas des taux de pénétration élevés et pour une inclinaison de 75°, les valeurs du débit calculé sont supérieures aux valeurs typiques.

**V-3-Avantages et inconvénients des modèles de Larsen et de Rubiandini****V-3-1-Modèle de Larsen**

L'avantage du modèle de Larsen est sa capacité à prévoir la vitesse d'écoulement de la boue, exigée pour le transport des déblais à différents angles d'inclinaison. En particulier, cette méthode est avantageuse puisqu'elle rend compte de la variation de la vitesse d'écoulement dans l'intervalle d'inclinaison des puits de 65° à 75°.

Néanmoins, le modèle de Larsen n'est pas applicable dans le cas des puits verticaux, puisque ce modèle est conçu pour les puits inclinés de 55° à 90°. Un autre inconvénient de ce modèle est ce modèle ne tient pas compte de la vitesse de rotation de la tige du forage RPM bien que ce paramètre est important puisqu'il affecte la vitesse d'écoulement exigée et améliore le nettoyage du puits. En outre, Larsen n'a pas pris en considération le diamètre de la tige de forage dans ses expériences.

Dans ce mémoire, l'effet du diamètre du tube de forage sur la vitesse d'écoulement est estimé par le modèle de Rubiandini. La variation du diamètre affecte le transport des déblais, à savoir un tube de forage plus grand exige une vitesse d'écoulement plus élevée et vice versa. Le diamètre du puits est introduit dans son modèle par l'équation de la vitesse des déblais ( $V_{deb}$ ) effectivement.

**V-3-2-Modèle de Rubiandini :**

L'utilisation de modèle de Rubiandini donne la possibilité de calculer la vitesse d'écoulement minimale pour le puits vertical et horizontal puisque le modèle est développé pour des inclinaisons de 0° à 90°. L'avantage principal du modèle de Rubiandini en comparaison au modèle de Larsen, est que Rubiandini, dans sa recherche a pris en considération le RPM. Comme il est montré dans la figure (IV-11), à une valeur élevée de RPM, la vitesse minimale d'écoulement diminue et donc elle améliore le transport des déblais.

Dans sa recherche, Rubiandini a modifié l'équation de la vitesse de glissement effectuée par Moore pour le puits vertical de sorte qu'il soit possible de l'employer dans les puits inclinés et horizontaux. Rubiandini a déterminé la vitesse de glissement et les facteurs de correction relatifs à la masse volumique de la boue et à l'angle d'inclinaison. Ceci a été fait par l'analyse de régression en employant les données expérimentales de Larsen et de Peden.

Les figures données dans le chapitre précédent (IV) ont montré que la vitesse d'écoulement est constante dans l'intervalle d'inclinaison de 45° à 90°. Contrairement au modèle de Larsen qui montre qu'il y a des variations dans cet intervalle d'inclinaison.

La modélisation dans ce travail a indiqué que le modèle de Rubiandini sous-estime les débits dans le cas du transport des petits déblais par rapport au modèle de Larsen. De plus, les deux modèles donnent des résultats opposés pour l'influence de la taille des déblais sur l'évolution du débit minimal exigé pour le transport. Enfin les deux modèles indiquent que lorsque le diamètre de la tige du forage augmente, le débit de la boue exigé pour le nettoyage des puits augmente.

## ***Conclusion générale***

---

### **Conclusion générale :**

Les études sur le transport des déblais et le nettoyage des puits inclinés et horizontaux ont été lancées en 1980. Les chercheurs dans le domaine du forage se sont intéressés aux différents paramètres influençant le transport des déblais tels que la rhéologie de la boue. La plupart des études ont été réalisées en se basant sur l'approche empirique. Ces dernières années, peu d'études sur le transport des déblais et le nettoyage des puits inclinés ont été effectués.

Dans ce travail, on a présenté les deux modèles empiriques développés par Larsen et Rubiandini.

Afin de comparer le modèle de Larsen et de Rubiandini, nous avons programmé les deux modèles en nous basant sur les données expérimentales de Larsen. D'après les résultats obtenus on peut conclure que la majorité des paramètres étudiés à savoir, le RPM et les paramètres de la boue, influent considérablement sur la vitesse d'écoulement exigée pour le transport des déblais. Nous avons aussi constaté un bon nettoyage dans les deux cas.

Afin de vérifier la fiabilité des deux modèles nous avons traité un cas réel. Les données correspondantes à ce cas de figure ont été injectées dans notre code de calcul. D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le modèle de Larsen exige un débit élevé pour le nettoyage des puits comparativement au modèle de Rubiandini. Nous avons également constaté que c'est le débit de Larsen qui est proche du débit typique exigé dans la pratique.

A partir des résultats obtenus dans le cas d'un puits réel, nous recommandons, pour assurer un bon nettoyage de puits et un meilleur transport des déblais, les suggestions suivantes:

- Augmenter la vitesse de rotation de la tige de forage (RPM) pour avoir un écoulement turbulent au niveau de l'annulaire. Par conséquent, l'accumulation des déblais est évitée et un bon nettoyage des puits est assuré.
- Augmenter le débit d'écoulement de la boue, en particulier dans l'intervalle des angles d'inclinaison de 55° à 90°.
- Assurer une vitesse de rotation élevée de la tige de forage et utiliser une boue de viscosité importante afin de faciliter le transport des petits déblais qui forment des couches sédimentaires épaisses dans l'intervalle d'inclinaison de 65° à 70°.

## ***Références bibliographiques***

---

### **Références bibliographiques :**

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

[2] : **Amadou. Abdoulaye**, Contribution à la surveillance d'un processus de forage pétrolier, thèse doctorat, Mars 2010.

[3]: **W.Graham, A.Trotman**, Volum2 Directional drilling, Petroleum engineering and development, London, 1987.

[4] : **KHODJA Mohamed**, les fluides de forage : étude des performances Et considérations environnementales, thèse doctorat, Février 2008.

[5]: **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 cooperation avec: International Association of Drilling Contractors.

[6]: Rheology and Hydraulics of Oil – Well Drilling Fluids, API Recommended Practice 13D, Fifth Edition, June 2006.

[7]: **S. R. Shadizadeh & M. Zoveidavianpoor** (2012): An Experimental Modeling of Cuttings Transport for an Iranian Directional and Horizontal Well Drilling, Petroleum Science and Technology, 30:8, 786-799.

[8]: **Mehmet Sorgun**, Modeling of Newtonian Fluids and Cuttings Transport Analysis in High Inclination Wellbores with Pipe Rotation, thèse doctorat, August 2010.

[9]: **Roozbeh Ranjbar**, cutting transport in inclined and horizontal wellbore, spring semester 2010.

[10]: **Girmaa Jiimaa**, Cutting transport models and parametric studies in vertical and deviated wells, 2013.

[11]: **Rudi Rubiandini R. S.**, SPE -1172519, Bandung Institute of Technology, Indonesia, Equation for Estimating Mud Minimum Rate for Cuttings Transport in an Inclined-Until-Horizontal Well.

[12]: **Md. Wazed Ali**, a Parametric Study of Cutting Transport in Vertical and Horizontal Well Using Computational Fluid Dynamics (CFD), Morgantown, West Virginia 2002.

## ***Références bibliographiques***

---

[13]: **Prof. Dr. - Rudi Rubiandini R.S**, Pengaruh Temperatur Dan Tekanan Terhadap Desain Parameter Hidrolika Pada Managed Pressure Drilling Jenis Constant Bottom Hole Pressure,2011.