

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique
Laboratoire de Recherche Science de l'Eau /SLB Algérie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Hydraulique

Nettoyage des trous des forages directionnels

BEDDIAF Rofaïda Chaïma

Sous la direction de

Dr **CHETIBI Meriem** et **IKHLEF KHAOULA** ENP

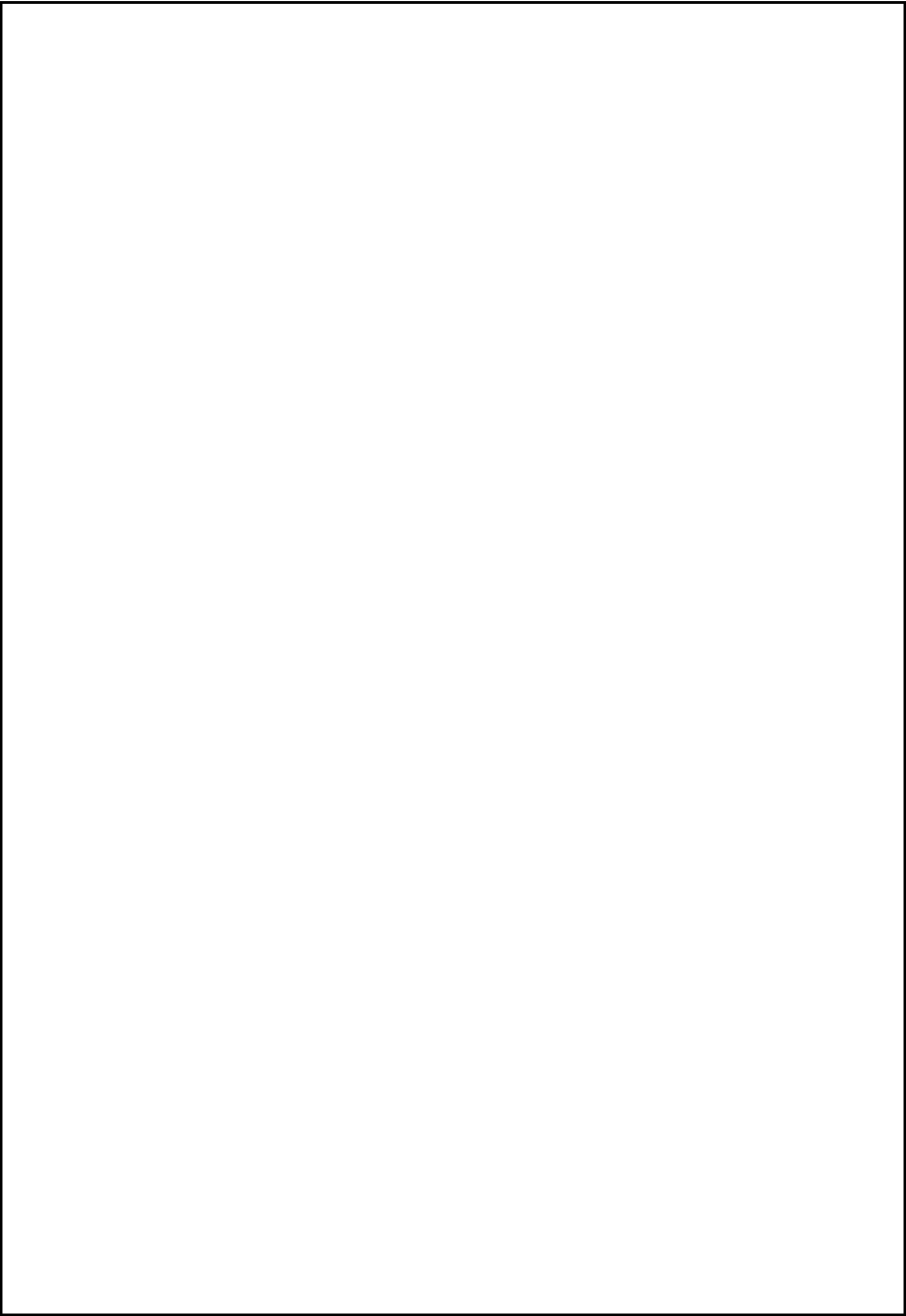
Mr **Amine BOUBEKRI** North Africa Well Construction Fluids Legacy

Présentée et soutenue publiquement le (14/10/2025)

Composition du Jury :

Présidente	Mme Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteurs	Mme Meriem CHETIBI	MCB	ENP
	Mme Khaoula IKHLEF	MCA	ENP
	Mr Amine BOUBEKRI	Ingénieur North Africa	Schlumberger
		Well Construction Fluids Legacy	
Examineur	Mr Salim BENZIADA	MAA	ENP

ENP 2025





Département d'Hydraulique

Laboratoire de Recherche Science de l'Eau /SLB Algérie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Hydraulique

Nettoyage des trous des forages directionnels

BEDDIAF Rofaïda Chaïma

Sous la direction de

Dr CHITIBI Meriem et IKHLEF KHAOULA ENP

Mr Amine BOUBEKRI North Africa Well Construction Fluids Legacy

Présentée et soutenue publiquement le (14/10/2025)

Composition du Jury :

Présidente	Mme Saâdia BENMAMAR	Professeur	ENP
Promoteurs	Mme Meriem CHETIBI	MCB	ENP
	Mme Khaoula IKHLEF	MCA	ENP
	Mr Amine BOUBEKRI	Ingénieur North Africa	Schlumberger
		Well Construction Fluids Legacy	
Examineur	Mr Salim BENZIADA	MAA	ENP

ملخص

هدف هذا المشروع هو تحليل التحديات التي نواجهها أثناء حفر الآبار الاتجاهية، والتي غالبًا ما تكون ضرورية في بعض الحالات مثل إعادة التوجيه الجانبي أو لضمان إنتاجية مثلى. تمثل هذه الآبار تحديات كبيرة بسبب ارتفاع زوايا الميلان، التي غالبًا ما تتجاوز 30 درجة، مما يعقد تنظيف الحفرة بين الأقسام المختلفة، خصوصًا عندما تكون الأقسام أضيق. مما يؤثر ويسبب خسائر في الضغط المشكلات على أنظمة التدفق، وكثافة الدوران المعادلة

هذه الرسالة العلمية منقسمة على جزأين: الفصل الأول يشرح حفر الآبار الاتجاهية بالإضافة إلى المفاهيم المتعلقة بتنظيف الحفرة، بما في ذلك المعادلات الأساسية. أما الجزء الثاني فيقدم محاكاة باستخدام برنامج حسابي للتحقق من تنظيف الحفرة للآبار وبرنامج "الهيدروليك الافتراضية" الذي يقارن بين بئر محفور بطريقة اتجاهية والحالة التي كان سيُحفر فيها بشكل عمودي. ويتضمن أيضاً دراسة لبئر اتجاهي آخر ذو زوايا ميل أعلى، مما يحل التحديات الخاصة التي ترتبط بهذه التكوينات الأكثر تعقيداً.

كلمات مفتاحية: الحفر الاتجاهي، تنظيف الحفرة، سائل الحفر، علم اللزوجة (رهيولوجيا)، الهيدروليك الافتراضية، المحاكاة.

Abstract

The purpose of this PFE is to analyse the challenges encountered during the drilling of directional wells, which are often required in certain situations such as sidetracking or to ensure optimal production. These wells pose significant challenges due to the high inclination angles, often exceeding 30°, which complicates hole cleaning between different sections, especially when the sections are narrower. These issues affect flow regimes, Equivalent Circulation Density (ECD), and cause pressure losses.

This work is structured in two parts: the first part explains the drilling of directional wells as well as the concepts related to hole cleaning, including the fundamental equations. The second part presents simulations carried out with a calculation code to validate hole cleaning in wells, as well as simulations with "Virtual Hydraulics" to compare a well drilled directionally with the case where it would have been drilled vertically. It also includes the study of another directional well with higher inclination angles, thus analyzing the specific challenges related to these more complex configurations.

Key words: Directional drilling, hole cleaning, drilling mud, rheology, virtual hydraulics, simulation.

Résumé

Le but de ce PFE est d'analyser les défis rencontrés lors du forage des puits directionnels, qui sont souvent nécessaires dans certaines situations comme le sidetracking ou pour assurer une production optimale. Ces puits représentent des défis importants en raison des angles d'inclinaison élevés, souvent supérieurs à 30°, ce qui complique le nettoyage du trou entre les différentes sections, surtout quand les sections sont plus étroites. Ces problématiques affectent les régimes d'écoulement, densité de circulation équivalente (ECD) et engendrent des pertes de pression

Ce mémoire est structuré en deux parties : la première partie explique le forage des puits directionnels ainsi que les concepts liés au nettoyage du trou, incluant les équations fondamentales. La seconde partie présente des simulations réalisées avec un code de calcul pour valider le nettoyage de trou dans les puits, ainsi que des simulations avec « Virtual Hydraulics », pour comparer un puits foré en directionnel avec le cas où il aurait été foré verticalement. Il inclut également l'étude d'un autre puits directionnel présentant des angles d'inclinaison plus élevés, analysant ainsi les défis spécifiques liés à ces configurations plus complexes.

Mots clés : forage directionnel, Nettoyage de trous, Fluide de forage, Rhéologie, Hydraulique virtuelle, Simulation.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à mes parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu depuis mon plus jeune âge. Je leur serai éternellement reconnaissante pour leurs sacrifices, pour avoir toujours été à mes côtés à chaque étape de mon parcours, pour avoir célébré chacun de mes succès avec moi, ainsi que pour leurs conseils et leur précieuse orientation. Puisse-je toujours rester digne de leur fierté.

À ma sœur, ma seconde mère et ma meilleure amie pour la vie, je te suis profondément reconnaissante d'avoir toujours été à mes côtés quand j'avais besoin de toi. Merci d'avoir toujours soutenu mes choix, de m'avoir protégée et encouragée dans chaque épreuve, et de partager avec moi chaque moment de joie. Ton amour, ta force et ta présence sont un trésor inestimable, et je chéris le lien unique qui nous unit.

À mon frère, ma seconde figure paternelle, mon idole, je te suis infiniment reconnaissant pour tout ce que tu as fait pour moi depuis notre enfance. Merci pour tes conseils, ton orientation, ton encouragement constant, et surtout pour les sacrifices que tu as accomplis pour moi, qui ne seront jamais oubliés. Je suis fier de t'avoir comme modèle dans la vie.

En mémoire de mes grands-parents maternels, j'aurais tant souhaité que vous soyez là pour ce moment. Je chérirai toujours les souvenirs joyeux que nous avons partagés. Vous vivez encore, à jamais, dans mes pensées et mon cœur.

À mes chers amis rencontrés au fil des années, à mes meilleures amies d'enfance Amina et Neyla, ainsi qu'à toutes les amitiés précieuses que j'ai eu la chance de partager.

À tous mes amis, des deux années préparatoires à l'ESSA-Alger et de la promotion Hydraulique 2025 sans oublier ma chère amie Dalia pour le soutien moral, je vous remercie pour tous les bons moments que nous avons partagés ensemble.

Remercîment

J'exprime ma gratitude envers Allah, le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui m'a accordé la force et la patience tout au long de ma vie jusqu'à ce moment, indispensables pour accomplir ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Madame la Professeure **Saâdia Benmamar** pour tout ce que j'ai appris auprès d'elle durant ces trois dernières années, pour ses précieux conseils, sa guidance constante et ses encouragements tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Mohamed Said Si Abderrahmane** pour son approche humble et accessible, ainsi que pour l'opportunité inestimable qu'il m'a été offerte de réaliser ce stage chez SLB. Cette expérience m'a permis de travailler dans le domaine qui me passionne et d'acquérir une expérience précieuse que je chérirai toujours.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **Amine Boubekri**, mon encadreur, pour sa patience, sa gentillesse et son approche toujours accessible. Il a su expliquer avec clarté chaque détail, répondre à toutes mes questions, et m'a offert un soutien constant tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils précieux et sa bienveillance ont grandement contribué à ma progression et à la réussite de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes promotrices, Mesdames **Meriem Chetibi** et **Khaoula Ikhlef**, pour leur précieuse aide et leur accompagnement tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux ingénieurs de SLB sur le terrain qui m'ont offert l'opportunité de découvrir en temps réel leur travail et leur coordination. Leur gentillesse, leur modestie et tout ce qu'ils m'ont appris ont été d'une grande valeur pour moi.

Je tiens à adresser ma profonde reconnaissance à l'ensemble du personnel de SLB pour leur précieuse aide et pour avoir assuré une excellente coordination tout au long de mon stage. Je remercie tout particulièrement Madame **Asma Chekroune**, Monsieur **Abderrahmane Bouchebbat**, Monsieur **Aymen Hamdi** et Madame **Jihen Baati** pour leur soutien constant, leur disponibilité et la qualité du travail qu'ils ont accompli à mon égard.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à tous les enseignants qui ont accompagné mon parcours universitaires ENSTA (ex-ESSA-Alger) et ENP . Merci pour tout ce qu'ils m'ont appris .

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des membres du jury, notamment **Mr Salim Benziada** , pour le temps précieux qu'il a consacré à évaluer mon modeste travail.

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Les tableaux de conversion	
Introduction générale	18

PARTIE I

PARTIE THEORIQUE : SUR LES FORAGES DIRIGES ET NETTOYAGE DU TROU

1. CHAPITRES 1 : LES FORAGES DIRECTIONNELS

1.1 INTRODUCTION	23
1.2. DEFINITION DES FORAGES.....	23
1.3. LES TYPES DE FORAGES.....	23
1.3.1. LES FORAGES VERTICAUX	23
1.3.2. LES FORAGES HORIZONTAUX	24
1.3.3 LES FORAGES DIRIGES	28
1.5CONCLUSION.....	36

2 CHAPITRE 2 : CONCEPTION DES PUIITS DIRIGES

2.1 INTRODUCTION	38
2.1 LA SECTION VERTICALE	38
2.1.1 DEBUT DE FORAGE	38
2.1.2 INSERTION DES TUBAGES	38
2.1.3 ASPIRATION DES DEBRIS.....	39
2.1.4 LA CIMENTATION.....	39
2.2 LA SECTION DIRECTIONNELLE	40
2.2.1 LES OUTILS DE DEVIATION	40
2.3 LA BOUE DE FORAGE.....	42
2.4 CONTROLE DU PUIITS	42
2.4.1 MESURE DURANT LE FORAGE (MWD)	42
2.4.2 LA DIAGRAPHIE EN COURS DE FORAGE (LWD).....	43
2.4.3 SEVERITE DU COUDE DE FORAGE (DLS).....	43
2.4.4 OBTURATEUR DE TETE DE PUIITS (BLOW OUT PREVENTER, BOP).....	43
2.4.5 LIGNE DE REGULATION (CHOKE LINE)	44
2.4.6 KILL LINE	44

Table de matières

2.5 LES FORCES DANS LES PUITES DIRIGES.....	44
2.5.1 COUPLE ET TRAINEE.....	45
2.5.2 FORCE DE GONFLEMENT (BALLOONING)	45
2.6 LES PERTES DE CHARGES	46
2.6.1. FLUIDES NEWTONIENS	46
2.6.2. FLUIDES NON NEWTONIENS	47
2.7 DEFIN DES PUITES DIRIGES.....	48
2.7.1 CAS D'APPLICATION	49
2.7.2 LE DEFIN DU CAS D'APPLICATION	49
2.7.3 L'OBJECTIF DE CE MEMOIRE.....	50
2.8 CONCLUSION	50
 3. CHAPITRE 3 : NETTOYAGE DU TROU DES PUITES DIRIGES	
3.1 INTRODUCTION	52
3.2 NETTOYAGE DU TROU.....	53
3.2.1 LES FORCES SUR LES DEBRIS.....	53
3.2.2 LES VITESSES.....	53
3.2.3 INDICE DE NETTOYAGE	55
3.2.4 LA BOUE DE FORAGE.....	56
3.2.5 RESISTANCE DU GEL	57
3.2.6 VISCOSITE.....	57
3.2.7 MODE DE FORAGE	62
3.2.8 TAILLE DES DEBRIS	63
3.2.9 INCLINAISON DU PUITES.....	63
3.2.10 MECANISME DE DEPOT DES DEBRIS.....	64
3.2.11 DENSITE DE CIRCULATION EQUIVALENTE (ECD)	65
3.3 LES PRESSIONS	66
3.3.1 LA PRESSION HYDROSTATIQUE	66
3.3.2 LA PRESSION DES PORES	67
3.3.3 PRESSION DE FRACTURATION	68
3.4 TUBE U	68
3.5 CONCLUSION	69

PARTIE II

PARTIE PRATIQUE : SUR LES SIMULATIONS DU NETTOYAGE DES TROUS DES
PUITS W1 ET W2

CHAPITRE 4 : SIMULATION DU NETTOYAGE DE TROUS DES Puits PAR UN CODE DE CALCUL
DEVELOPPE

4.1 INTRODUCTION	72
4.2 INTERFACE DU CODE	72
4.3 SIMULATION DU Puits W1.....	74
4.3.1 VISUALISATION DE FORMATION	74
4.3.2 TRAJECTOIRE DU Puits	77
4.3.3 LES TUBAGES DU Puits	77
4.3.4 LA BOUE DE FORAGE.....	78
4.3.5 LA RHEOLOGIE DE LA BOUE	80
4.3.6 LA VITESSE DANS L'ANNULAIRE	82
4.3.7 LA VITESSE DE GLISSEMENT	82
4.3.8 LA CONCENTRATION DES DEBRIS ET POURCENTAGE DE LEURS TRANSPORT	83
4.3.9 CALCUL DES PRESSIONS	84
4.3.10 LES SIMULATIONS DU NETTOYAGE DE TROUS DU Puits W1	87
4.3.11 LES SIMULATIONS DU NETTOYAGE DE TROU DU Puits W2.....	90
4.4 CONCLUSION	93

5. CHAPITRE 5 : SIMULATION DU NETTOYAGE DE TROUS DES Puits PAR LE LOGICIEL
VIRTUEL HYDRAULICS (VH)

5.1 INTRODUCTION	96
5.2PRESENTATION DE L'OUTIL VIRTUAL HYDRAULIQUE.....	96
5.3SIMULATION DU Puits W1	97
5.3.1 CAS D'UN Puits VERTICAL.....	98
5.3.2 SIMULATION DU NETTOYAGE DE TROUS DU Puits DIRECTIONNEL W1	112
5.4 SIMULATION DU NETTOYAGE DE TROUS DU Puits DIRECTIONNEL W2	119
5.4.1 2 ^{EME} SECTION DU Puits DIRECTIONNEL W2.....	120
5.4.2 3 ^{EME} SECTION DU Puits DIRECTIONNEL W2.....	122
5.4.3 DERNIERE SECTION DU Puits DIRECTIONNEL W2	122
5.4.4 CONCLUSION GENERALE DU Puits DIRECTIONNEL W2	127
5.5 COMPARAISON DES SIMULATIONS	127
5.5.1 LE Puits DIRECTIONNEL W1	127
5.5.2 LE Puits DIRECTIONNEL W2	133

Table de matières

5.6. OPTIMISATION DU NETTOYAGE DE TROUS	137
5.6.3 APPLICATION DES RECOMMANDATIONS.....	140
5.7. CONCLUSION.....	142
CONCLUSION GENERALE	144
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	147
L'ANNEXE	144

Confidentielle