

**Université KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté** des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la  
Terre et de l'Univers

**Département** : Forage et Mécanique des chantiers pétroliers



**Mémoire**

**MASTER PROFESSIONNEL**

**Domaine** : Sciences et techniques

**Filière** : Hydrocarbures

**Spécialité** : Forage

Présenté par :

**GOUASMIA MOUSTAFA**

**FERAHTIA SOUFYANE**

**BOUKHORS RABEH**

**Thème**

**Analyse du Transport des Déblais et le  
Nettoyage du Trou dans les Puits de Forage  
Inclinés et Horizontaux**

Soutenu publiquement le : 08/06/2023

Devant le jury:

Mme. BOUHADA MEBARKA	MCA	President	UKMO
M. HADJAB RIAD	MCA	Examineur	UKMO
M. ATLILI MED ELHADI		Examineur	UKMO
M. REZAIGUIA ISSAM	MCB	Encadreur	UKMO

**Année Universitaire: 2022/2023**



# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu ALLAH le tout puissant, pour nous avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour réaliser notre travail.

Nous adressons toute notre gratitude à notre Encadreur : Monsieur le Professeur ISSAM REZAIGUIA pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Nous tenons aussi à remercier tous les enseignants de la Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et de l'Univers, qui ont contribué de près ou de loin à notre formation durant tout le cursus universitaire.

Sans oublier mon oncle BRAHIM BOUGUERRA, ingénieur de production à Sonatrach, qui m'a soutenu sur le plan pratique et sur le terrain tout au long de mon parcours universitaire.

Nos plus chaleureux remerciements vont à tous nos amis et tous ceux qui nous ont soutenu pour atteindre notre but

# Dédicaces

*Je dédie ce travail*

*A ma très chère mère, qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

*A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, et son sacrifice.*

*et tous les membres de la famille GOUASMIA et MEDJNEH  
Surtout mon oncle FOUAD (YAMAMA)*

*A mon grand-père Abd-el-Rahman et Abdullaah et ma grand-mère  
Zidana ET Akila*

*A tous mes amis, mes collègues*

*Et en particulier les camarades de PROMO FORAGE 2018*

**MOSTAJA**

*Je dédie ces notes*

*À mes parents pour leur précieux amour, leur confiance, leur soutien et leur sacrifice.*

*A mes frères et à tous les membres de la famille FRAHTIA et à tous mes amis, en particulier GM et SF pour leur soutien continu*

**SOFIANE**

*Je dédie ces notes*

*À mes parents pour leur précieux amour, leur confiance, leur soutien et leur sacrifice.*

*À mes frères et à tous les membres de la famille BOUKHERS et ZORIG à Tous mes amis surtout Cherif et abderrahim*

*et camarades d'études ( EL - MARYIL)*

**RABEH**

## Table Des Matières

Remerciements .....	
Dédicaces.....	
Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux.....	
Notations.....	
Liste des Abréviations .....	
Résumé .....	
Introduction générale.....	

### **Chapitre I : *Problème de Nettoyage du puits et transport des cuttings***

I.1. Introduction .....	04
I.2. Conséquences d'un mauvais nettoyage des trous .....	05
I.3. Mécanisme de nettoyage des trous.....	06
I.4. Schéma d'écoulement .....	06
I.5. Identification des zones d'accumulation des cuttings .....	07
I.5.1 Puits verticaux et presque verticaux (0 – 35).....	07
I.5.2 Angles intermédiaires (35 – 65) .....	08
I.5.3 Angles élevés (supérieurs à 65°) .....	08
I.6. Les facteurs affectant le nettoyage des trous.....	09
I.7. Indicateurs de performance de nettoyage des trous .....	09
I.7.1 Rapport de transport .....	10
I.7.2 Fraction volumique des cuttings annulaires (FVC).....	11

### **Chapitre II : *Paramètres affectant le nettoyage***

II.1. Introduction.....	13
II.2. Effet des paramètres géométrique sur le transport des déblais .....	13
II.2.1. Excentricité de la tige de forage .....	13
II.2.2. Rotation du train de tiges.....	14
II.2.3. Taux de pénétration (vitesse d'avancement) .....	14
II.3. Effet des paramètres fluides sur le transport des cuttings.....	15

II.3.1. Poids de la boue .....	15
II.3.2. Type de boue .....	15
II.3.3. Rhéologie de la boue .....	16
II.3.4. Débit .....	16
II.4. Effet des paramètres de cuttings .....	16
II.5. Physique du transport des déblais .....	17
II.5.1. Forces agissant sur les particules de cuttings .....	17
II.5.2. Coefficient de traînée, nombre de Reynold et état de surface des déblais .....	20
II.5.3. Vitesse de sédimentation des déblais / Vitesse limite .....	22

### **Chapitre III : Simulation Numérique Par Ansys-Fluent**

III.1 Aperçu des processus CFD .....	25
III.2 Géométrie .....	26
III.3 Maillage .....	26
III.4 Paramètres de simulation .....	27
III.5 Validation du modèle CFD .....	29

### **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1 Effet de densité des cuttings .....	32
IV.2 Effet de la taille des cuttings .....	35
IV.3 Effet du poids de la boue .....	37
IV.4 Effet de rotation des tiges de forage .....	40
IV.5 Effet d'excentricité des tiges de forage .....	42
IV.6 Effet de la vitesse de forage .....	44
IV.7 Effet du débit de circulation .....	46

Conclusion .....

Références Bibliographiques .....

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Evolution des cuttings rocheux lors des opérations de forage. ....	04
<b>Figure I.2</b> : Schémas d'écoulement des cuttings.....	06
<b>Figure I.3</b> : Divers mécanismes de transport des cuttings et problèmes rencontrés à différentes inclinaisons du puits de forage .....	07
<b>Figure I.4</b> : Bon nettoyage de trou .....	10
<b>Figure II.1</b> : Géométries annulaires concentriques et excentriques. ....	13
<b>Figure II.2</b> : Influence de l'inclinaison et de la ROP sur VAM .....	15
<b>Figure II.3</b> : Forces agissant sur les particules solides dans le fluide de forage.....	17
<b>Figure II.4</b> : Forces agissant sur les particules solides dans le fluide de forage.....	18
<b>Figure II.5</b> : Relations entre $C_D$ et $N_{Re}$ .....	21
<b>Figure II.6</b> : Force de traînée sur un solide en suspension dans du fluide .....	22
<b>Figure III.1</b> : Etape de simulation .....	25
<b>Figure III.2</b> : Géométrie annulaire du train de tiges créée pour le mode concentrique.....	26
<b>Figure III.3</b> : Vue transversale de la grille de calcul créée .....	27
<b>Figure III.4</b> : Vue longitudinale de la grille de calcul créée .....	27
<b>Figure IV.1</b> : Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (densité des cuttings).....	33
<b>Figure IV.2</b> : Fraction volumique des cuttings au milieu de l'anneau (densité des cuttings).....	33
<b>Figure IV.3</b> : Rapport de transport des cuttings (densité des cuttings) .....	34
<b>Figure IV.4</b> : Rapport de débit massique des cuttings (densité des cuttings).....	35
<b>Figure IV.5</b> : Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (taille des cuttings) .....	35
<b>Figure IV.6</b> : Rapport de transport des cuttings (taille des cuttings).....	36
<b>Figure IV.7</b> : Rapport de débit massique des cuttings (taille des cuttings) .....	37
<b>Figure IV.8</b> : Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (boue de forage) .....	38
<b>Figure IV.9</b> : Fraction volumique des cuttings au milieu de l'espace annulaire (boue de forage) .	38
<b>Figure IV.10</b> : Taux de transport des cuttings (boue de forage).....	39
<b>Figure IV.11</b> : Rapport de débit massique des cuttings (boue de forage) .....	40
<b>Figure IV.12</b> : Rapport de transport des cuttings (rotation de la tige de forage).....	41

**Figure IV.13** : Rapport de débit massique des cuttings (rotation de la tige de forage)..... 41

**Figure IV.14** : Rapport de transport des cuttings (excentricité de la tige de forage) ..... 43

**Figure IV.15** : Rapport de débit massique des cuttings (excentricité de la tige de forage)..... 43

**Figure IV.16** : Rapport de transport des cuttings (le débit de forage)..... 44

**Figure IV.17** : Rapport de débit massique des cuttings (le débit de forage) ..... 45

**Figure IV.18** : Taux de transport des cuttings (le débit de circulation)..... 46

**Figure IV.19** : Rapport de débit massique des cuttings (le débit de circulation) ..... 47

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Nomenclature de la figure I.1.....	05
<b>Tableau I.2</b> : Paramètres de forage influençant le transport des cuttings.....	09
<b>Tableau II.1</b> : Équations auxiliaires des forces d'équilibre .....	18
<b>Tableau II.2</b> : Cas de mécanismes de transport de cuttings dans les puits inclinés .....	19
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres de simulation "Setup".. ..	28
<b>Tableau III.2</b> : Paramètres de simulation "Solution".....	29
<b>Tableau III.3</b> : Paramètres de validation.....	29
<b>Tableau III.4</b> : Comparaison de la concentration moyenne des cuttings .....	30
<b>Tableau IV.1</b> : Paramètres étudiés .....	32

## Notations

- $V_a$  : Vitesse annulaire de la boue  
 $Q$  : Débit de la boue  
 $A$  : la section transversale annulaire  
 $V_s$  : Vitesse de glissement de cuttings  
 $V_t$  : Vitesse de transport (la vitesse nette ascendante)  
 $R_t$  : Rapport de transport  
 $\varepsilon$  : Excentricité de la tige de forage  
 $F_D$  : Force de traînée  
 $F_L$  : Force de portance  
 $F_B$  : Force de flottabilité  
 $F_g$  : Force de gravité  
 $F_{\Delta p}$  : Force différentielle de Presseure  
 $F_p$  : Force plastique  
 $\tau_w$  : Contrainte de cisaillement  
 $\tau_Y$  : Yield point du fluide  
 $F_{fr}$  : Frottement  
 $N$  : Coefficient de Frottement  
 $N_{Re}$  : Nombre de Reynold  
 $C_D$  : Coefficient de traînée  
 $d_{eq}$  : Diamètre équivalent  
 $\mu_f$  : Viscosité  
 $\rho_p$  : Densité des particules  
 $\rho_f$  : Densité du fluide  
 $v_s$  : Vitesse de sédimentation des cuttings  
 $\psi$  : Sphéricité d'une particule  
 $A'_s$  : Surface d'une sphère  
 $A_s$  : Surface de la cuttings  
 $C_{D_t}$  : Coefficient de traînée en régime turbulent  
 $g$  : Gravity  
 $c_s$  : Concentration de cuttings  
 $\rho_p$  : Porosité du lisier

## Liste des Abréviations

**FVC** : Fraction volumique des cuttings annulaires

**ROP** : Taux de pénétration (vitesse d'avancement)

**RPM** : Rotation du train de tiges

**VAM** : Vitesse annulaire minimale

**YP** : Yield point

**PV** : Viscosité plastique

**ECD** : Equivalent circulating density

## ملخص

يعتمد نجاح عملية الحفر على كفاءة عملية تنظيف البئر , ويشير ذلك إلى قدرة طين الحفر الدوراني على نقل الركام خارج البئر أثناء هذه العملية . حيث ان التنظيف غير الكافي يؤدي إلى بعض المشاكل ذات التكلفة الكبيرة و العواقب الوخيمة.

في هذه الأطروحة، سندرس بشكل منهجي تأثير اعدادات الحفر على نقل الركام باستعمال طريقة ديناميكيات السوائل الحسابية (CFD) . وقد أظهرت نتائج الدراسة البارامترية أن تأثير تعديل المتغيرات كان ضئيلاً عندما تكون البئر في اتجاه عمودي بالنسبة لزوايا الميل العالية ، وأن القطع الصغيرة كانت سهلة النقل عبر الفراغ الحلقي . كما أظهرت زيادة وزن الطين تحسناً ملحوظاً في نقل الركام , كذلك لاحظنا ان دوران أنبوب الحفر أدى إلى تجويف بئر أنظف عندما تم تنفيذه بزوايا ميل عالية. ومنه فإن الانحراف السلبي لأنابيب الحفر يؤدي لزيادة كبيرة في حجم الركام التي يمكن أن ينتج عنها إخفاقات كارثية. هذا وتساعد زيادة معدل الحفر في تقليل وقت الحفر ولكنها تؤدي أيضاً إلى تراكم قطع عالية. كما أظهرت الدراسة ان معدل دوران طين الحفر له علاقة عكسية مع الكسر الحجمي للركام.

**الكلمات المفتاحية :** التنظيف , النقل , الركام , المحاكاة الرقمية.

## Abstract

The success of a drilling operation depends on an efficient hole cleaning operation. Hole cleaning refers to the ability of a circulating drilling mud to transport the drill cuttings out of the wellbore during a drilling operation. Inadequate hole cleaning may cause some cost extensive problems with dreadful consequences. Therefore, special care should be taken during drilling operations to avoid these complications. In this thesis, we systematically study the effect of drilling parameters on cuttings transport, through computational Fluid Dynamics (CFD) method.

The results of the parametric study showed that the effect of altering the parameters was negligible when the well is in a vertical orientation. For high angles of inclination, the parametric study showed that smaller cuttings were easy to transport through the annulus. Increasing the mud weight showed a significant improvement in the cuttings transport. Drill pipe rotation resulted with cleaner wellbore when it was implemented at high inclination angles. Negative drill pipe eccentricity results with significantly high cuttings' volume fraction which can lead to catastrophic failures. Increasing the drilling rate helps with decreasing the drilling time, but it also results with high cuttings accumulation. The circulation rate showed an inverse relationship with the cuttings volume fraction.

**Keywords:** Cleaning , Transportation , Cuttings , Numerical simulation.

## Résumé

Le succès d'une opération de forage dépend d'une opération de nettoyage de trou efficace. Le nettoyage de trou fait référence à la capacité d'une boue de forage en circulation à transporter les déblais de forage hors du puits de forage pendant une opération de forage. Un nettoyage inadéquat des trous peut causer des problèmes coûteux avec des conséquences terribles. Par conséquent, des précautions particulières doivent être prises lors des opérations de forage pour éviter ces complications. Dans cette thèse, nous étudions systématiquement l'effet des paramètres de forage sur le transport des déblais, grâce à la méthode numérique de dynamique des fluides (CFD).

Les résultats de l'étude paramétrique ont montré que l'effet de la modification des paramètres était négligeable lorsque le puits est dans une orientation verticale. Pour des angles d'inclinaison élevés, l'étude paramétrique a montré que les petites déblais étaient faciles à transporter à travers l'anneau. L'augmentation du poids de la boue a montré une amélioration significative du transport des déblais. La rotation de la tige de forage a entraîné un puits de forage plus propre lorsqu'elle a été mise en œuvre à des angles d'inclinaison élevés. L'excentricité négative de la tige de forage entraîne une fraction volumique de déblais significativement élevée, ce qui peut entraîner des défaillances catastrophiques. L'augmentation de la vitesse de forage aide à réduire le temps de forage, mais entraîne également une accumulation élevée de déblais. Le taux de circulation a montré une relation inverse avec la fraction volumique des déblais.

**Mots-clés :** Nettoyage , transport , Déblais ( cuttings ) , Simulation Numérique.

# Introduction

Le transport des cuttings est un mécanisme qui est un facteur vital pour un bon programme de forage. Dans le forage directionnel et horizontal, le nettoyage des trous est un problème commun et coûteux. L'élimination inefficace des cuttings peut entraîner plusieurs problèmes, tels que l'usure de l'outil de forage, le taux de forage lent, l'augmentation (ECD) (ce qui peut entraîner une fracturation de formation), un couple élevé, une traînée et dans le pire des cas, la tige de forage peut être coincée. Si ce type de situation n'est pas géré correctement, le problème peut dégénérer au suivi latéral ou à la perte de puits, au pire.

Le transport des cuttings est contrôlé par de nombreuses variables telles que l'angle d'inclinaison, la vitesse de rotation de tige de forage (RPM), l'excentricité de tige de forage, le taux de pénétration (ROP), les caractéristiques des cuttings comme la taille des cuttings et la porosité du lit et les caractéristiques des fluides de forage comme le débit, la vitesse du fluide, le régime d'écoulement, le type de boue et la rhéologie de la boue. Les facteurs clés pour optimiser le nettoyage des trous sont le résultat d'une bonne planification des puits, de bonnes propriétés de liquide de forage, et une bonne expérience de forage.

L'objectif de notre travail est de déterminer les paramètres affectant le nettoyage d'un puits horizontal et d'optimiser leurs valeurs, pour assurer une évacuation correcte des particules solides vers la surface.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres : Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le problème de nettoyage du puits et transport des cuttings, puis on donnera en chapitre deux un aperçu sur les différents paramètres qui affectent le nettoyage du puits. Ensuite, nous présentons la procédure classique utilisée pour la résolution des équations de Navier-Stokes combinées avec le modèle Eulérien. Nous avons rappelé les différentes étapes : génération du maillage avec le logiciel Design Modeler/ANSYS (Géométrie, maillage et conditions aux limites) ; définir le modèle de l'écoulement, les types de fluides et de solides, les conditions limites, les conditions initiales, la méthode de solution, initialiser la solution et résolution des équations ; convergence de la solution, Enfin, en dernière partie, nous présentons et discutons les résultats issus des simulations. Les résultats obtenus sont relativement en accord avec les résultats expérimentaux.

On termine l'étude par une conclusion et des recommandations pratique des paramètres à appliquer pour obtenir un bon nettoyage du puits.

# *Chapitre I*

## *Problème De Nettoyage Du Puits et Transport Des Cuttings*

## I.1. Introduction

L'un des problèmes majeurs du forage directionnel et horizontal est le transport des cuttings de forage vers la surface. La figure I.1 illustre le processus de circulation des cuttings dans le forage de puits. Pendant le processus de forage, le trépan coupe les roches en petits morceaux appelés déblais (**cuttings**) [1]. Les cuttings doivent être retirés du trépan pour permettre un forage continu et efficace, et doivent être transportés jusqu'à la surface pour éviter tout problème de tige coincé. Ceci est réalisé en faisant circuler les fluides de forage à travers le train de tiges, puis l'espace annulaire jusqu'à la surface. L'ensemble du processus s'appelle le nettoyage des trous [2], dans lequel les déchets de cuttings seront séparés et manipulés par un autre moyen pour préserver l'environnement [3].

Dans les puits déviés, les cuttings ont tendance à se déposer sur la paroi latérale basse et à former des lits de cuttings. Ces cuttings sont souvent transportés le long du côté bas du trou, soit sous forme de lit mobile continu, soit dans des lits/dunes séparés [4].

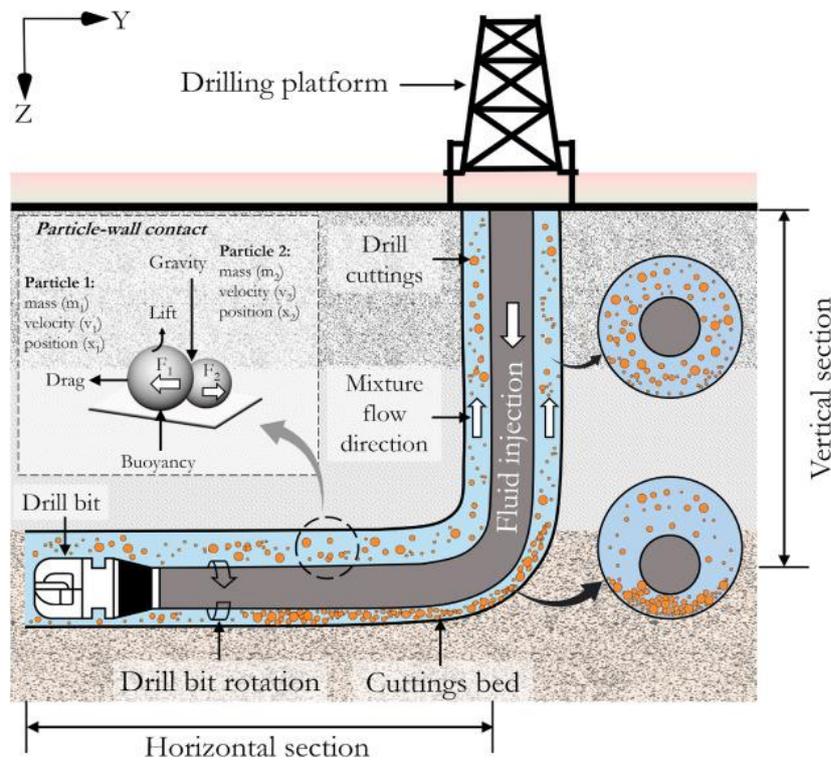


Fig. I.1. Evolution des cuttings rocheux lors des opérations de forage [1].

Table I.1. Nomenclature de la figure I.1

Nomenclature	
<b>Drilling platform</b>	Plate-forme de forage
<b>Vertical section</b>	Section verticale
<b>Mixture flow direction</b>	Sens d'écoulement du mélange
<b>Drill Cuttings</b>	Cuttings de forage
<b>Cuttings bed</b>	Lit de cuttings
<b>Drill pipe rotation</b>	Rotation de tige de forage
<b>Drill bit</b>	trépan
<b>Fluid injection</b>	Fluide injecté
<b>Mass</b>	masse
<b>Velocity</b>	Vitesse
<b>Position</b>	Position
<b>Buoyancy force</b>	Force de flottabilité
<b>Gravity force</b>	Force de gravité
<b>Lift force</b>	Force de portance
<b>Drag force</b>	Force de traînée
<b>Particle</b>	Particule
<b>Particle wall contact</b>	Contact avec la paroi des particules

## I.2. Conséquences d'un mauvais nettoyage des trous

Les cuttings générés lors du forage doivent être retirés du trou et transportés à travers l'espace annulaire jusqu'à la surface. Un trou mal nettoyé entraînera une accumulation de lits de cuttings et une réduction de la zone annulaire. Cela peut entraîner de nombreux problèmes de forage tels que [4] :

- ✓ Formation d'un lit de cuttings immobile
- ✓ Réduction du taux de pénétration
- ✓ Couple et traînée élevés et surtraction excessive
- ✓ Difficulté à faire couler le tubage
- ✓ Fracturation de la formation
- ✓ Difficultés de mouvement de la garniture et risque de coincement
- ✓ Perte de boue lors des travaux de cimentation
- ✓ Difficultés de contrôle des venues en cas d'éruption;
- ✓ Augmentation des coûts
- ✓ Instabilité du puits et pertes de circulation:
- ✓ Augmentation de l'ECD causant des problèmes d'instabilité du puits de forage.

### I.3. Mécanisme de nettoyage des trous

Il existe deux mécanismes principaux pour le nettoyage des trous. Ceux-ci sont:

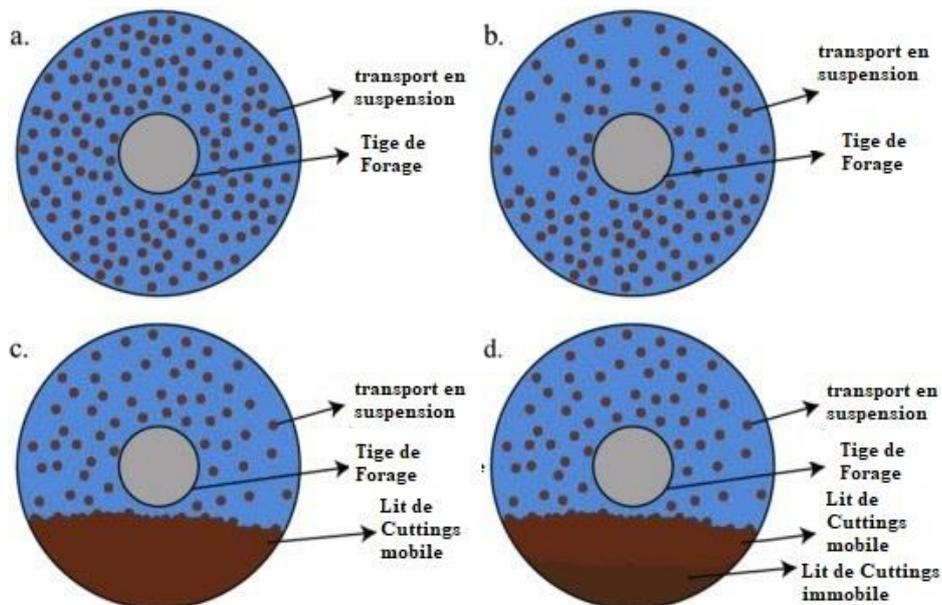
- Dispersion
- Enlèvement mécanique.

La dispersion "dissout" efficacement les cuttings dans la boue, ce qui permet de les retirer facilement du trou. En général, la dispersion ne s'applique qu'aux sections de trou de grand diamètre qui sont forées avec de la boue à base d'eau à faible coût.

Avec l'enlèvement mécanique, de nombreux paramètres différents fonctionnent ensemble pour nettoyer le trou. Cependant, de loin, les deux paramètres les plus importants sont la rotation et le débit. La rotation contrôle l'efficacité du nettoyage du trou, tandis que le débit contrôle le taux de nettoyage du trou.

### I.4. Schéma d'écoulement

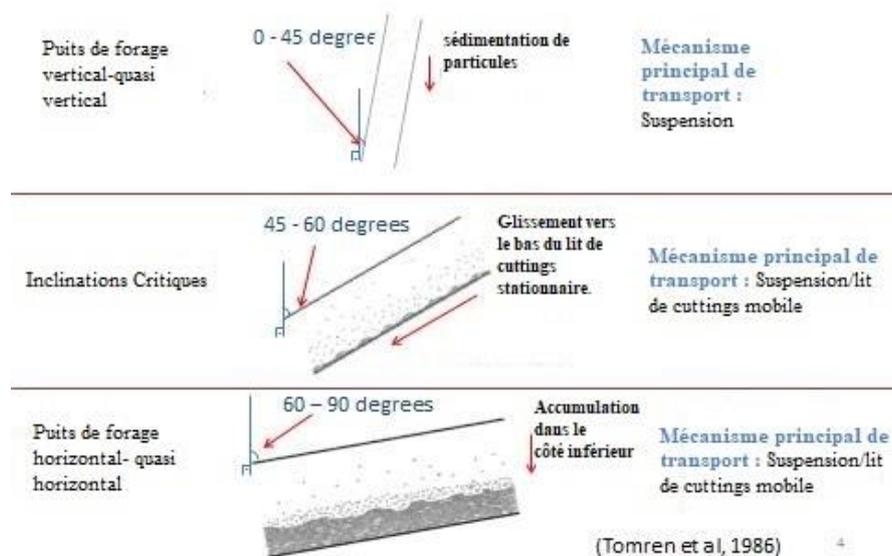
Des observations expérimentales ont montré qu'un mélange de cuttings et de boue s'écoulant dans des puits horizontaux peut présenter quatre types de schéma d'écoulement (**Figure .I.2**): complètement suspendu et symétrique (a), complètement suspendu et asymétrique (b), couche complètement suspendu avec un lit mobile (c), et couche complètement suspendue avec lits fixes et mobiles (d) [5]. Les modèles d'écoulement symétriques complètement suspendus se produisent à des vitesses extrêmement élevées.



**Fig.I.2.** Schémas d'écoulement des cuttings

### I.5. Identification des zones d'accumulation des cuttings :

Le nettoyage des trous peut être divisé en trois catégories en fonction de l'inclinaison du puits de forage. La figure I.3 ci-dessous montre le mouvement des cuttings dans les différentes régions angulaires du puits de forage. D'après la figure, il est évident que le transport des cuttings, et par extension la stratégie de nettoyage des trous, sera différent pour chaque plage d'inclinaison [4].



**Fig.I.3.** Divers mécanismes de transport des cuttings et problèmes rencontrés à différentes inclinaisons du puits de forage [7]

Basé sur les références suivantes [4], les caractéristiques de cuttings des différents angles d'inclinaison peuvent être données comme suit :

- 0 – 35deg: Les cuttings ne se forment pas.
- 35 – 45deg: Le lit de cuttings commence à se former.
- 45 – 65deg: L'avalanche commence.
- 65 – 90deg: Lits stables.

#### I.5.1 Puits verticaux et presque verticaux (0 – 35):

Les lits de cuttings ne se forment pas dans cette section de trou. En effet, la vitesse de transport est supérieure à la vitesse de glissement, ainsi les cuttings sont effectivement transportés en suspension. La vitesse du fluide annulaire agit pour surmonter la force de sédimentation des cuttings et il y a un mouvement net vers le haut des cutting. Le

nettoyage des trous est simplement assuré par la viscosité et le débit du fluide de forage. Lorsque les pompes sont arrêtées (l'arrêt de circulation), les cuttings sont suspendus par le fluide de forage visqueux, bien qu'un certain tassement se produise avec le temps. Le principal problème dans ce cas est la sédimentation des particules vers le bas due à une vitesse insuffisante du fluide vers le haut.

### **I.5.2 Angles intermédiaires (35 – 65):**

Dans cette section, il y a un lit de cuttings instable et mobile. En effet, le transport s'effectue via un mécanisme de levage. Dans cette plage d'inclinaison, les cuttings commencent à former des "dunes", car la distance pour qu'ils tombent au fond est maintenant très minime. Les cuttings remontent le trou principalement du côté bas, mais peuvent être facilement remués dans le régime d'écoulement. Le problème le plus notable de cette plage d'inclinaison est que lorsque les pompes sont arrêtées, les « dunes » commenceront à glisser (ou à avalancher) au fond du trou. Cela modifie considérablement la stratégie de nettoyage des trous par rapport au scénario de puits vertical. Généralement, la plupart des problèmes associés au nettoyage des trous dans les puits déviés surviennent dans cette section. Ceci est dû au fait; c'est la région où les effets de la gravité peuvent faire s'effondrer les lits de cuttings dans le trou.

### **I.5.3 Angles élevés (supérieurs à 65°) :**

Un lit de cuttings stationnaire se forme instantanément dans cette région. En effet, le transport se fait via un mécanisme de roulement. Cela présente un ensemble différent de circonstances opérationnelles. Ici, les cuttings tomberont sur le côté bas du trou et formeront un lit de cuttings long et continu. Tout le fluide de forage se déplacera au-dessus de la tige de forage et une agitation mécanique est nécessaire pour déplacer les cuttings, quel que soit le débit ou la viscosité de la boue.

Dans une mesure raisonnable, l'opération de nettoyage des trous peut être corrigée par une bonne combinaison de :

1. Propriétés appropriées de la boue.
2. Profil de puits optimisé.
3. Procédures de pratiques de forage standard.

## I.6. Les facteurs affectant le nettoyage des trous

Les paramètres qui affectent le nettoyage des trous plus que tout autre sont [6] :

**Table.I.2.** Paramètres de forage influençant le transport des cuttings.

Profil et géométrie de puits	<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'angle de trou (inclinaison).</li> <li>• Diamètre de trou-casing et de garniture de forage.</li> <li>• Excentricité de tige de forage.</li> </ul>
Cuttings et Caractéristiques de lit de déblais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité</li> <li>• Dimension et forme des particules</li> <li>• Réactivité avec la boue</li> <li>• Propriétés de la boue en cours de forage</li> </ul>
Caractéristiques d'écoulement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse annulaire</li> <li>• Profil annulaire de vitesse</li> <li>• Régime d'écoulement</li> </ul>
Propriétés de la boue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• densité de boue (ECD)</li> <li>• Viscosité, particulièrement à bas taux de cisaillement</li> <li>• Forces de gel</li> <li>• Inhibiteurs</li> </ul>
Paramètres de forage avant l'injection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type d'outil</li> <li>• Taux de pénétration</li> <li>• Différence de pression</li> <li>• Rotation du train</li> </ul>

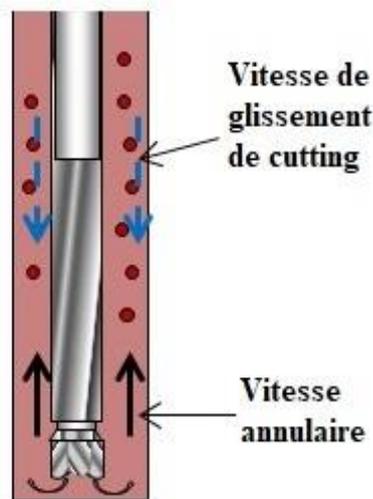
## I.7. Indicateurs de performance de nettoyage des trous.

Le transport des cuttings se produit lorsque la force immergée est vaincue par la vitesse du fluide. Afin de comprendre ce processus, une compréhension claire de la vitesse du fluide et des expressions générales des vitesses de transport est nécessaire

**Vitesse annulaire de la boue** L'un des paramètres les plus efficaces pour tous les cas influençant le transport des cuttings, c'est la Vitesse annulaire de la boue qui est déterminé directement à partir du débit de boue divisé par la section transversale annulaire:

$$V_a = Q/A \quad (I.1)$$

**Vitesse de glissement des cuttings** La vitesse de glissement des cuttings  $V_s$  est la vitesse des particules par rapport au fluide adjacent. Par exemple, alors que les particules subissent une force vers le haut en raison de la vitesse du fluide de forage, inversement la gravité les force vers le bas (tendance à la sédimentation des cuttings) [8]. Par conséquent, dans le processus de nettoyage, la vitesse d'écoulement de la boue doit être supérieure à la vitesse de glissement des cuttings, sinon le processus de nettoyage échoue.



**Fig.I.4.** Bon nettoyage : Vitesse annulaire > Vitesse de glissement de cutting [9]

**Vitesse de transport (la vitesse nette ascendante)** différence entre la vitesse annulaire moyenne et la vitesse de glissement des particules [10]

$$V_t = V_a - V_s \quad (I.2)$$

**I.7.1 Rapport de transport** Le nettoyage des trous est généralement modélisé en utilisant le rapport de transport de cuttings ( $R_t$ ), qui est une bonne mesure de la capacité de charge d'un certain fluide de forage. Ce rapport est défini comme la vitesse de transport divisée par la vitesse annulaire moyenne [10] :

$$R_t = V_t/V_a \quad (I.3)$$

Une valeur positive indique qu'une partie des cuttings sera transportée, et 100 % indique qu'il ne reste plus de cuttings dans le trou. Pour optimiser le transport forage-cuttings, le rapport de transport doit être maintenu aussi élevé que possible, bien que 100%, en pratique ne soit pas possible.

**I.7.2 Fraction volumique des cuttings annulaires (FVC)** Pour avoir une bonne idée de la qualité du nettoyage, La fraction volumique des cuttings annulaires est définie comme le rapport du volume des cuttings au volume annulaire total dans l'anneau où le volume total est composé du volume de boue et du volume des cuttings [11]. Ainsi, FVC s'exprime comme suit :

$$FVC = \frac{\text{volume occupé par les solides}}{\text{volume occupé par le mélange}} \times 100\% \quad (I.4)$$

Un faible pourcentage de cuttings annulaires implique que moins de cuttings s'accumulent dans l'espace annulaire, ce qui conduit à un transport efficace des cuttings.

# *Chapitre II*

## *Paramètres Affectant Le Nettoyage*

## II.1. Introduction

Afin de mieux comprendre le processus de nettoyage des trous, nous devons décrire les paramètres qui affectent la migration des cuttings autour du trépan vers la surface. L'influence de chaque paramètre sur l'efficacité du transport des cuttings est présentée dans cette section.

## II.2. Effet des paramètres géométrique sur le transport des cuttings

### II.2.1. Excentricité de la tige de forage

Lors de l'opération de forage de puits inclinés, la tige de forage a tendance à s'écartier du centre de l'espace annulaire en raison de son poids [3]. L'excentricité de la tige, généralement exprimée en pourcentage, est un terme qui décrit l'écart par rapport au centre d'une tige à l'intérieur d'une autre tige ou d'un trou ouvert. Une tige est considéré comme complètement excentrique (100 %) s'il repose contre le diamètre intérieur de tige ou du trou qui l'entoure et concentrique (0 % excentrique) s'il est parfaitement centré dans la tige ou le trou extérieur [10], comme illustré à la Fig. II.1

L'excentricité  $\varepsilon$  (en %) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [12]

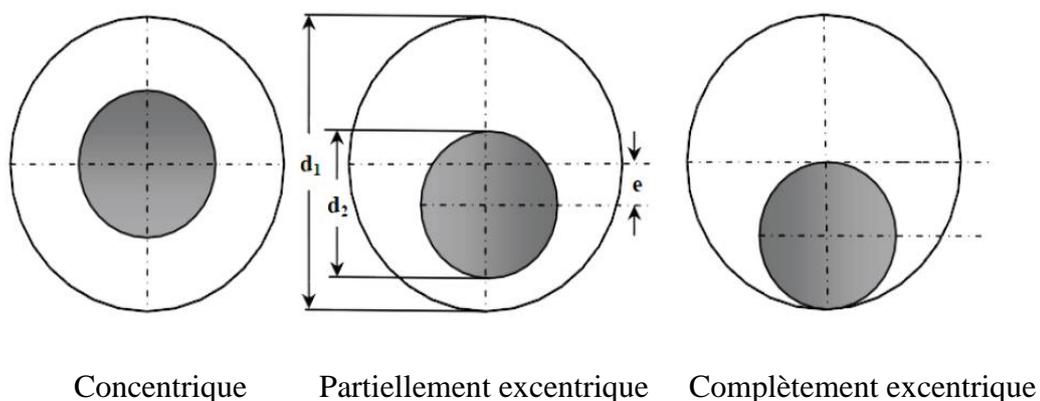
$$\varepsilon = \frac{2e}{d_1 - d_2} \quad (\text{II.1})$$

Où

$e$  : Distance entre les centres de la tige de forage et du puits de forage

$d_1$  : Rayon du puits de forage.

$d_2$  : Rayon de tige de forage.



**Figure II.1.** Géométries annulaires concentriques et excentriques [12].

Les études montrent que, si la tige de forage se trouve du côté bas du trou (100 % excentrique), l'excentricité entraîne un écoulement de fluide à faible vitesse du côté bas, En créant un lit de petits éclats de roche sur le côté bas du trou appelé lit de cuttings. Ce lit de cuttings devient difficile à nettoyer de l'espace annulaire et peut entraîner des problèmes importants pour l'opération de forage si la tige se coince dans le lit de cuttings [10].

### **II.2.2. Rotation du train de tiges**

Dans les puits de forage verticaux, la rotation de la tige de forage à grande vitesse exerce une force centrifuge sur les cuttings. Cela amène les particules à changer en permanence leur emplacement, ce qui est avantageux surtout pour les solides déjà déposés et accumulés. De plus, l'effet centrifuge force les cuttings à se déplacer vers la face externe de l'anneau. Cet effet de la rotation de la tige de forage est encore plus important pour une petite zone annulaire, comme cela se produit dans le forage de trous minces. Dans les sections de puits de forage horizontaux conventionnels, cet effet est réduit en raison de la surface annulaire accrue et parce que la gravité agit contre la force centrifuge. De plus, la rotation de la tige de forage provoque des turbulences dans la zone annulaire, ce qui est recommandé pour des inclinaisons de trou de 55 à 90 degrés [13].

Sanchez et al [14] ont révélé que la rotation des tuyaux a un effet significatif sur le nettoyage des trous dans les puits directionnels. Il a été observé qu'un faible débit avec un régime élevé améliorerait considérablement le nettoyage des trous dans les puits horizontaux. Les auteurs ont déclaré que les petites cuttings étaient plus difficiles à retirer du puits de forage. Cependant, avec un régime élevé et une viscosité élevée de la boue, il était plus facile de transporter de plus petites cuttings à la surface.

### **II.2.3. Taux de pénétration (vitesse d'avancement)**

Un autre paramètre majeur influençant la réduction de l'efficacité du transport est le taux de pénétration. Il influence directement la concentration des cuttings dans le puits de forage et il est recommandé d'ajuster les autres paramètres tels que le débit, les révolutions par minute (RPM) et l'inclinaison du puits de forage. Plus la quantité de cuttings générés au fond du puits en raison du taux de pénétration élevé est élevée, plus la vitesse minimale nécessaire est élevée et donc plus le débit requis pour une élimination suffisante des solides est élevé, comme le montre la figure II.2 [13].

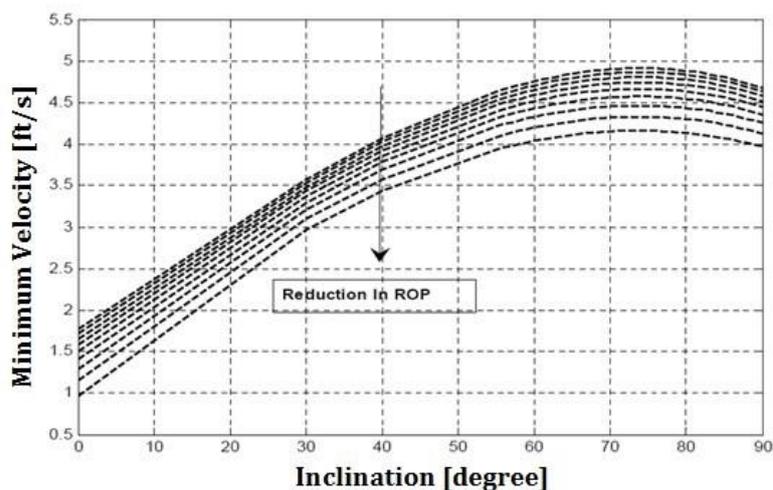


Figure II.2 : Influence de l'inclinaison et de la ROP sur VAM [13]

### II.3. Effet des paramètres fluides sur le transport des cuttings

#### II.3.1. Poids de la boue

Les deux principaux paramètres de fluide affectant le nettoyage des trous sont le poids et la viscosité de la boue. Le poids de la boue assure principalement la stabilisation mécanique du trou de forage et la prévention de l'invasion du fluide de formation dans l'espace annulaire. Dans le nettoyage des trous, le poids de la boue du fluide de forage a peu ou pas d'effet sur le nettoyage des trous. Cependant, une petite augmentation de la densité de la boue diminue la hauteur du lit. L'augmentation de la densité du fluide de forage avec la même rhéologie a peu ou pas d'effet sur le nettoyage des trous. Toute augmentation inutile du poids de la boue pourrait entraîner une fracture de la formation [15].

#### II.3.2. Type de boue

Le type de boue a également été établi par différents auteurs comme ayant un effet faible à modéré sur le nettoyage des trous. La boue à base d'huile et la boue à base d'eau ayant la même rhéologie sont généralement les mêmes en termes de capacité de nettoyage des trous. Pour une plage d'inclinaison de 40 à 60 degrés, la boue à base d'eau fonctionne légèrement mieux que la boue à base d'huile, dans le nettoyage des trous. Cependant, la boue à base d'eau pourrait entraîner un certain nombre de problèmes, en particulier lors du forage dans du schiste réactif, ce qui pourrait entraîner un problème de stabilité du trou [15].

### II.3.3. Rhéologie de la boue

La rhéologie de la boue est une fonction principale de la viscosité plastique (PV) et de sa yield point (YP). La rhéologie de la boue a un effet significatif sur le nettoyage des trous. L'augmentation de PV et YP tend à améliorer le nettoyage des trous. Il a été observé que l'augmentation de la viscosité de la boue a un impact positif sur le nettoyage des trous, et particulièrement efficace si la rhéologie à faible cisaillement YP et le rapport YP/PV sont élevés. Cependant, on observe qu'une trop grande augmentation de la viscosité de la boue (au-dessus de la viscosité optimale) a un effet négatif sur le nettoyage des trous. Il est également connu que l'augmentation de la viscosité du fluide au même débit transforme le régime turbulent actuel en écoulement laminaire, qui a moins de capacité de nettoyage dans les puits à angle élevé [15].

### II.3.4. Débit

Le débit de boue fournit la force de levage sur les cuttings pour le transport des cuttings hors du puits. L'augmentation du débit aide énormément au nettoyage des trous. Selon la majorité des auteurs, l'augmentation du débit est nécessaire pour réduire la hauteur du lit de cutting. L'augmentation de la vitesse annulaire du fluide de forage contribue à un nettoyage efficace des trous. L'effet est plus important dans les puits à forte inclinaison [15].

## II.4. Effet des paramètres de cuttings

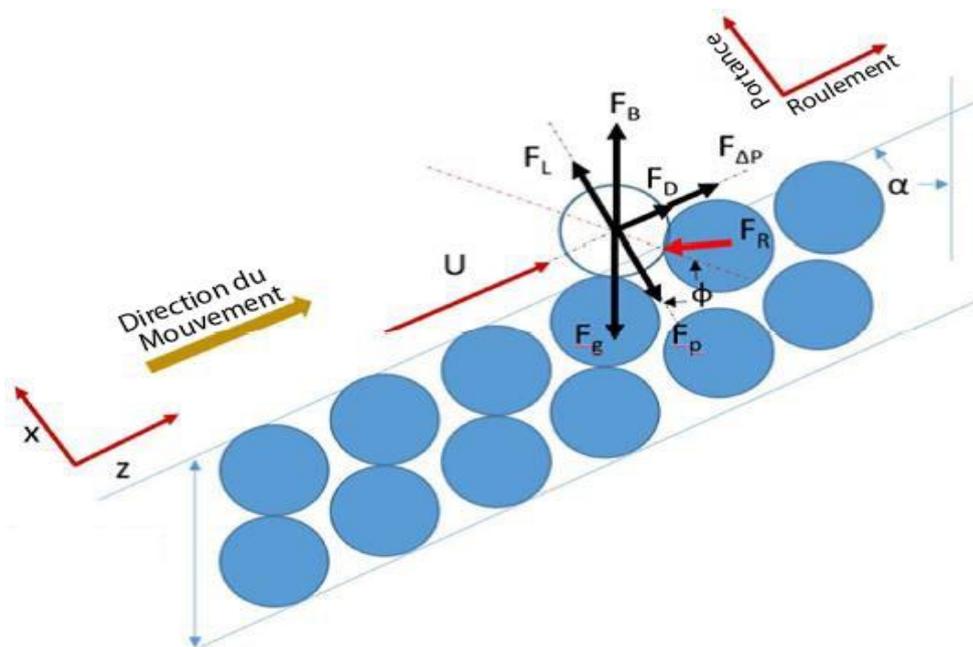
Le nettoyage des trous peut également être affecté par la taille, la forme et la densité des cuttings, dans une certaine mesure. L'augmentation à la fois de la taille et de la densité des cuttings a tendance à augmenter la vitesse de glissement, ce qui affecte négativement le nettoyage des trous en raison de la sédimentation accrue des cuttings et de l'augmentation de la hauteur du lit de cuttings. Selon les travaux de Larson [16], les petites particules sont plus difficiles à nettoyer que les grosses particules, en particulier lorsque la taille des cuttings est supérieure à 0,5 pouce. En effet, les particules plus petites forment une litière plus compacte par rapport aux particules plus grosses qui forment un lit de cuttings lâche qui peut facilement être emporté. Pour les particules dont la taille est inférieure à 0,5 pouce, les cuttings plus petites sont plus faciles à nettoyer que les plus grandes. La forme des cuttings affecte également l'efficacité du nettoyage des trous. Les cuttings de forme sphérique ont tendance à glisser davantage pour se déposer sur le côté

inférieur du puits. Plus la concentration de cuttings est élevée, plus l'ECD est élevé, plus la probabilité de problèmes de nettoyage des trous est élevée [15].

## II.5. Physique du transport des cuttings

### II.5.1. Forces agissant sur les particules de cuttings.

L'analyse des phénomènes de processus de remise en suspension de particules solides et de formation de lit nécessite une bonne compréhension de l'ensemble des forces qui agissent sur les particules dans le puits de forage. Il existe plusieurs forces qui agissent sur une particule lorsqu'elle se trouve à l'intérieur de l'anneau à un moment donné. Ces forces sont la flottabilité, la gravité, la portance, la traînée, le frottement et la force plastique due à la Yield Point de la boue (dans le cas d'un fluide non newtonien) agissant dans les directions indiquées à la Fig. II.3.



**Figure II.3 :** Forces agissant sur les particules solides dans le fluide de forage

Tableau II.1. Équations auxiliaires des forces d'équilibre

Force	Equation
Force de traînée	$F_D = \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_f U^2$
Force de portance	$F_L = \frac{1}{2} C_L \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_f U^2$
Force de flottabilité	$F_B = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_f U^2$
Force de gravité	$F_g = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_f U^2$
Force différentielle de Presseure	$F_{\Delta p} = \frac{\pi d_p^3}{6} \left( \frac{4\tau_w}{D_{hyd}} \right)$ $D_{hyd} = \frac{4A}{\text{périmètres mouillés}}$ $D_{hyd} = \frac{4 \cdot \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)}{\pi (d_o + d_i)} = d_o - d_i$ <p>Où <math>\tau_w</math> est la contrainte de cisaillement de la paroi et le diamètre hydraulique</p>
Force plastique	$F_P = \frac{\pi d_p^2}{2} \tau_y \left[ \varphi + \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \sin^2 \varphi - \cos \varphi \sin \varphi \right]$ <p>Où <math>\tau_y</math> est la yield point du fluide</p>

En considérant une seule particule de cutting à l'équilibre sous l'influence des forces listée ci-dessus, comme illustré à la figure II.3, les équations d'équilibre des forces suivantes sont obtenues pour le mécanisme de roulement et de portance.

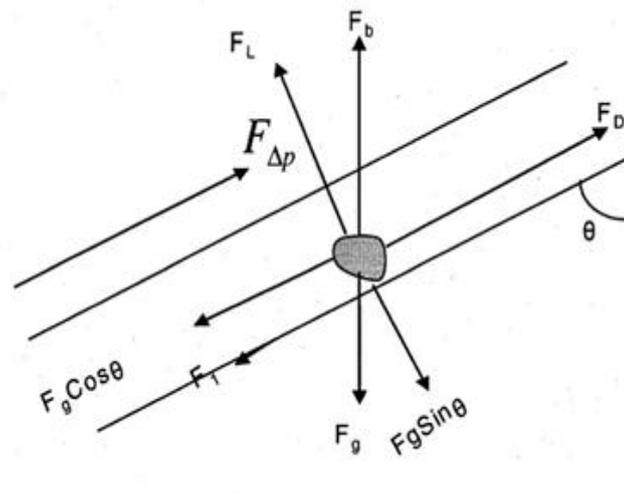


Figure II.4 : Forces agissant sur les particules solides dans le fluide de forage

Pour le cas roulement, la force résultante dans la direction x est :

$$F_x = F_D + F_{\Delta P} - (F_g - F_b) \cos \alpha - F_{fr} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$F_{fr} = N \left( (F_g - F_b) \sin \alpha - (F_L - F_P) \right) \quad (\text{II.3})$$

Donc :

$$F_x = F_D + F_{\Delta P} - (F_g - F_b) \cos \alpha - N \left( (F_g - F_b) \sin \alpha - (F_L - F_P) \right) \quad (\text{II.4})$$

Pour le cas de portance, la force résultante dans la direction x est :

$$F_y = F_L + (F_g - F_b) \sin \alpha \quad (\text{II.5})$$

Ci-dessous un résumé des cas de mécanismes de transport de cutting dans les puits inclinés

**Tableau II.2.** Cas de mécanismes de transport de cutting dans les puits inclinés

$\begin{pmatrix} F_x > 0 \\ F_y \leq 0 \end{pmatrix}$	Un mécanisme de roulement est observé (glissant vers le haut)
$\begin{pmatrix} F_x < 0 \\ F_y < 0 \end{pmatrix}$	Les cuttings glisseraient dans le trou pour former un lit de cutting
$\begin{pmatrix} F_x = 0 \\ F_y < 0 \end{pmatrix}$	Absence de mécanisme de roulement ou de portance (cuttings à l'équilibre)
$\begin{pmatrix} F_x < 0 \\ F_y = 0 \end{pmatrix}$	Pas de mécanisme de portance mais les cuttings glissent vers le bas
$\begin{pmatrix} F_x = 0 \\ F_y = 0 \end{pmatrix}$	Absence de mécanisme de roulement ou de portance (cuttings à l'équilibre)
$\begin{pmatrix} F_x \leq 0 \\ F_y > 0 \end{pmatrix}$	mécanisme de portance est observé (les cuttings seraient suspendues)
$\begin{pmatrix} F_x > 0 \\ F_y > 0 \end{pmatrix}$	Les déblais seraient soulevés et traînés en suspension jusqu'à la surface

Compte tenu de l'effet de ces forces, les déblais peuvent être efficacement transportés vers la surface si les forces dynamiques sont optimisées de manière à surmonter les forces statiques et ont encore suffisamment d'énergie pour transporter les déblais vers la surface sans éroder le puits de forage. Ceci peut être réalisé en optimisant les conditions de

fonctionnement du fluide de forage et de l'opération de forage, comme cela sera discuté au chapitre 4.

### II.5.2. Coefficient de traînée, nombre de Reynold et état de surface des cuttings.

Les forces de traînée jouent un rôle important dans le transport des cuttings le long du puits de forage. L'analyse du coefficient de traînée et du nombre de Reynolds est importante pour comprendre le phénomène de sédimentation des cuttings à l'intérieur du puits de forage. Le coefficient de traînée représente la quantité d'énergie cinétique, induite par la vitesse de sédimentation, nécessaire pour surmonter la force de traînée sur la particule. Pour une particule de diamètre équivalent  $d_{eq}$ , le coefficient de traînée dans le processus de sédimentation est défini comme [3]

$$C_D \approx \begin{cases} \frac{24}{N_{Re}} & \text{pour } N_{Re} < 1 \\ \frac{24}{N_{Re}} \sqrt{1 + 0.2N_{Re} + 0.003N_{Re}^2} & \text{pour } 1 < N_{Re} < 10^5 \\ 0.1 & \text{pour } N_{Re} > 10^5 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Où  $N_{Re} = \frac{\rho_f d_{eq} v_s}{\mu_f}$  et  $\mu_f$  sont respectivement le nombre de Reynolds et la viscosité du fluide. Où  $C_D$ ,  $\rho_p$  et  $\rho_f$  sont respectivement le coefficient de traînée, la densité des particules et la densité du fluide.  $v_s$ , est la vitesse de sédimentation des cuttings.

Pendant l'opération de forage, lorsque le trépan pénètre dans les roches, les cuttings créés n'ont aucune tendance de forme. Les cuttings sont de différentes formes irrégulières. Dans le régime d'écoulement laminaire ( $N_{Re} < 1$ ), l'effet de l'état de surface sur le coefficient de traînée est mineur, et donc ignoré. En régime d'écoulement turbulent ( $N_{Re} > 100$ ), les formes irrégulières des cuttings ont un effet sur le coefficient de traînée, et donc sur la vitesse de sédimentation [17]

La sphéricité d'une particule est quantifiée à l'aide de l'équation suivante [3]

$$\psi = \frac{A'_s}{A_s} \quad (\text{II.7})$$

Où  $A'_s$  est la surface d'une sphère qui a le même volume que la découpe étudiée et  $A_s$  est la surface de la cutting. Des échantillons de cuttings prélevés dans les champs ont montré que la sphéricité moyenne est d'environ 0,8. Pour les cuttings de forme irrégulière, le coefficient de traînée en régime turbulent est défini comme [3].

$$C_{D_t} = \frac{67.289}{e^{5.030\psi}} \quad (\text{II.8})$$

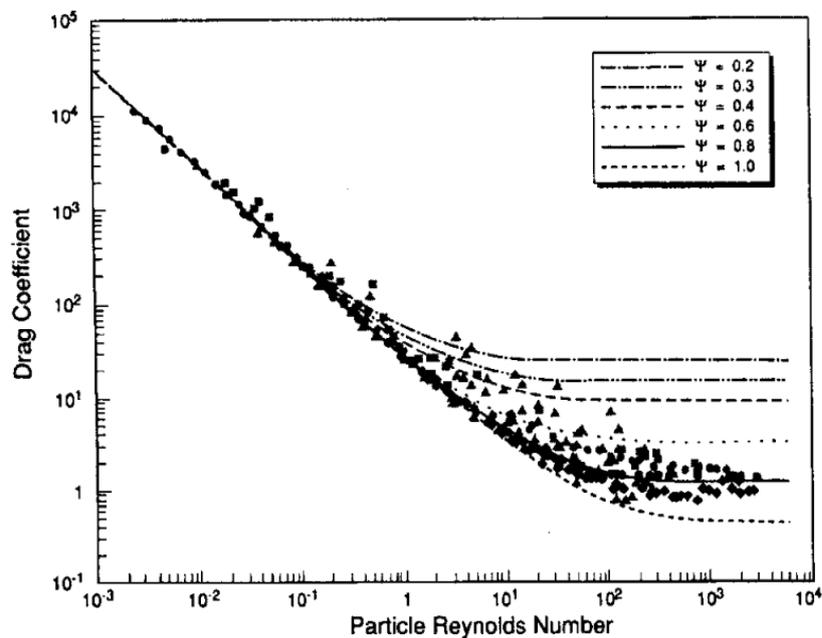
Utilisation de la sphéricité moyenne des cuttings

$$C_{D_t} = 1.250, \quad \psi = 0.8$$

Le coefficient de traînée peut être lié au nombre de Reynolds pour les particules de forme irrégulière par l'expression suivante [3]

$$C_D = \frac{30}{N_{Re}} + \frac{67.289}{e^{5.030\psi}} \quad \text{pour } 0.2 < \psi < 1.0 \quad (\text{II.9})$$

L'expression ci-dessus est vraie pour les nombres de Reynolds allant de 0,001 à 10 000. La **figure II.5** montre une représentation graphique de l'équation (13) lorsqu'il est tracé par rapport au nombre de Reynolds de la particule.

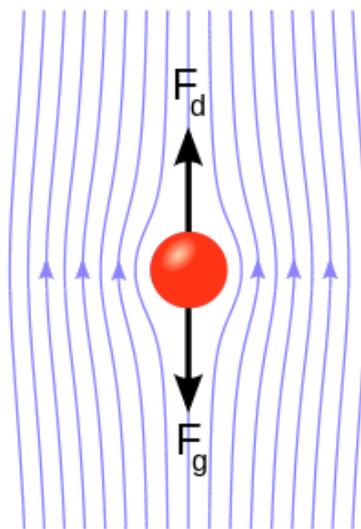


**Figure II.5.** Relations entre  $C_D$  et  $N_{Re}$  [17]

### II.5.3. Vitesse de sédimentation des cuttings / Vitesse limite

- **Suspension**

La vitesse de glissement des particules est un paramètre important. Elle est définie comme la vitesse à laquelle une particule tend à se déposer dans un fluide en raison de son propre poids. La vitesse de glissement dépend de la taille des particules, de sa géométrie, de sa densité et des propriétés rhéologiques du fluide. La capacité de charge des boues est également affectée par le profil de vitesse dans l'espace annulaire. La **figure II.6** montre une sphère lisse fixe de diamètre  $DP$  située dans un courant de fluide.



**Figure II.6.** Force de traînée sur un solide en suspension dans du fluide [19].

Si la vitesse d'écoulement annulaire ne dépasse pas la vitesse de glissement, cela entraîne souvent des problèmes liés aux accumulations des cuttings. Pour éviter de tels problèmes, nous devons prédire avec précision la vitesse de glissement afin de déterminer le débit approprié pour une meilleure opération de nettoyage. La vitesse de glissement est supposée égale à la vitesse terminale de sédimentation de la particule dans un liquide stationnaire. Cependant, une hypothèse est discutable en raison du mouvement complexe de la particule dans l'anneau.

La vitesse de sédimentation d'une particule peut être obtenue en équilibrant la force de traînée avec la force immergée [3]

$$F_D = F_g$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D}} \quad (\text{II.10})$$

$F_g$  est la force gravitationnelle

$$F_g = \pi \frac{d_p^3(\rho_p - \rho_f)}{6} g \quad (\text{II.11})$$

$F_D$  est la force Traînée

L'équation de vitesse de sédimentation ci-dessus représente la chute ou la sédimentation d'une seule cutting dans un fluide visqueux. Dans le transport des cuttings, le fluide transporte un groupe de cuttings, pas seulement un seul déblai. Par conséquent, la vitesse de sédimentation doit être corrigée pour tenir compte des cuttings voisins. Richardson et Zaki [18] ont développé des relations entre la concentration du lisier et les vitesses de sédimentation en introduisant le paramètre de porosité du lisier. La porosité du lisier est le rapport volumétrique du lisier. Pour les trois régions mentionnées ci-dessus, la vitesse de sédimentation corrigée est donnée par (Richardson et Zaki [18]).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{s,cr} = v_s * \left(1 - \frac{c_s}{\rho_p}\right)^{5.5}, N_{Re} \leq 2 \\ v_{s,cr} = v_s * \left(1 - \frac{c_s}{\rho_p}\right)^{3.5}, 2 < N_{Re} < 500 \\ v_{s,cr} = v_s * \left(1 - \frac{c_s}{\rho_p}\right)^2, N_{Re} \geq 500 \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

Où  $c_s$  est la concentration de cuttings

# *Chapitre III*

## *Simulation Numérique Par Ansys-Fluent*

Dans ce chapitre, un modèle numérique de transport des cuttings a été construit. Les détails des équations gouvernantes et des entrées de simulation du modèle de base sont fournis dans ce chapitre. Pour valider le modèle numérique, une comparaison avec des résultats expérimentaux a été faite.

### III.1 Aperçu des processus CFD

Le programme utilisé pour effectuer cette simulation informatique était ANSYS FLUENT 20. Dans le package fourni, il existe des programmes utilisés pour créer la géométrie, le maillage et les résultats de post-traitement. Plusieurs étapes doivent être utilisées de notre travail pour effectuer tous les calculs.

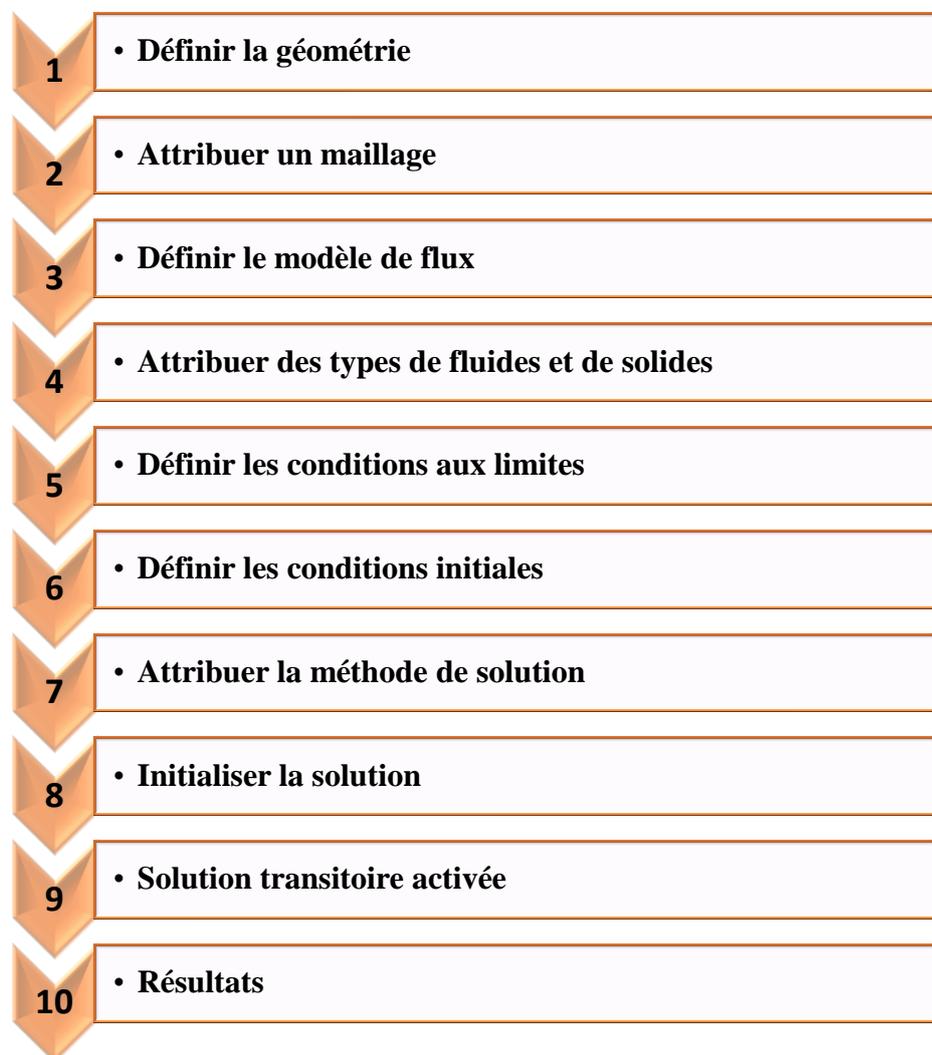
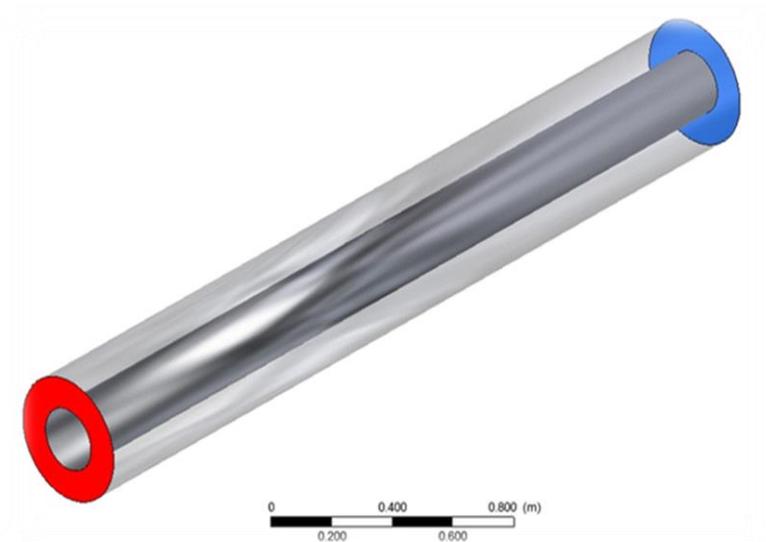


Figure III-1. Etape de simulation

### III.2 Géométrie

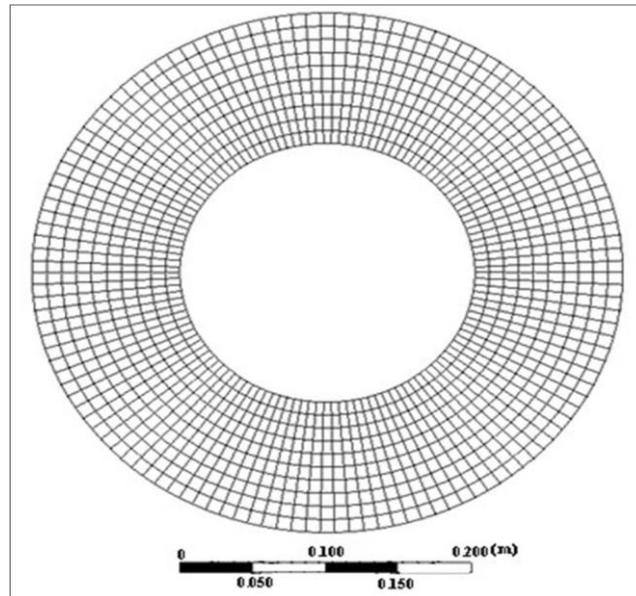
La figure III.2 montre la géométrie du puits de forage. La surface extérieure de l'espace annulaire est définie comme la paroi du puits et la surface intérieure est définie comme la paroi de la tige de forage. L'anneau étudié a un rayon intérieur et extérieur de 5,00 pouces et 8,50 pouces, respectivement. La longueur de la section d'essai est de 25 pieds. la géométrie a été créée par Design Modeler/ANSYS.



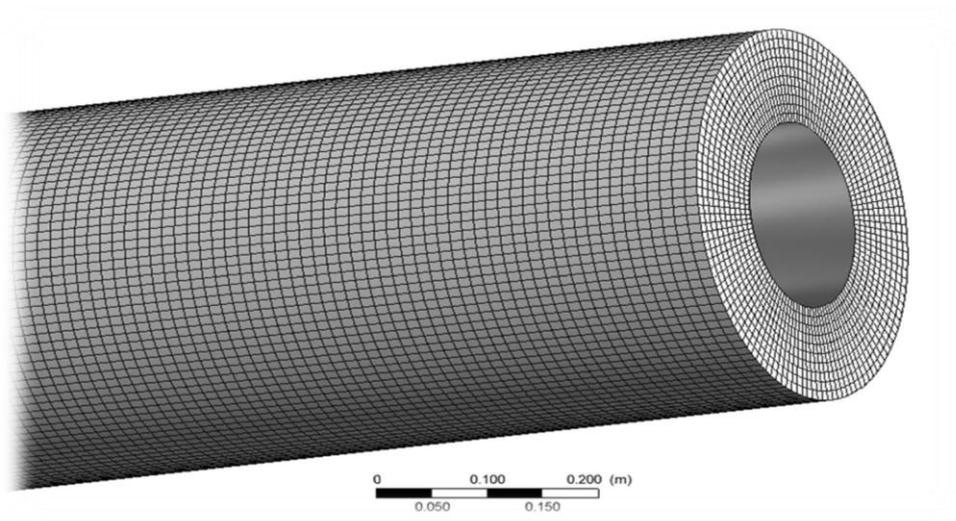
**Figure III-2** Géométrie annulaire du train de tiges créée pour le mode concentrique.

### III.3 Maillage

Dans le présent travail, la grille orthogonale a été utilisée pour le maillage de la géométrie considérée pour le système d'écoulement. Les cellules de calcul sur la coupe transversale de l'anneau sont présentées à la Fig. 3.3 où un domaine de calcul avec 472,140 nœuds et 445,788 cellules a été sélectionné avec un maillage raffiné près des parois.



**Fig. III.3** Vue transversale de la grille de calcul créée



**Fig. III.4** Vue longitudinale de la grille de calcul créée

### III.4 Paramètres de simulation

La plupart des paramètres utilisés pour les simulations ont été présentés dans l'article [3]. Alors que certains ont été pris comme valeurs par défaut ou comme paramètres recommandés par la théorie «ANSYS Fluent» et les manuels d'utilisation. Les tableaux III.1 et III.2 résument au mieux les paramètres les plus importants.

Tableau III.1. Paramètres de simulation "Setup".

Setup		
<b>General</b>	Solver type	Pressure -based
	Velocity Formulation	Absolute
	time	Transient
	Gravitationl acceleration (m/s <sup>2</sup> ) :y-direction	-9.81
<b>Models</b>	Multiphase Model	Eulerian
	Number of eulerian phase modle	2
	Dense Discrete phase Model	Unchecked
	Number of Discrete Phases	0
	Volume Fraction Parameters-Formulation	Implicit
	Viscous Model	Reynold's stress
	Near-wall Treatment	Standard wall Function
<b>Materials</b>	Fluid - Water/Med Visc Density (Kg/m <sup>3</sup> )	1000 ; 1100
	Fluid- Water Viscosity (Kg/m-s)	Paper Reference
	Solid-Inert Particle Density (kg/ m <sup>3</sup> )	2500
<b>Phase</b>	Phase 1 - Primary Phase	Water ,Med,Visc
	Phase 2 - Discrete Phase	Sand
	Phase 2 -Granular	Checked
	Phase2 – Granular temperature Model	Phase property
	Phase 2- Granular Viscosity	Gidaspow
	Phase 2- Granular Bulk Viscosity	Lun-et-al
	Phase 2- Frictional Viscosity	Schaeffer
	Phase 2-Solids Pressure	Lun et al
	Phase 2-Radial Distribution	Lun et al
	Inlet - Mixture	Velocity Inlet
	Inlet – Phase 1 : Velocity magnitude(m /s)	Paper Reference
<b>Boundary conditions</b>	Outlet - Mixture	Pressure Outlet
	Outlet – Mixture –Gauge pressure (Pascal)	0
	Outer pipe Wall	Stationary Wall
	Inner Pipe Wall	Stationary Wall / Moving Wall

**Tableau III.2.** Paramètres de simulation "Solution".

solution		
<b>Methods</b>	Pressure Velocity Coupling Scheme	Phase Coupled SMPLE
	Spatial Discretization - Gradient	Least Squares Cell Based
	Spatial Discretization - Pressure	Second Order
	Spatial Discretization- Momentum	First Order Upwind
	Spatial Discretization –Volume Fraction	First Order Upwind
	Spatial Discretization –Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
	Spatial Discretization – Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
	Transient Formulation	First Order Implicit
<b>Controls</b>	Under – Relaxation Factors - Pressure	0.7
	Under – Relaxation Factors - Momentum	0.3
<b>Monitors</b>	Residual – Absolute criteria	0.00001
	Residual – Convergence criteria	Absolute
	Initialization	Hybrid Initialization
<b>Calculation Activities</b>	Automatic Export	Particle History Data Export
	Run Calculation – Time Stepping Method	Fixed
	Data Sampling for Time Statistics	Checked
	Time Step Size (s)	1
	Number of Time Steps	100

### III.5 Validation du modèle CFD

Les résultats sont comparés aux données expérimentales présentées par Tormen [15]. Dans son expérience, il avait un anneau qui a un diamètre intérieur et extérieur de 1,9 pouces et 5 pouces respectivement. La longueur de son anneau était de 40 pieds. Le tableau III-3 résume les paramètres de forage utilisés dans l'expérience de Tomren et les résultats sont présentés dans le tableau III-4. On peut conclure que nos résultats sont en bon accord avec l'étude expérimentale ,cuttings mass flow rate a été spécifié à 20 lb/min.

**Tableau III-3.** Paramètres de validation

Parameters	Test 1	Test 2	Test 3
<b>Taille des Cutting (in)</b>	0.25	0.25	0.25
<b>Densité des Cutting (g/cc)</b>	Grès (2,65 g/cc),	Grès (2,65 g/cc),	Grès (2,65 g/cc),
<b>La boue de Forage ( ppg)</b>	Water	Water	Water
<b>vitesse d'avancement (ft/hr)</b>	53.3	53.3	53.3
<b>Circulation rate (gpm)</b>	225	200	175
<b>Vitesse de rotation (RPM)</b>	0	0	0
<b>Excentricité</b>	0	0	0
<b>Inclinaison (degrés)</b>	90	90	90

Tableau III-4. Comparaison de la concentration moyenne des cuttings

	Résultats expérimentaux de Tomen et al. (1986)	Résultats de la simulation	
Numéro du test	Concentration moyenne des cuttings (pourcentage)		Différence en pourcentage
1	2.5	2.31	7.60%
2	3.7	3.40	8.12%
3	6.9	6.33	8.26%

# *Chapitre IV*

## *Résultats et Discussion*

Dans ce chapitre, une étude paramétrique sera réalisée pour examiner l'effet de huit paramètres de forage sur le transport des cuttings. Certains des paramètres examinés peuvent être contrôlés, tels que la circulation et les taux de forage, et d'autres que nous ne pouvons pas contrôler tels que les paramètres de cuttings. Le tableau IV-1 présente les paramètres qui seront mis à l'essai dans ce chapitre.

Tableau IV-1. Paramètres étudiés

Paramètre	Valeur
Densité des cuttings (g/cc)	Grès (2,65 g/cc), Calcaire (2,71 g/cc) et Dolomite (2,87 g/cc).
Taille des cuttings(in)	0.085, <b>0.175</b> , 0.25
Fluide de forage (ppg)	<b>Water</b> , boue(15), boue(20)
Vitesse de rotation (RPM)	<b>0</b> , 40, 60, 100
Excentricité	0.5, <b>0</b> , -0.25, -0.5
vitesse d'avancement (ft/hr)	35, <b>45</b> , 55
le débit de circulation (gpm)	150, 200, <b>350</b> , 400, 450
Inclinaison (degrés)	0, 30, 60, 90

#### IV.1. Effet de densité des cuttings

Dans cette section, l'effet de la densité des cuttings sur les performances de transport des cuttings sera étudié. Trois types de cuttings ont été considérés : (1) Grès (2,65 g/cc), (2) Calcaire (2,71 g/cc) et (3) Dolomite (2,87 g/cc). Tous les autres paramètres ont été maintenus constants. L'effet de la densité des cuttings a été testé sur une gamme d'angles.

La fraction volumique moyenne dans l'anneau, la fraction volumique au milieu de l'anneau, le rapport de transport et le rapport de débit massique sont utilisés pour évaluer les performances de transport des cuttings pour trois densités différentes. Les figures IV-1 et IV-2 montrent la fraction volumique moyenne dans l'anneau et la fraction volumique au milieu de l'anneau.

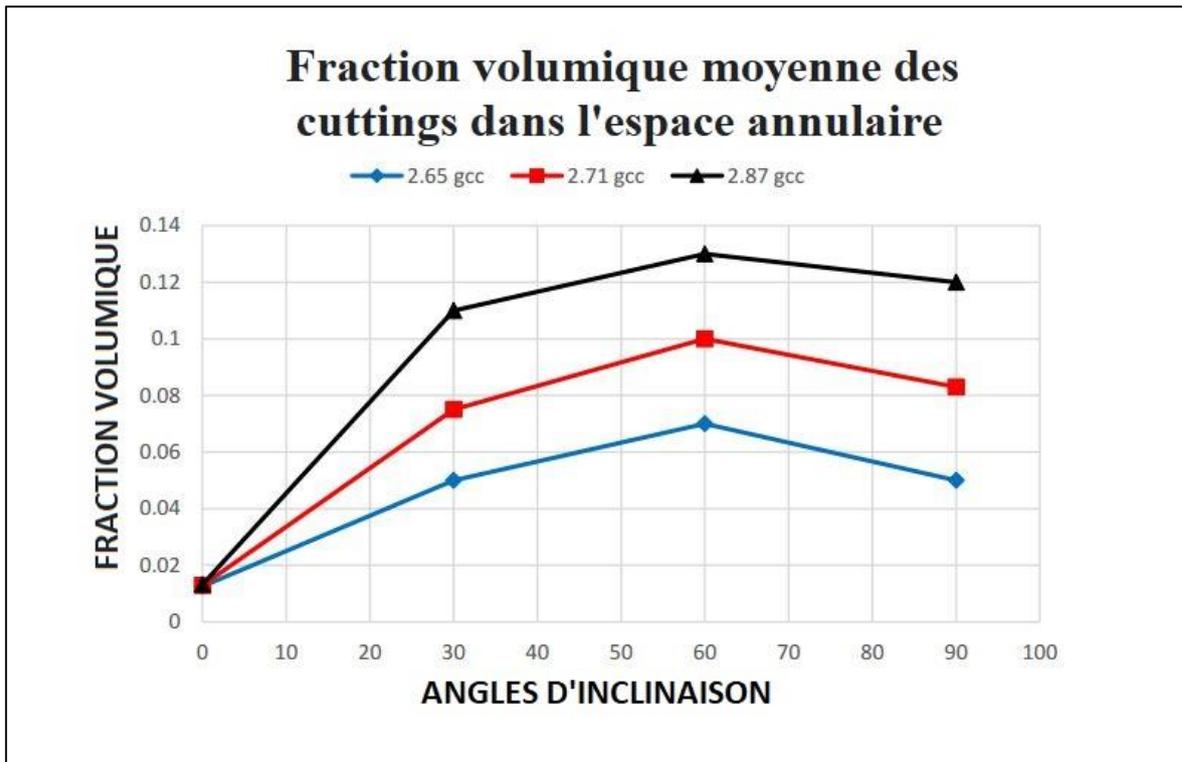


Figure IV-1. Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (densité des cuttings)

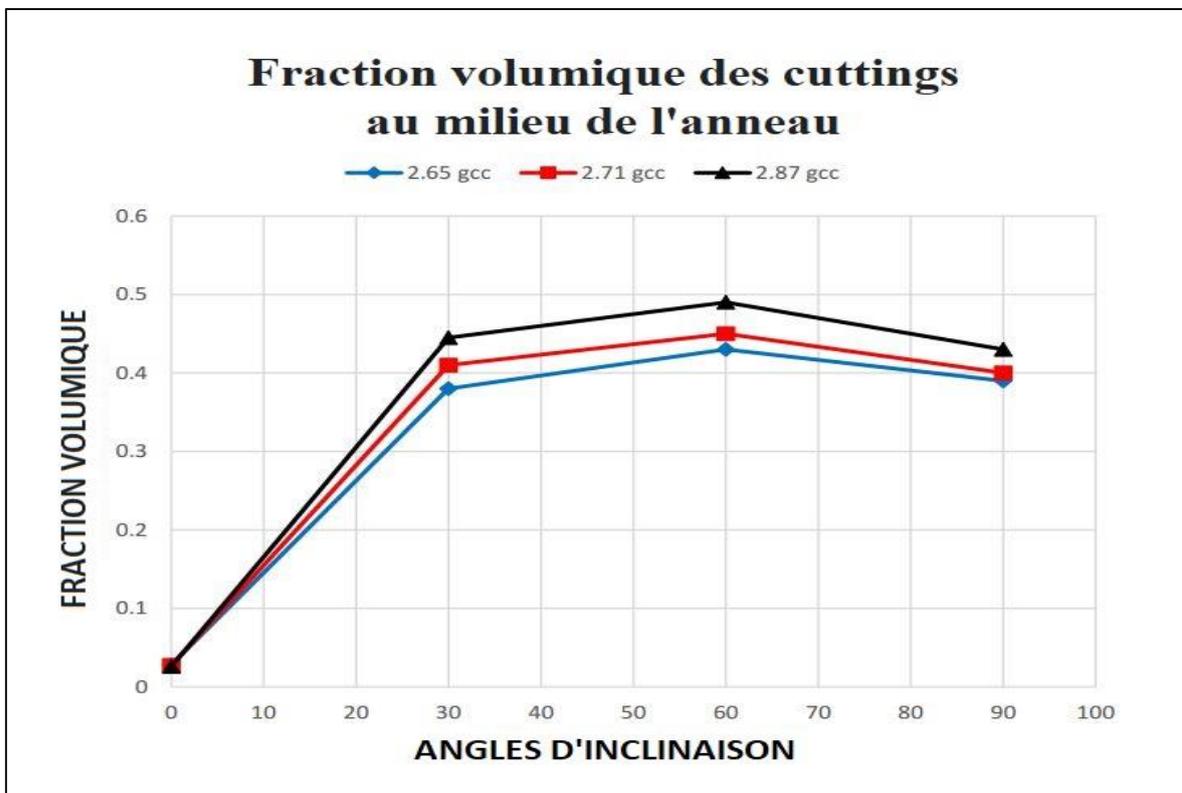


Figure IV-2. Fraction volumique des cuttings au milieu de l'anneau (densité des cuttings)

Les figures IV-2 et IV-3 montrent que les cuttings plus lourds sont plus difficiles à transporter que les cuttings plus légers sur toute la gamme des angles. À des angles d'inclinaison faibles, l'effet de densité sur les performances de transport des cuttings n'est pas significatif, car les cuttings ne subissent pas de forces qui les tirent vers les parois de l'anneau. Ainsi, à des angles d'inclinaison faibles (puits verticaux), les cuttings sont quelque peu réparties uniformément dans l'anneau. À des angles élevés (+30 degrés), les cuttings commencent à subir l'attraction de la gravité vers la face inférieure de l'anneau. Cette traction rend le transport des cuttings plus difficile et force certains cuttings à se déposer, voire à glisser vers le bas du trou.

Pour étayer l'affirmation ci-dessus, Les figures IV-3 et IV-4 montrent respectivement le rapport de transport des cuttings et le rapport de débit massique des cuttings.

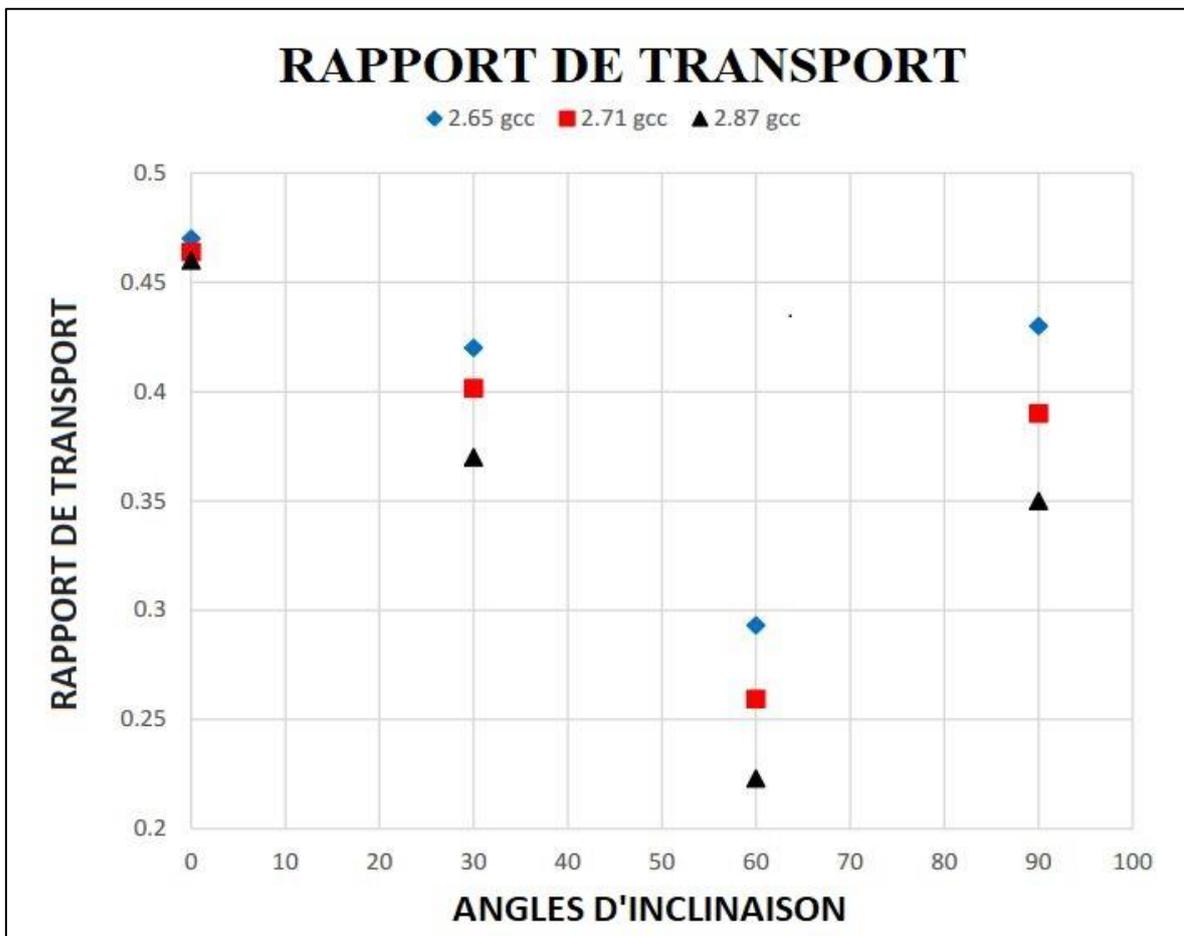


Figure IV-3. Rapport de transport des cuttings (densité des cuttings)

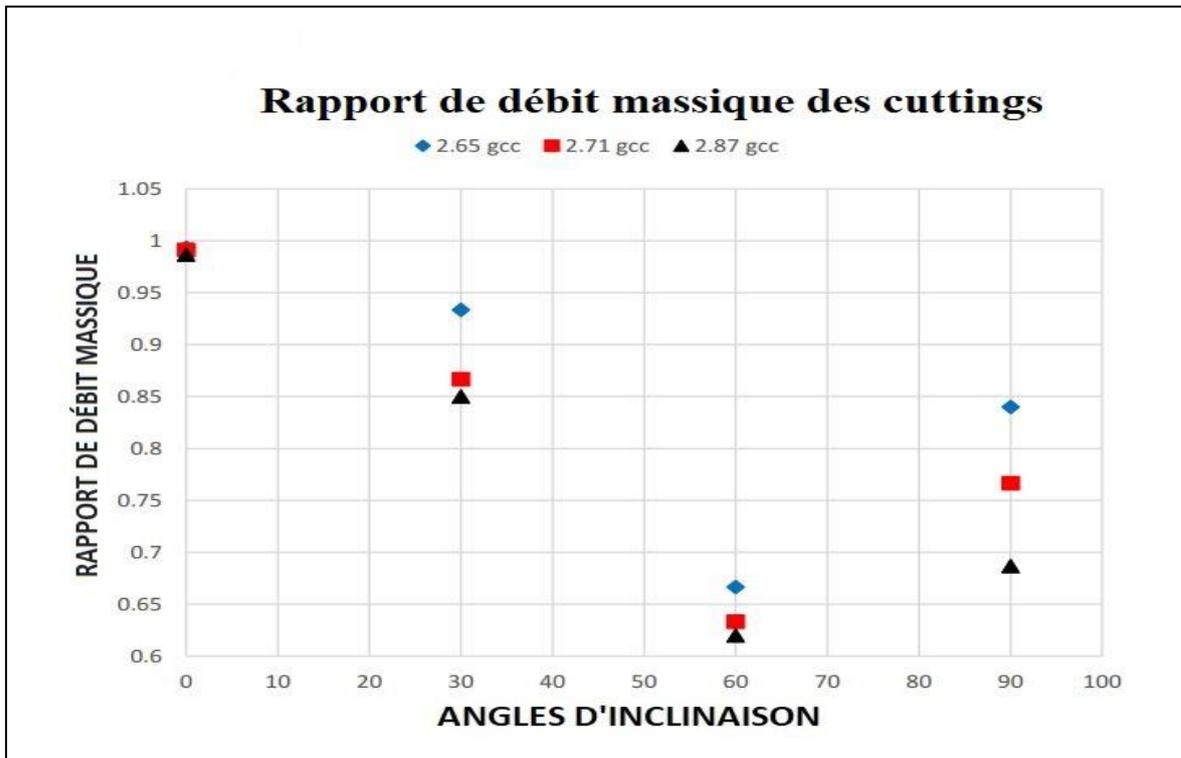


Figure IV-4. Rapport de débit massique des cuttings (densité des cuttings)

#### IV.2. Effet de la taille des cuttings

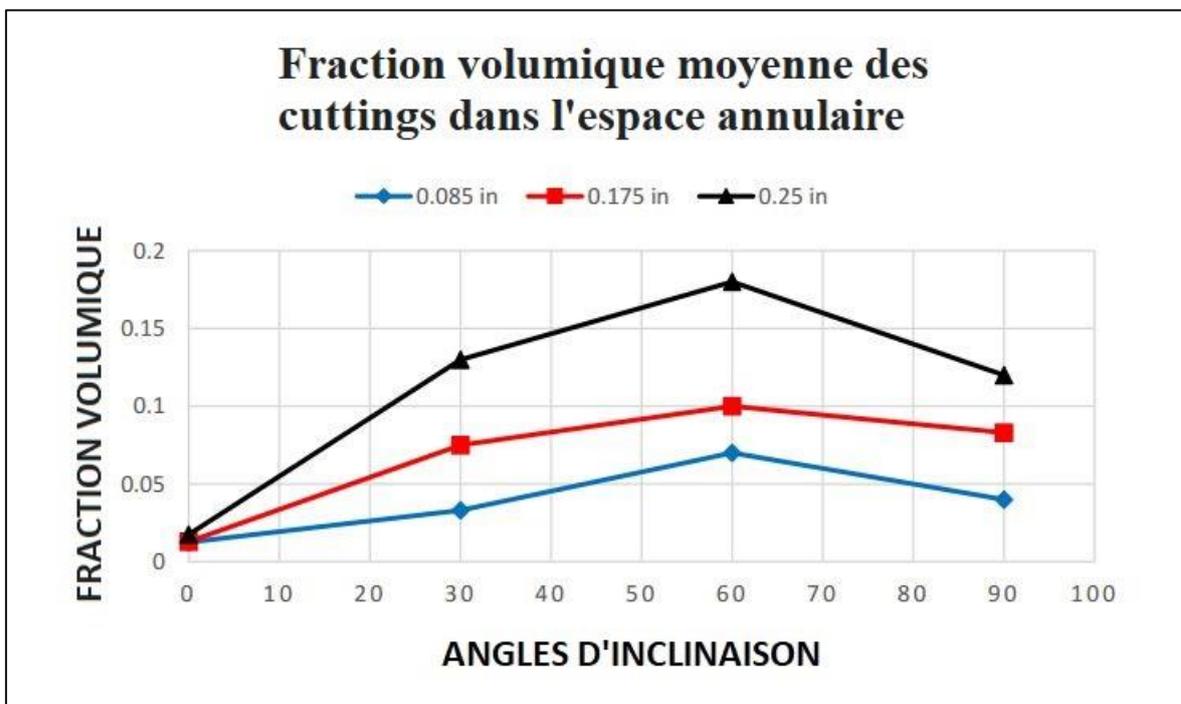


Figure IV-5. Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (taille des cuttings)

Les figures IV-5 montrent la fraction volumique moyenne dans l'espace annulaire. L'effet de la taille des cuttings sur les performances de transport peut être vu sur les figures IV-5. D'après les chiffres, nous pouvons conclure que les cuttings de plus grandes tailles sont plus difficiles à transporter que les cuttings de plus petites tailles. L'effet de taille des cuttings est significatif pour la gamme d'angles compris entre 30 et 60 degrés. À faible angle, la taille des cuttings a un petit effet sur les capacités de transport des cuttings. Si la densité des cuttings est maintenue constante, l'augmentation de la taille des cuttings entraînera une augmentation de la masse. Et par conséquent, les cuttings de plus grande masse seront plus lourdes et plus difficiles à transporter.

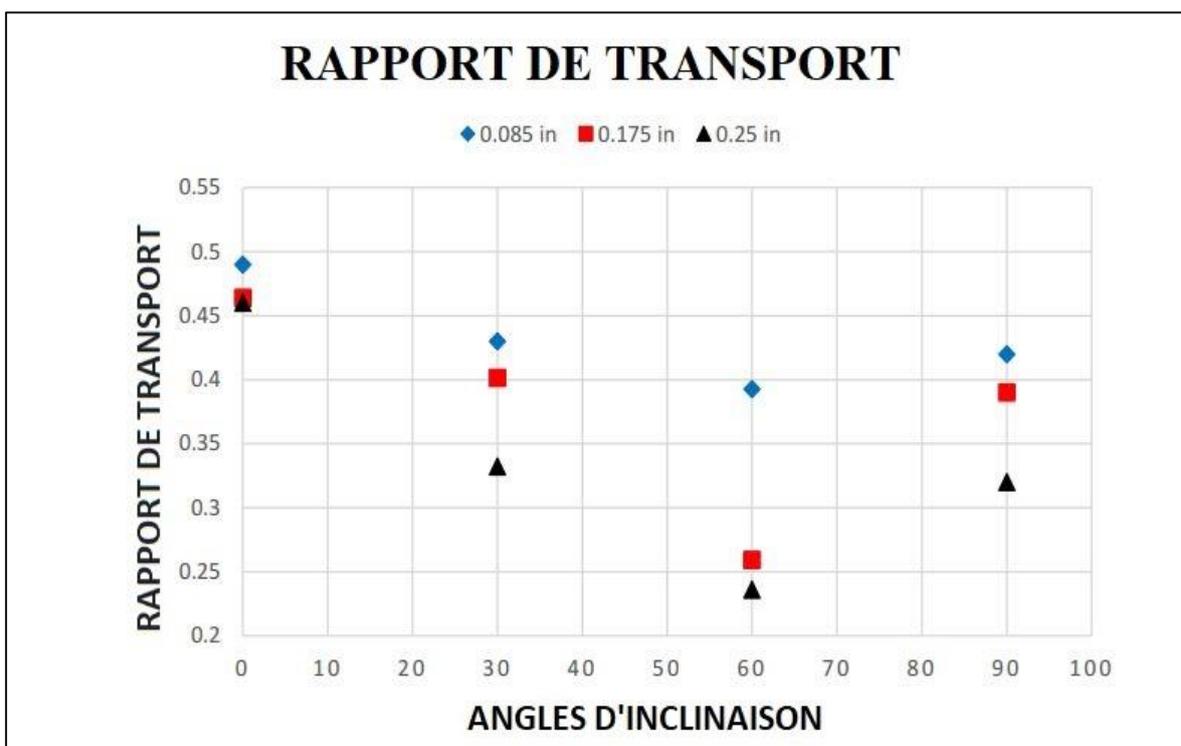
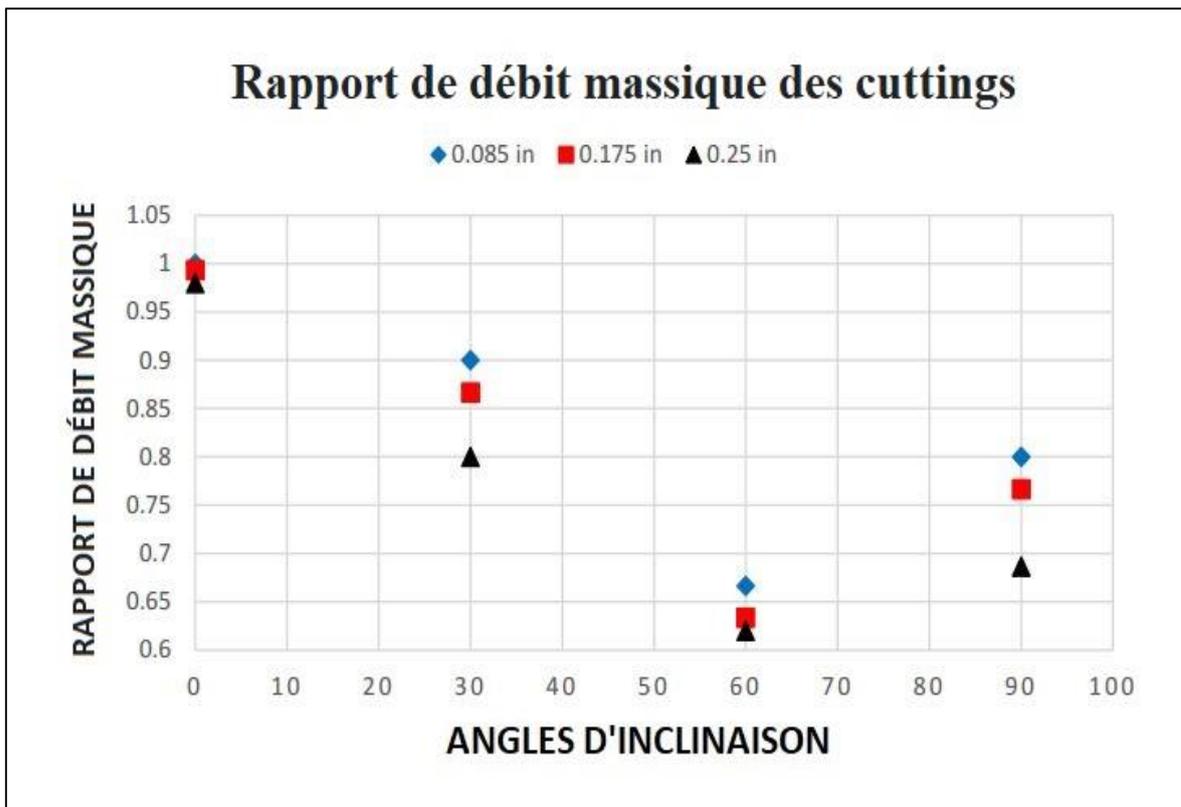


Figure IV-6. Rapport de transport des cuttings (taille des cuttings)



**Figure IV-7.** Rapport de débit massique des cuttings (taille des cuttings)

Les figures IV-6 et IV-7 montrent le taux de transport des cuttings et le rapport du débit massique des cuttings pour les trois tailles considérées. Nous pouvons dire à partir de la figure IV-6 que les cuttings plus petits sont plus faciles à transporter pour toute la gamme d'angles. De plus, les cuttings plus petits sont moins affectés par l'augmentation de l'angle par rapport aux cuttings plus grands. Avec un taux de circulation et une densité constants, il est plus facile de garder les cuttings plus petits en suspension que les cuttings plus grands.

### IV.3. Effet du poids de la boue

L'effet du poids de la boue a été testé sur une gamme d'angles. Les propriétés rhéologiques des trois systèmes de boue ont été maintenues constantes et égales aux propriétés rhéologiques de l'eau. La seule propriété modifiée du fluide est la densité

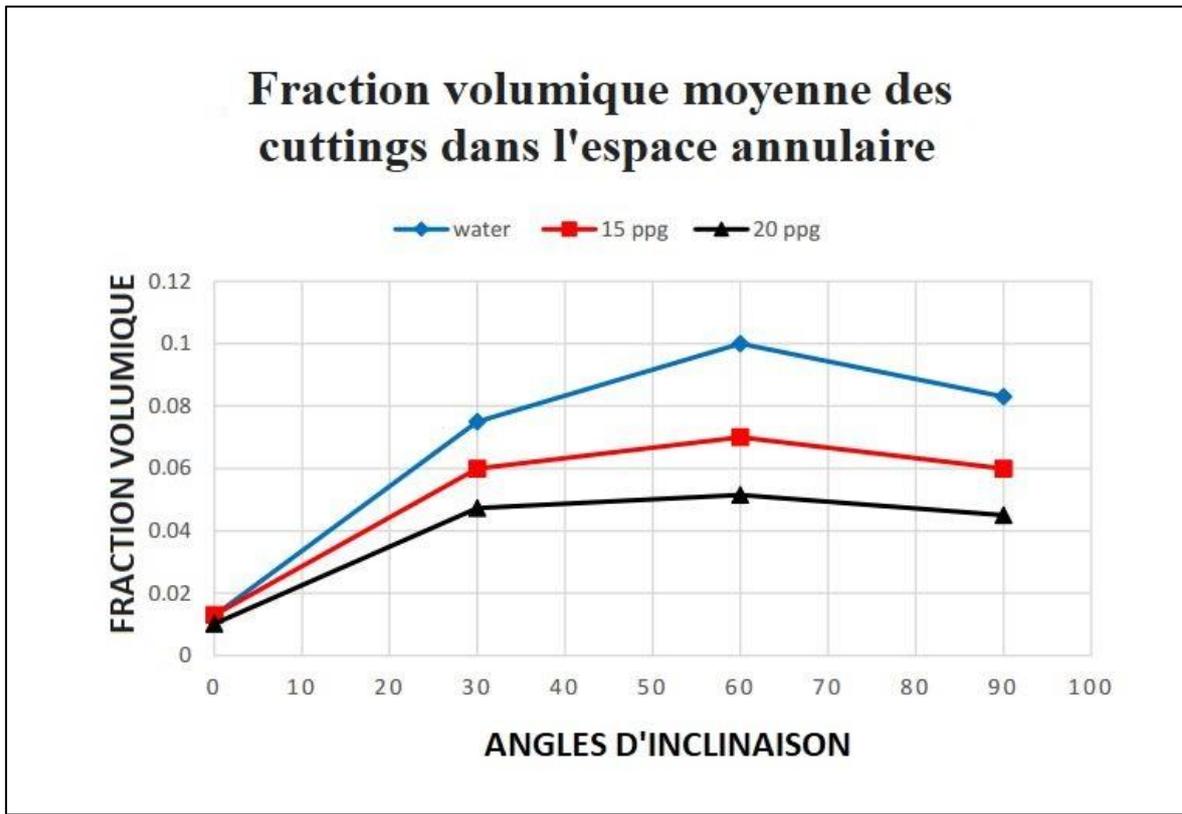


Figure IV-8. Fraction volumique moyenne des cuttings dans l'espace annulaire (boue de forage)

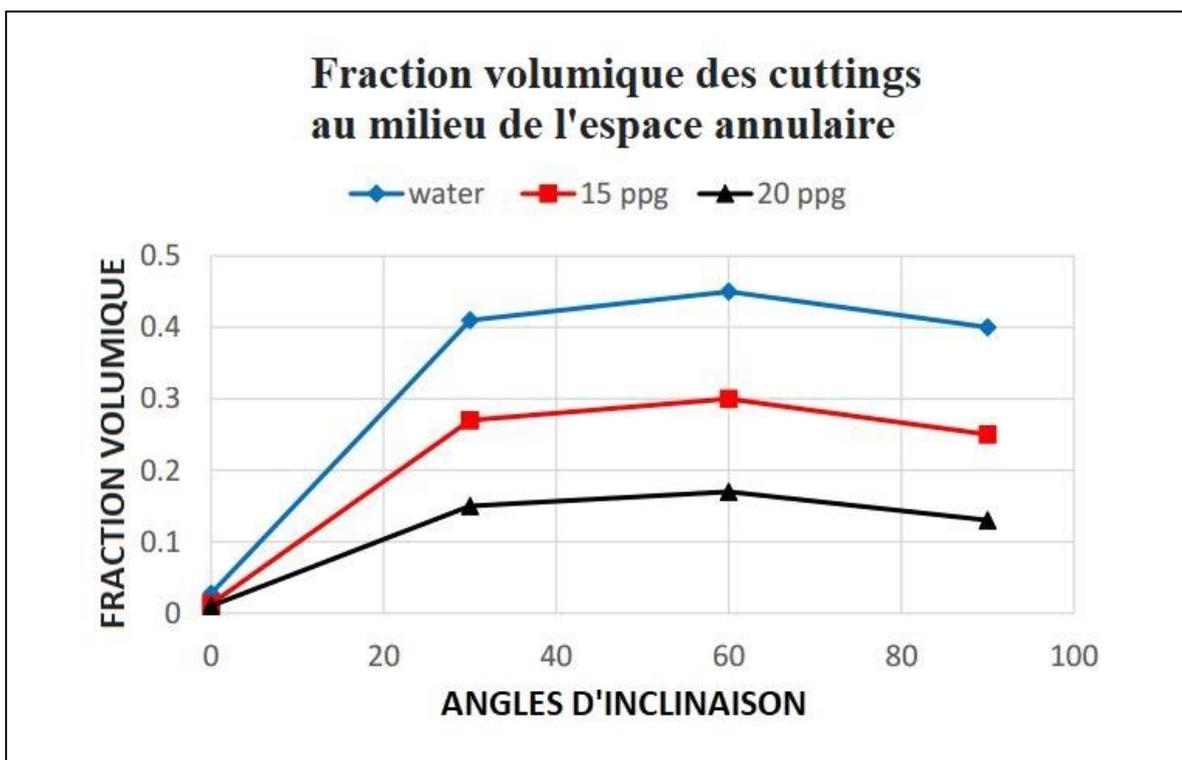


Figure IV-9. Fraction volumique des cuttings au milieu de l'espace annulaire (boue de forage)

En regardant les figures IV-8 et IV-9, nous pouvons affirmer avec confiance que l'effet de l'augmentation du poids de la boue augmente considérablement les performances de transport des cuttings. En regardant la figure IV-9, pour l'angle de 60 degrés (pire cas de nettoyage de trou), changer la boue de l'eau à la boue 2 (15 ppg) diminue la fraction volumique des cuttings de 33,3%. En outre, le passage de la boue 2 à la boue 3 diminue la fraction volumique de 47%. Même si la boue de forage à densité élevée est plus performante qu'une boue inférieure, l'ingénieur de forage doit garder à l'esprit les défaillances catastrophiques qui pourraient survenir en choisissant le mauvais système de boue.

Le rapport de transport et le rapport de débit massique des cuttings ont été calculés et tracés pour la gamme d'angles étudiée. Les résultats sont illustrés dans les figures IV-10 et IV-11.

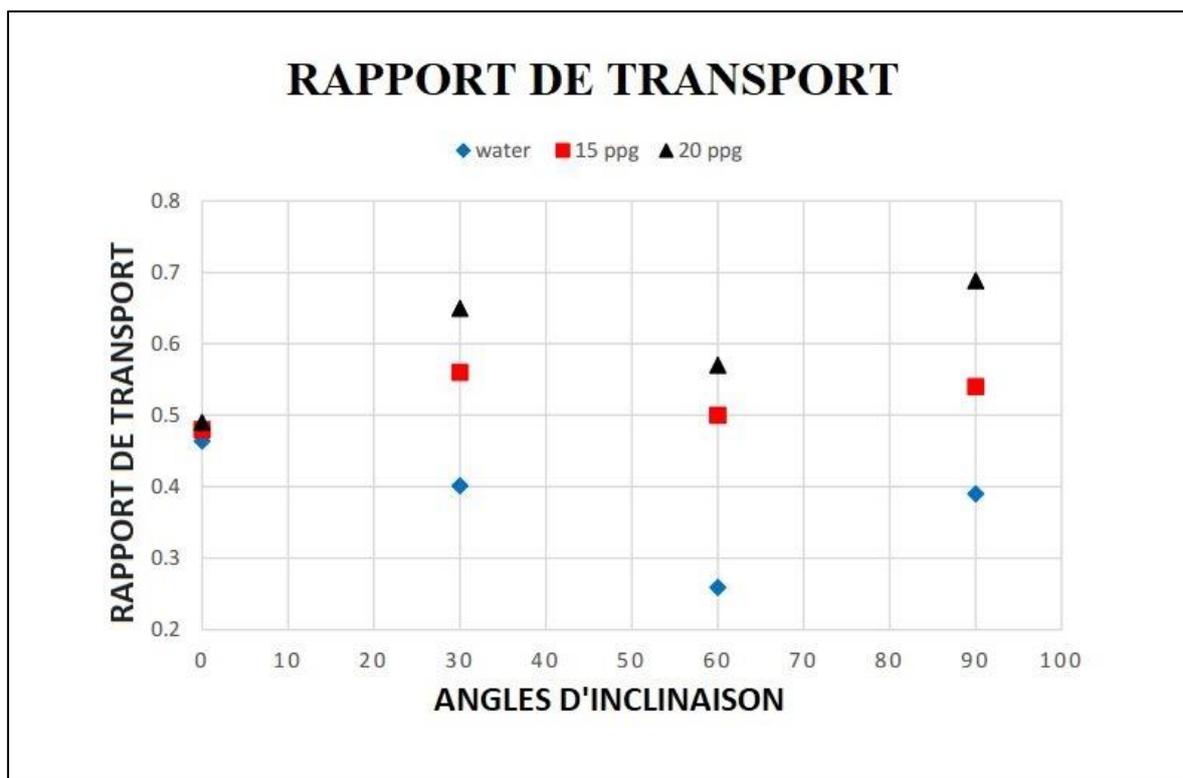
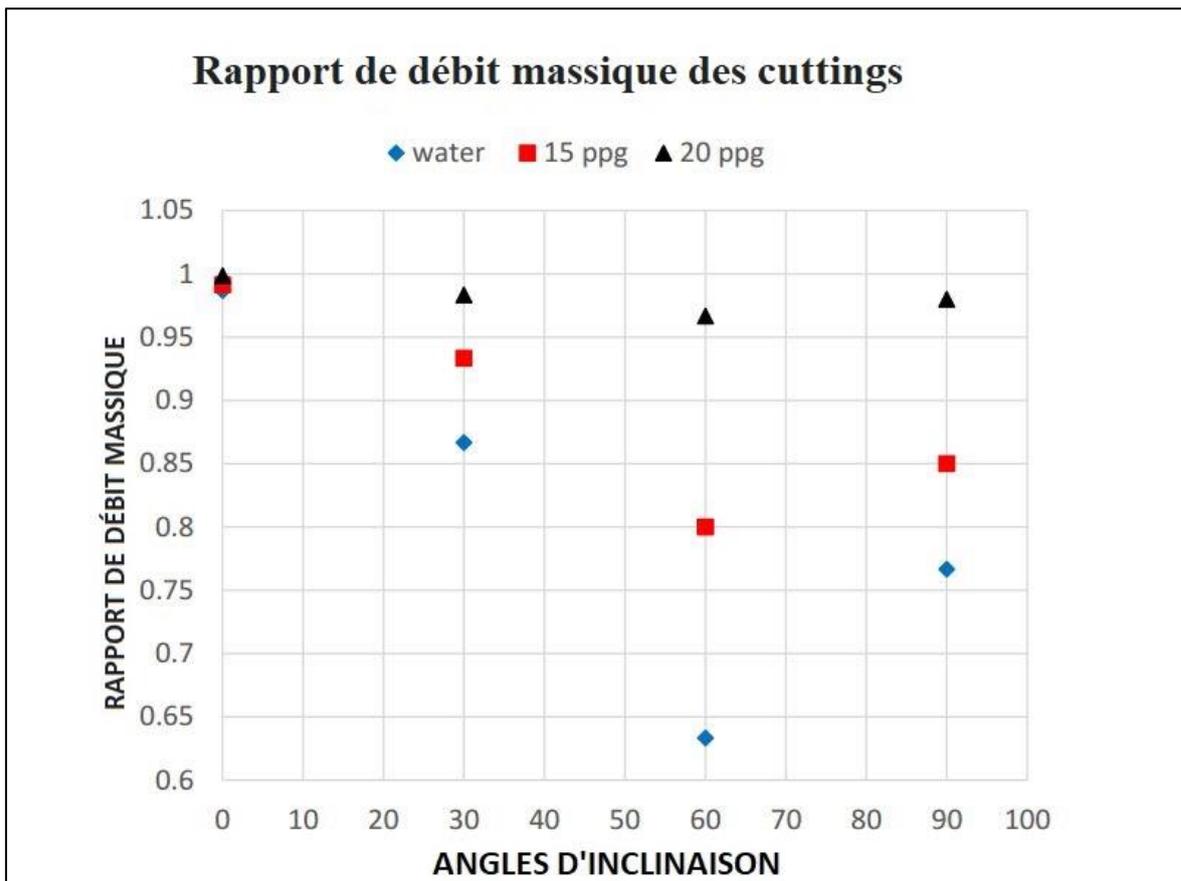


Figure IV-10. Taux de transport des cuttings (boue de forage)



**Figure IV-11.** Rapport de débit massique des cuttings (boue de forage)

Nous pouvons conclure des figures IV-10 et IV-11 que pour un poids de boue élevé, les performances de transport des cuttings sont toujours bonnes et légèrement affectées par le changement d'angle d'inclinaison. Les systèmes à faible poids de boue ont une réponse plus élevée au changement d'angle que les poids de boue plus élevés.

#### IV.4. Effet de rotation des tiges de forage

La rotation des tiges de forage est un paramètre très important qui influence les performances de transport des cuttings. On s'attend à ce que l'effet de rotation des tiges de forage soit plus important aux angles élevés.

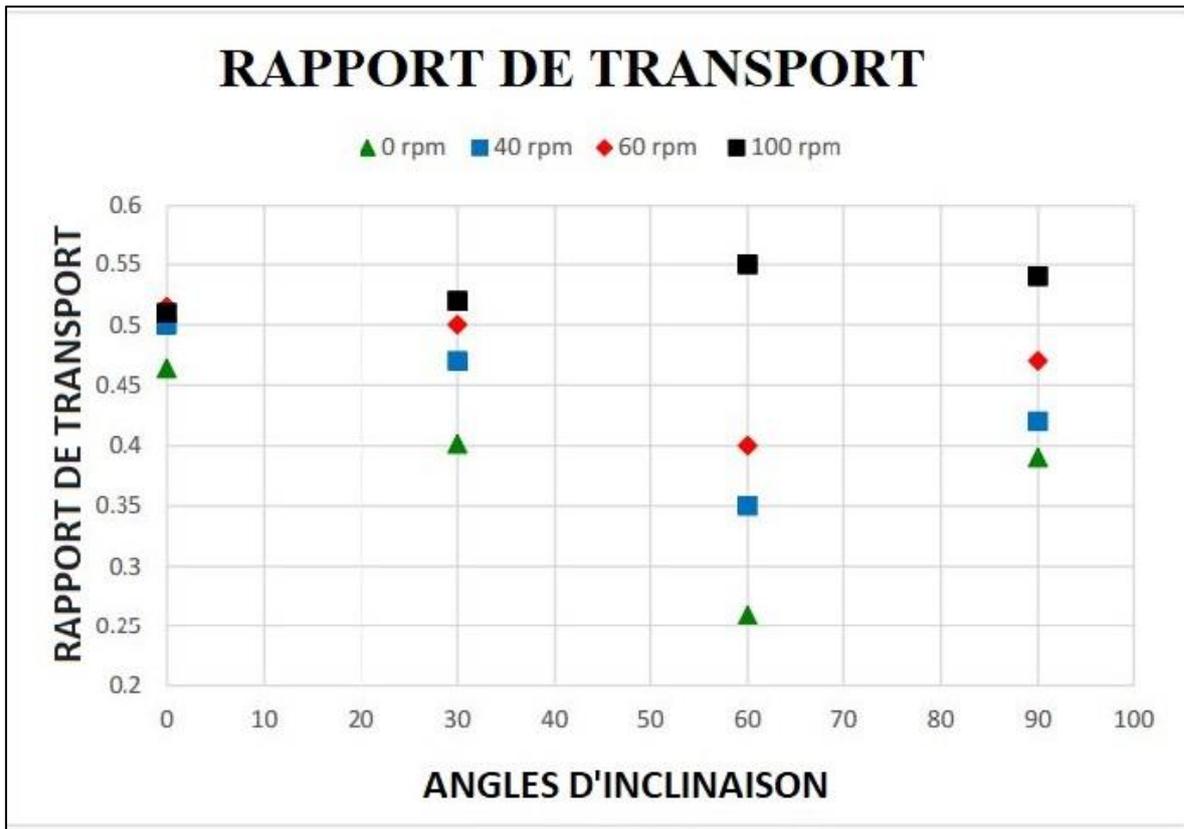


Figure IV-12. Rapport de transport des cuttings (rotation de la tige de forage)

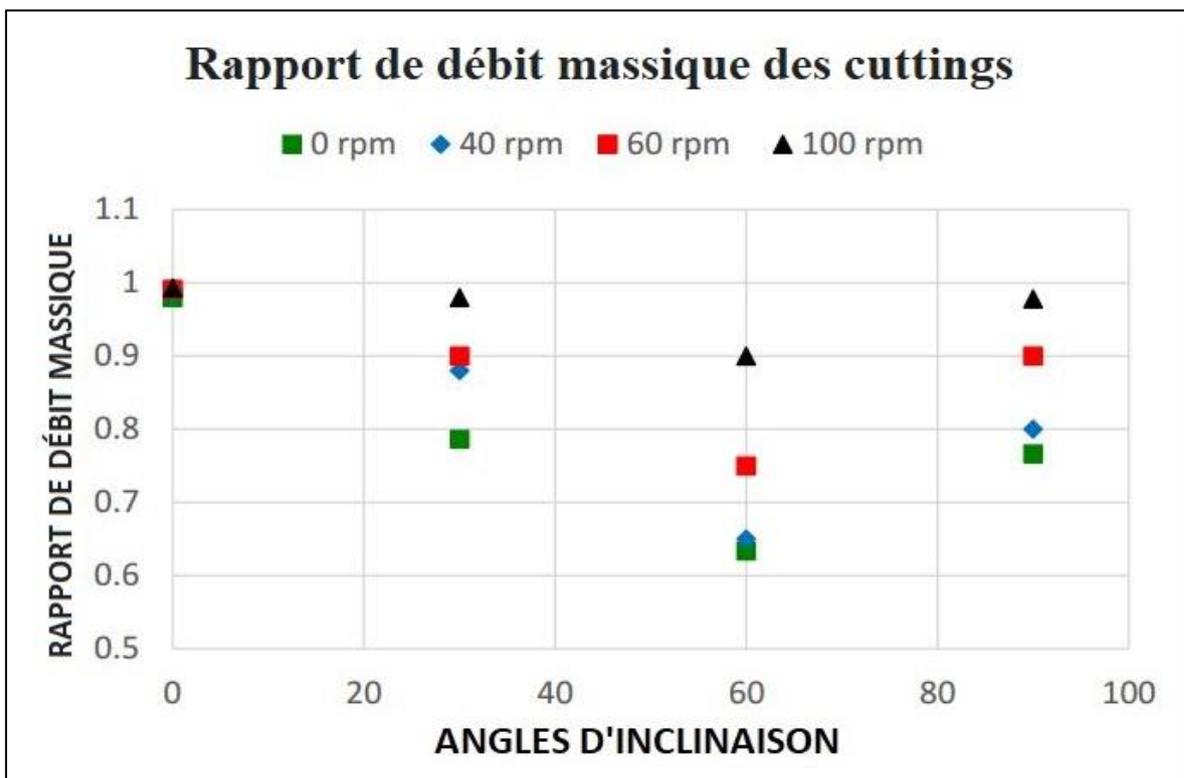


Figure IV-13. Rapport de débit massique des cuttings (rotation de la tige de forage)

À partir des figures IV-12 et IV-13, Lorsqu'il n'y a pas de rotation de tige de forage, la hauteur du lit de cuttings augmente à mesure que l'angle d'inclinaison augmente. Avec la rotation des tiges de forage, l'accumulation est entravée par la turbulence créée autour de l'anneau. La turbulence aide les cuttings à rester dans les régions à grande vitesse et aide également à ramasser les cuttings déposées. La modification des propriétés rhéologiques du fluide de forage peut rendre l'effet de la rotation des tiges de forage plus important. Si la rotation des tiges de forage a été mise en œuvre avec des boues de forage à haute viscosité, on s'attend à ce que les performances de transport des cuttings s'améliorent considérablement. Une viscosité accrue avec la rotation des tiges de forage aide les cuttings à rester en suspension.

#### **IV.5. Effet d'excentricité des tiges de forage**

L'excentricité a un effet significatif sur les performances de transport des cuttings. On pense que le transport des cuttings devient difficile à mesure que le degré d'excentricité augmente dans la direction négative. Si l'on regarde la figure II-1, par définition, la valeur d'excentricité devient négative à mesure que la tige de forage se rapproche de la face inférieure du tubage. L'excentricité positive se produit lorsque la tige de forage se déplace vers la face supérieure du boîtier. En réalité, le positif n'arrive jamais, mais il sera considéré à des fins de comparaison.

Les figures IV-14 et IV-15 montrent respectivement le rapport de transport des cuttings et le rapport de débit massique des cuttings.

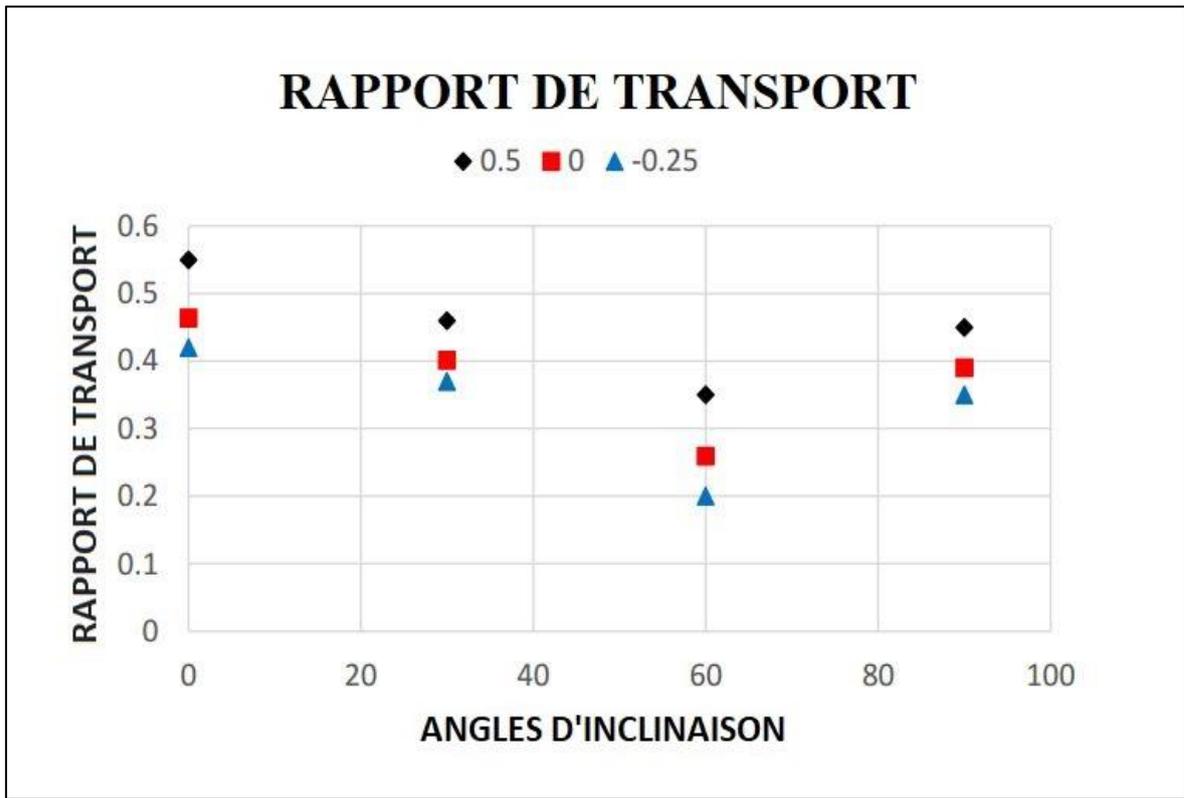


Figure IV-14. Rapport de transport des cuttings (excentricité de la tige de forage)

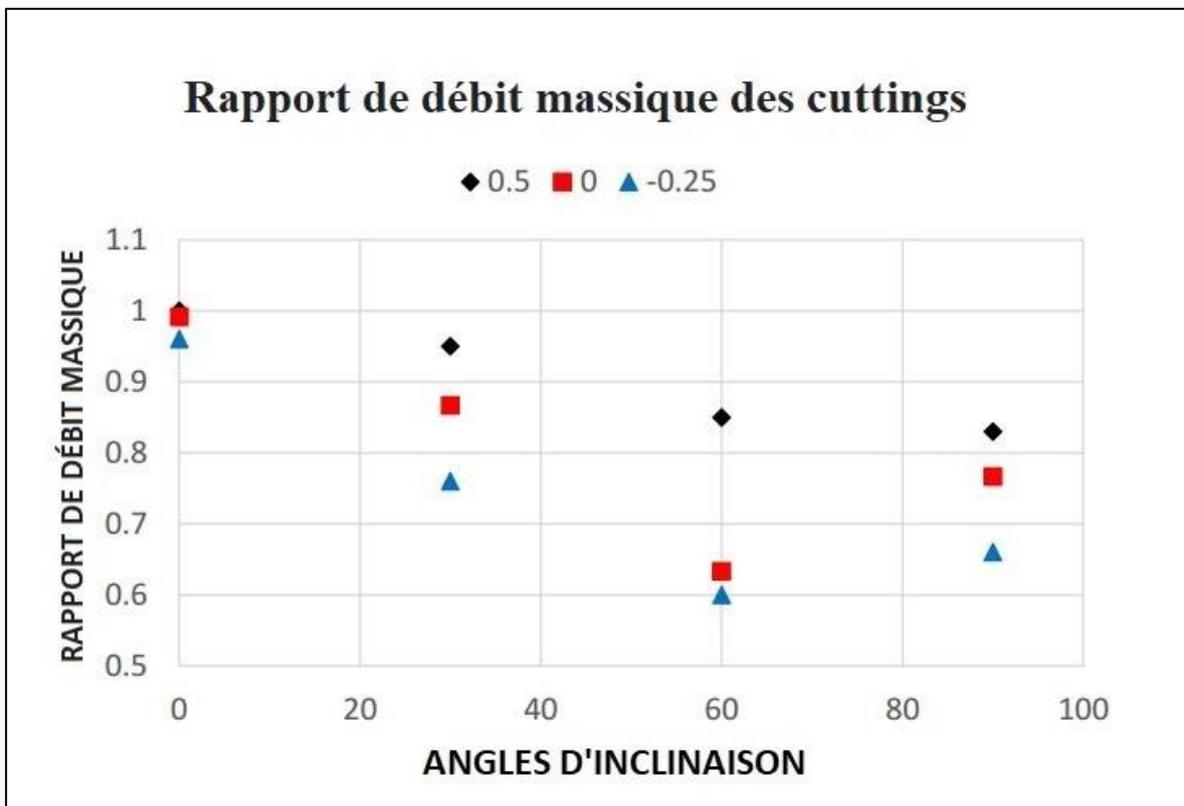


Figure IV-15. Rapport de débit massique des cuttings (excentricité de la tige de forage)

L'excentricité des tiges de forage affecte les profils de vitesse des cuttings et du fluide de forage. Comme mentionné précédemment, dans les tiges de forage positivement excentriques, la région à grande vitesse du fluide de forage existe directement au-dessus du lit de cuttings décantés. Cela augmente la vitesse de transport, et donc augmente le rapport de transport. C'est ce que montre la figure IV-14. Un rapport de transport plus élevé signifie de meilleures performances de transport des cuttings. Nous pouvons voir sur la figure IV-15 que le cas excentrique positif a un meilleur rapport de débit massique des cuttings pour tous les angles, et c'est en raison de la vitesse élevée du fluide de forage exerçant plus de traînée sur les cuttings.

#### IV.6. Effet de la Vitesse de Forage

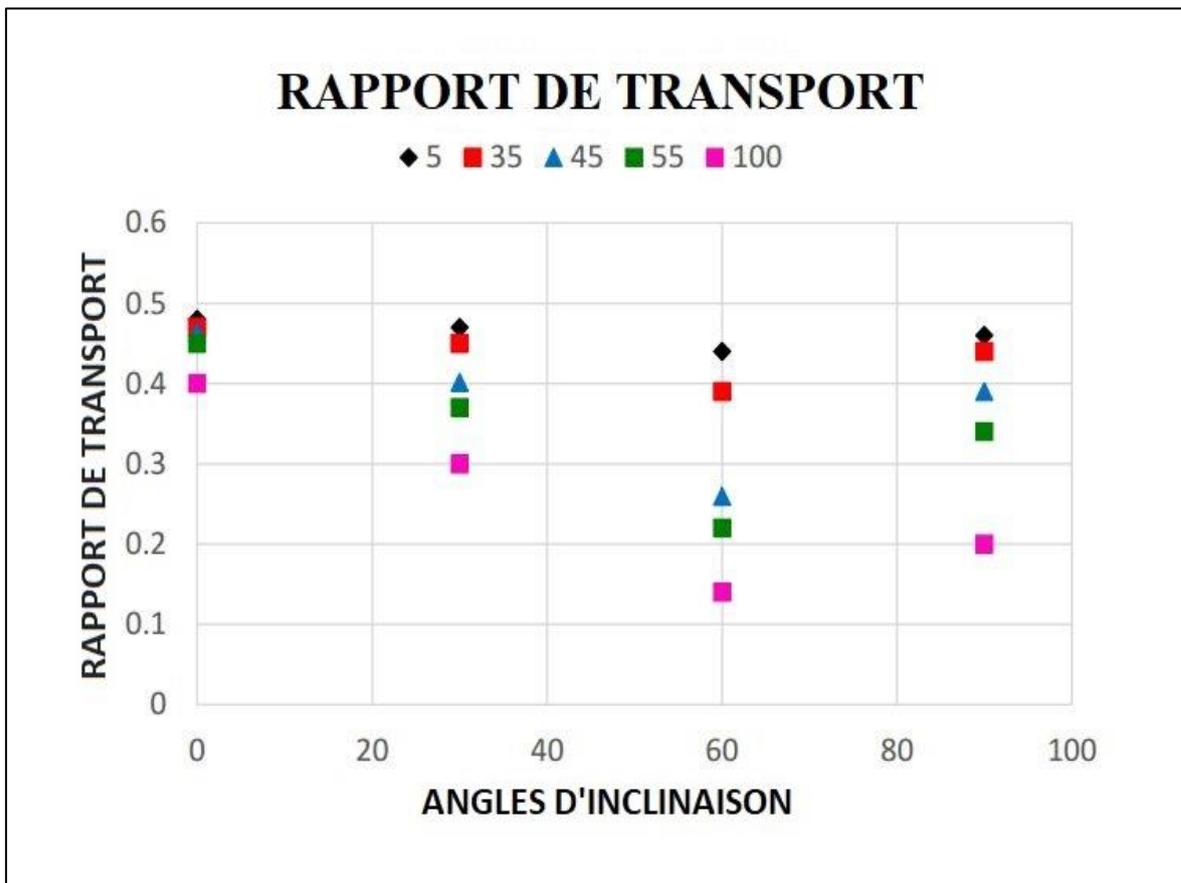
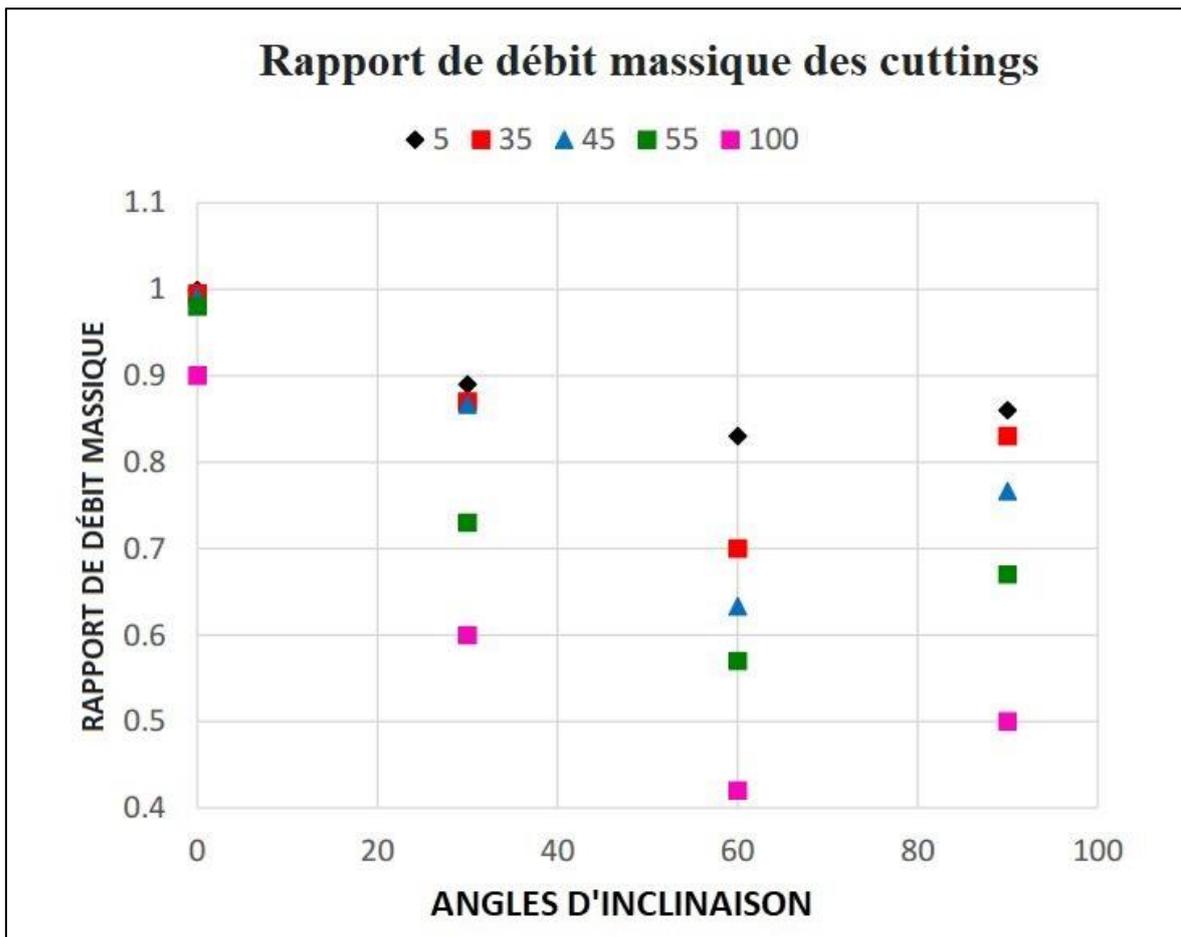


Figure IV-16. Rapport de transport des cuttings (le débit de forage)



**Figure IV-17.** Rapport de débit massique des cuttings (le débit de forage)

Les figures IV-16 et IV-17 montrent respectivement le rapport de transport et le rapport de débit massique des cuttings. D'après les deux figures ci-dessus, nous pouvons voir que lorsque l'angle d'inclinaison augmente de 0 à 60 degrés, l'effet de l'augmentation du taux de forage devient plus significatif. En outre, nous pouvons conclure des chiffres ci-dessus que l'effet de l'augmentation de la vitesse de forage devient moins significatif entre les angles de 60 à 100 degrés. C'est à cause des forces exercées sur les cuttings. À des angles très bas, la gravité tire les cuttings dans le trou. Avoir le bon taux de circulation peut fournir suffisamment de traînée dans les cuttings pour surmonter la force de gravité et améliorer les performances de transport des cuttings. Lorsque l'angle d'inclinaison augmente de 50 à 70 degrés, la force de gravité tire les cuttings vers les parois du tubage et le long du trou. Les cuttings accumulés sur les parois peuvent glisser dans le trou en raison de la composante gravitaire. C'est pourquoi la pire performance de transport des cuttings est dans ces angles d'inclinaison. À une inclinaison de 90 degrés, la gravité force simplement les cuttings à se déposer dans le tubage. Une combinaison de taux de

circulation plus élevés et de rotation des tiges de forage peut améliorer les performances de transport des cuttings dans ce cas.

#### IV.7. Effet du débit de circulation

Le taux de circulation est très essentiel dans l'opération de forage. C'est la principale force motrice qui transportait les cuttings et les ramassages déposés une fois du lit de cuttings accumulées. L'augmentation du taux de circulation améliore les performances de transport des cuttings. Les figures IV-18 et IV-19 montrent respectivement le rapport de transport et le rapport de débit massique des cuttings.

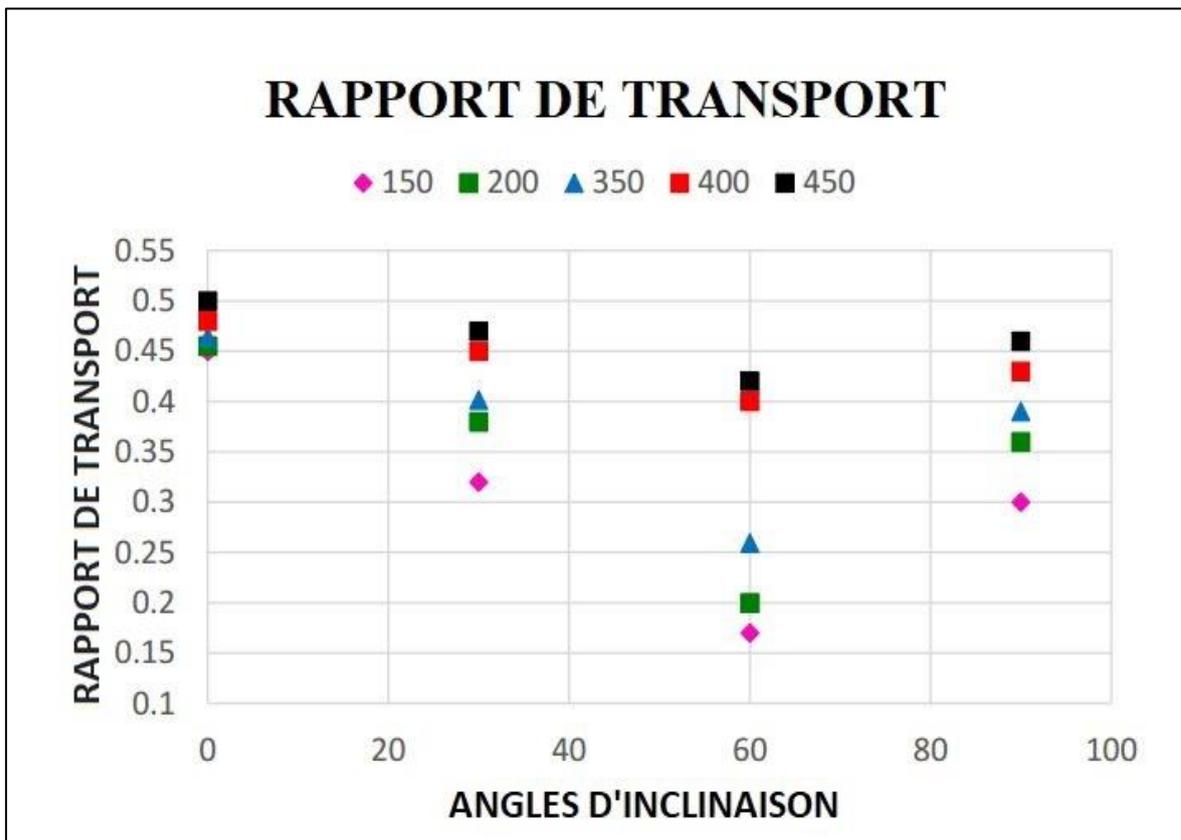


Figure IV-18. Taux de transport des cuttings (le débit de circulation)

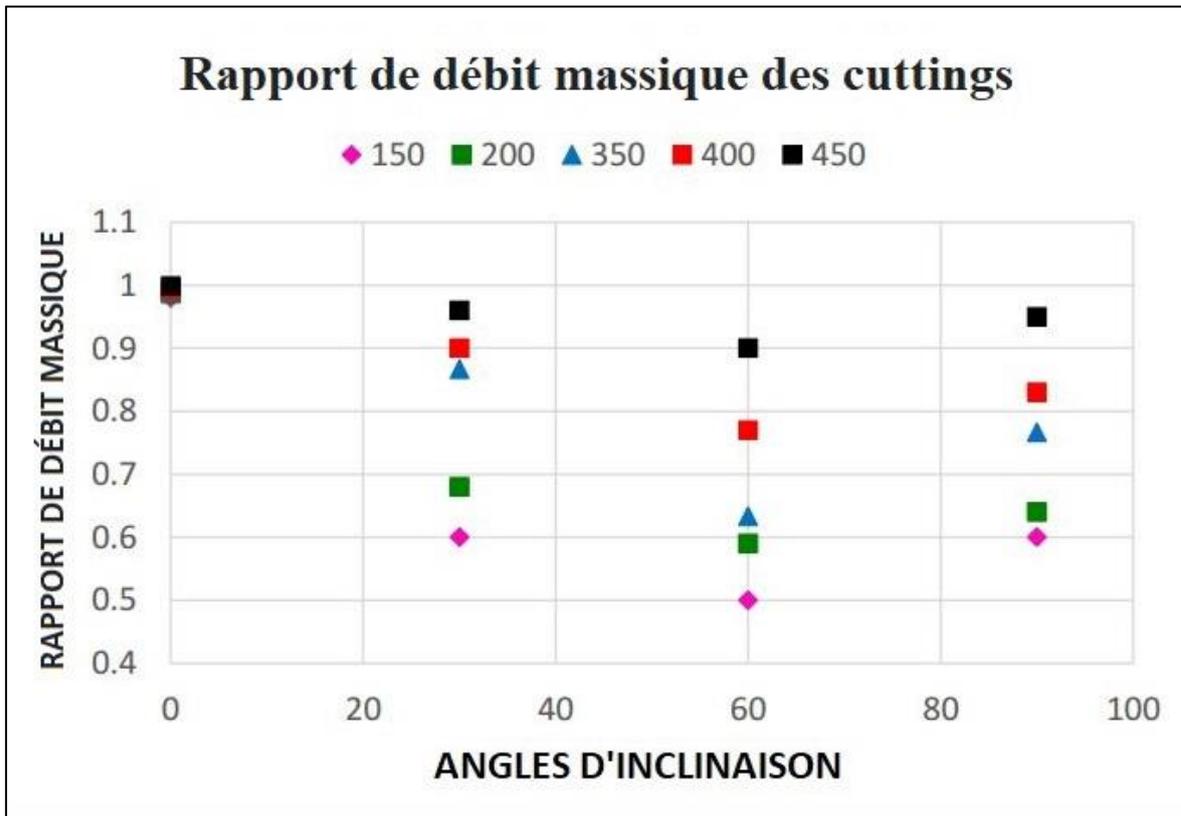


Figure IV-19. Rapport de débit massique des cuttings (le débit de circulation)

D'après l'équation I.2, nous pouvons affirmer avec confiance que lorsque le taux de circulation augmente, la vitesse de transport augmente. Une vitesse de transport plus élevée se traduit par un rapport de transport plus élevé, ce qui signifie de meilleures performances de transport des cuttings. Nous pouvons voir l'effet de l'augmentation du taux de circulation sur le rapport de transport dans la figure IV-18. L'effet de l'augmentation du taux de circulation est le plus significatif à un angle de 60 degrés. La figure IV-19 montre que l'augmentation du taux de circulation se traduit par un rapport de débit massique des cuttings plus élevé et, par conséquent, une meilleure performance de transport des cuttings.

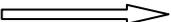
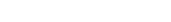
À des angles d'inclinaison très faibles, l'augmentation du taux de circulation n'améliorera pas de manière significative les performances de transport des cuttings.

## CONCLUSION

De l'étude paramétrique, les conclusions suivantes ont été tirées :

1. Pour tous les paramètres étudiés, l'effet sur les performances de transport des cuttings est très négligeable pour le puits vertical.
2. Dans tous les cas, un angle de 60 degrés entraîne la pire performance de transport de cuttings. Les angles de 30 degrés et 90 degrés avaient un transport de cuttings similaire.
3. Pour les paramètres suivants : (1) Densité des cuttings, (2) Taille des cuttings et (3) taux de forage ; une relation directe avec la fraction volumique des cuttings existe.
4. Pour les paramètres suivants : (1) poids de la boue, (2) vitesse de rotation et (3) taux de circulation; une relation inverse avec la fraction volumique des cuttings existe.
5. L'excentricité négative entraîne des fractions volumiques significativement élevées.
6. L'excentricité positive améliore les performances de transport des cuttings, même si elle n'arrive jamais dans la réalité.

Le degré d'effet de chaque paramètre sur les performances de transport des cuttings est différent. Les paramètres et leur effet sur les performances de transport des cuttings sont :

<b>Densité des cuttings (g/cc)</b>		Modérée
<b>Taille des cuttings (in)</b>		Modérée
<b>Fluide de forage (ppg)</b>		Haut
<b>Vitesse de rotation (RPM)</b>		Élevé à des angles d'inclinaison élevés
<b>Excentricité</b>		Haut
<b>vitesse d'avancement (ft/hr)</b>		Haut
<b>le débit de circulation (gpm)</b>		Haut
<b>Inclinaison (degrés)</b>		Haut

Les ingénieurs de forage peuvent utiliser ce modèle numérique pour avoir un aperçu des cuttings attendus performances des transports. En outre, les performances de transport des cuttings peuvent être optimisées en utilisant de tels modèles. Par exemple, si le type de lithologie et l'angle d'inclinaison sont connus, l'ingénieur de forage peut choisir le bon système de boue, la vitesse de rotation, le taux de forage et le taux de circulation qui assure une bonne performance de transport des cuttings. Si un puits horizontal est envisagé et que le forage se déroule dans le calcaire, les paramètres de forage suivants seront suffisants pour une bonne performance de transport des cuttings :

- Poids de la boue : 15 à 17 ppg
- Vitesse de rotation : 60 tr/min
- Taux de forage : 35 ft/hr
- Taux de circulation : 450 gpm

L'utilisation des paramètres ci-dessus donnera un rapport de débit massique de 0,9.

## Bibliographie

- [1] Emmanuel I. Epelle , Winifred Obande , Jude A. Okolie , Tabbi Wilberforce Dimitrios I. Gerogiorgis. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity. *Journal of Petroleum Science and Engineering* Volume 208, Part E, January 2022, 109795
- [2] Rawia Abd El Gadir El Tahir El Tilib, Investigation on the Particles Transport in Horizontal Well Drilling, Master Thesis, Universiti Teknologi Petronas, Perak JULY 2010
- [3] Erhamah Alsuwaidi , Cutting Transport Analysis in Horizontal Wells: A Computational Approach, Master Thesis, The Pennsylvania State University, May 2018
- [4] Armstrong Lee Agbaji , Development of an Algorithm to Analyze the Interrelationship Among Five Elements involved in The Planning, Design and Drilling of Extended Reach and Complex Wells. Master Thesis, the Pennsylvania State University, May 2009
- [5] Husameldin Mahmoud , Ahmed Hamza , Mustafa S. Nasser , Ibnelwaleed A. Hussein , Ramadan Ahmed , Hamidreza Karam. Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive review. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 186 (2020) 106748
- [6] Tresor Sonwa Lontsi. Evaluation and comparison of drilling parameters and hardware used to improve cuttings transport and limit the thickness of cuttings accumulations in high angle and horizontal well bore sections. MASTER THESIS, the Department of Mineral Resources and Petroleum Engineering, June 2008/ Austri
- [7] Doguhan yilmaz, Discrete phase simulations of drilled cuttings transport process in highly deviated wells, Master thesis, B.S., Istanbul Technical University, Turkey, 2007 May 2012
- [8] Alireza Zakeri, Computer Simulation of Bottom Hole Cleaning in Oil-Well Drilling operations, Doctor of Philosophy, School of Chemical and Process Engineering University of Leeds, August 2021
- [9] Chey Wan Sin, Hole Cleaning Analysis for Underbalanced Drilling by Using Landmark, the bachelor of engineering (Hons), Universiti Teknologi Petronas, May 2012
- [10] Akrong Joseph Annung, Effect of pipe eccentricity on hole cleaning and wellbore hydraulics, Master thesis, African University of Science and Technology, Abuja, Nigeria December, 2010
- [11] Mohammad Mojammel Huque, Systematic Investigation of Cuttings Transport Behavior in Horizontal and Inclined Drilling Operation, Memorial University of Newfoundland, Canada, Doctor of Philosophy, May 2022

- [12] Tham Keat Fu, Computational Fluid Dynamics Simulation For Cuttings-Liquid Flow Through Horizontal Eccentric Annuli, the bachelor of engineering (Hons), Universiti Teknologi Petronas, May 2012
- [13] Stefan Heinerman, Design and Experiment Concept of a Cutting Transport Simulation Apparatus for Solid Shape Investigation, Master thesis, Montanuniversität Leoben
- [14] Sanchez, R. A., Azar, J. J., Bassal, A. A., & Martins, A. L. (1999). Effect of Drillpipe Rotation on Hole Cleaning During Directional-Well Drilling. SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: SPE.
- [15] Jude Chibuike Egbue, Improving, The Efficiency Of Transportation Of Cuttings In Wellbore, Norwegian University of Science and Technology, July 2017
- [16] Larsen, T. I., Pilehvari, A. A., & Azar, J. J. Development of a New Cuttings Transport Model for High Angle Wellbores Including Horizontal Wells. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: SPE. 1993
- [17] Chien, S. 1994. Settling Velocity of Irregularly Shaped Particle. SPE Drilling & Completion 9 (4): 281—289. SPE-26121-PA
- [18] Richardson, J.F. and Zaki, W.N., 1954, “Sedimentation and Fluidisation”, Trans. Inst. Chem. Eng., 32, pp. 35-53
- [19] Dey S, Ali SZ, Padhi E. 2019 Terminal fall velocity: the legacy of Stokes from the perspective of fluvial hydraulics. Proc. R. Soc. A 475: 20190277.
- [19] Tomren, P.H., Iyoho, A.W., and Azar, J.J. 1986. Experimental Study of Cuttings Transport in Directional Wells. SPE Drilling & Engineering 1 (1). SPE-12123-PA
- [20] ANSYS Inc, I.N.C. 2009. ANSYS FLUENT 12.0 User’s Guide
- [21] ANSYS Inc, 2009, ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide