



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE DE KASDI MERBAH OUARGLA

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme Master

Option : Forage

Thème

***Simulation d'un nettoyage de fond du trou lors
d'un forage pétrolier***

Présenté Par : BEN FERDJALLAH Ayoub

KHENNICHE Ahmed

REDOUANI Seyf eddine

Soutenu publiquement le 17/06/2019

Devant le jury :

Mr. ABIDI SAAD Aissa	MCA	UKM Ouargla	Président.
Mr. HADJAB Riad	MCB	UKM Ouargla	Examineur.
Mme. HADJADJ Souad	MAA	UKM Ouargla	Encadreur.

Année Universitaire : 2018/2019

L'objectif de ce travail est l'étude numérique par simulation, du comportement de fluide de forage lors d'une opération de nettoyage d'un trou, vis-à-vis la pression et la température exercées lors de son écoulement, ce travail consiste deux cas, le premier concerne l'écoulement à l'intérieure de la garniture et le deuxième est au niveau de l'espace annulaire.

En plan, les modèles étudiés, simulent à un écoulement turbulent en convection forcée, de Poiseuille verticales et de couette, lorsque la garniture se met en rotation. En utilisant deux types des fluides de forage : l'eau, de type newtonien et la boue à base d'eau, de type non-newtonien.

Cette étude a été réalisée par le solveur ANSYS-Fluent 17.0 pour résoudre les équations gouvernantes (équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie, de taux de dissipation d'énergie cinétique et de l'énergie cinétique) par la méthode numérique des volumes finis.

Les résultats obtenus ont confirmé l'utilité de rotation de garniture (dit forage en rotary) pour effectuer un bon nettoyage de trou.

Mots clés: Nettoyage de trou, vitesse de rotation, méthode des volumes finis, approche k- ϵ , écoulement de couette.

The objective of this work is study numerically the behavior of drilling fluid during a hole cleaning operation under the surrounding condition of pressure and temperature. This work consists of two cases, the first concerns the flow inside the drill string and the second is at the level of the annulus.

The studied models simulate a turbulent flow in forced convection, vertical Poiseuille and Couette flow, when drill string is rotated. Using two types of drilling fluids: water, Newtonian type and water-based mud, non-Newtonian type.

This study was carried out by the solver ANSYS-Fluent 17.0 to solve the governing equations (equations of continuity, momentum, energy, kinetic energy dissipation rate and kinetic energy) by finite volume method.

The results obtained confirmed the usefulness of drilling string (called rotary drilling) to perform a good hole cleaning.

Key words: Hole cleaning, rotational speed, finite volume method, k- ϵ approach, Couette flow.

الهدف من هذه الدراسة ، المحاكاة العددية لسلوك مائع الحفر أثناء عملية تنظيف قاع البئر، تحت الضغط ودرجة الحرارة المحيطة به وفق حالتين ، الأولى داخل ماسورة الحفر والثانية على مستوى التجويف الموجود بين الماسورة وجدار البئر.

تمت دراسة نماذج محاكاة جريان مضطرب بحمل حراري جبري، مماثلة لجريان Poiseuille و Couette عند تدوير ماسورة الحفر ، باستخدام نوعين من سوائل الحفر: الماء (نيوتوني) وطين الحفر (لا نيوتوني). تم استعمال برنامج ANSYS-Fluent 17.0 لحل المعادلات (معادلات الاستمرارية والحركة والطاقة ومعدل تبديد الطاقة الحركية والطاقة الحركية) بواسطة الطريقة العددية للحجوم المحدودة. النتائج المتحصل عليها أكدت أن دوران ماسورة الحفر (ما يسمى الحفر بالدوران الرحوي) تعد الطريقة الأفضل للتنظيف الجيد للتجويف.

الكلمات المفتاحية: تنظيف الثقب ، السرعة الدورانية ، طريقة الحجوم المحدودة ، طريقة $k-\epsilon$ ، جريان

.Couette

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu "ALLAH" le tout puissant, pour nous avoir donnés autant de courage, de patience et de volonté pour accomplir ce travail.

*Nos remerciements, en second lieu, notre Encadreur, Madame **HADJADJ Sauad**, pour nous avoir dirigé tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence, et ces remarques qui nous avons été précieuses.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

***Enfin**, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous le personnel ENTP, pour leurs coups de main. A tous les professeurs et le personnel du département Forage et Mécanique des Chantiers Pétroliers, Faculté des Hydrocarbures et des Energies Renouvelables et des Sciences de la Terre et l'Univers, Université Kasdi Merbah - Ouargla. Ainsi qu'à nos collègues et amis et tous les personnes qui ont participées de près ou de loin à l'exécution de ce travail.*

Merci à tous et à toutes.

Ayoub; Ahmed et Seyfeddine

Dédicace

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes frères, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées ET A toute ma famille : BEN FERDJALAH. A toute LA famille : KESSAB.

A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions.

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes collègues
AHMED ; Seyfeddine et leurs familles.*

Ayoub



Dédicace

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

*A mes frères, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées ET A toute ma famille : KHENNICHE. A toute LA famille : BELKHIRI et ma fiancilles
BENBRAHIM Noura*

A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions.

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

*A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes collègues
Ayoub ; Seyfeddine et leurs familles.*

Ahmed



Dédicace

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes frères, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées ET A toute ma famille : REDOUANI. A toute LA famille : BEGGAS et ma fiançailles Raihana

A tous mes amis qui ont toujours été présents et qui n'ont ménagé aucun effort pour me bénéficier avec leur aide et leurs suggestions.

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes collègues Ayoub; Ahmed et leurs familles.

Seyfeddine



SOMMAIRE

Résumé

Abstract

ملخص

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

INTRODUCTION	01
Chapitre I: GENERALITES	02
1. Définition d'une opération de nettoyage d'un puits	02
2. Description d'une opération de nettoyage d'un puits.....	02
3. Paramètres influant sur l'opération de nettoyage.....	03
3.1. Capacité et puissance d'installations.....	03
3.2. Le profil et la géométrie du puits.....	04
3.3. Rhéologie et paramètres physiques du fluide de forage.....	05
3.3.1. Types de fluides.....	07
3.4. Les formations traversées	11
4. Problèmes liés au mauvais nettoyage.....	12
4.1. Augmentation des torques, drags avec perte de couple (en rotary) et de WOB (en sliding) successive.....	12
4.2. Difficultés de mouvement de la garniture et risque de coincement mécanique.....	12
4.3. Instabilité des parois du puits et pertes de circulations.....	14
4.4. La mauvaise cimentation.....	14
4.5. Difficultés de contrôle du puits.....	14
4.6. Influence sur le mode d'écoulement de la boue.....	14
4.7. Bourrage de l'outil.....	14
4.8. Coût de revient élevé.....	15

SOMMAIRE

Chapitre II : FORMULATION MATHÉMATIQUE ET NUMÉRIQUE	16
1. Description physique.....	16
1.1. Les étapes incluent dans la sélection des puits candidats	16
2. Hypothèses.....	16
3. Formulation mathématique.....	17
3.1. Modèle mathématique k- ϵ de turbulence.....	19
4. Les nombres adimensionnels	21
5. Formulation numérique et méthode de Résolution.....	23
5.1. Méthode des volumes finis.....	24
5.2. Les conditions aux limites.....	24
5.3. Les schémas utilisés sur le solveur Ansys-Fluent.....	27
6. Maillage.....	27
6.1. Indépendance de maillage.....	28
7. Validation.....	29
Chapitre III: RESULTAS ET DUSCUSSION	30
1. Le conditionnement de ce système d'écoulement.....	30
2. Résultats et discussions.....	32
2.1 Le 1 ^{ier} cas : La tige.....	32
2.1.1 Les profils de vitesses.....	32
2.1.2 Les profils de température.....	37
2.1.3 La pression.....	38
2.2 Le 2 ^{ème} cas : L'espace annulaire.....	39
2.2.1 Profils de vitesses.....	39
2.2.2 Profils de températures.....	44
2.2.3 Profils de pression.....	47
CONCLUSION	48

Références bibliographiques

Annex

Tableau II.1: La rugosité absolue pour différents types de tige.

Tableau II.2: Les conditions aux limites appliquées à l'intérieure de la tige et dans l'espace annulaire.

Tableau II.3: Tableau comparatif des maillages proposés.

Tableau III.1 : Les caractéristiques thermophysiques de l'eau à l'entrée de la tige et à L'entrée de l'espace annulaire.

Tableau III.2 : Les caractéristiques thermophysiques de la boue de forage à l'entrée de la tige et à L'entrée de l'espace annulaire.

Tableau III.3 : Les régimes d'écoulement des fluides de forage dans la tige et l'espace annulaire.

FIGURE I.1: Le processus de la circulation du fluide de forage.

FIGURE I.2: L'effet de la rotation de la garniture sur le nettoyage.

FIGURE I.3: Influence de L'excentricité de la garniture sur nettoyage.

FIGURE I.4: Relation entre la taux et contrainte de cisaillement de fluide newtonien.

FIGURE I.5: La viscosité effective de fluide Non-Newtonien.

FIGURE I.6: Rhéogramme de comportement de fluide non-newtonien.

FIGURE I.7: Risque de coincement.

FIGURE II.1: Le modèle étudié en 3D et 2D.

FIGURE II.2: Différents modèles de modélisation de turbulence.

FIGURE II.3: Chart de stontan.

FIGURE II.4: Forces agissant sur un élément de fluide, d'une colonne d'eau dans un trou foré.

FIGURE II.5: Un système d'écoulement.

FIGURE II.6: Un système d'écoulement en tube en U.

FIGURE II.7: Courbe de la vitesse pour différents maillages.

FIGURE III.1 : Les profils des vitesses de l'eau en régime turbulent, dans la tige.

FIGURE III.2 : Gradients de vitesses auprès des parois en régimes, laminaire et turbulent

FIGURE III.3 : Les profils des vitesses de la boue à base d'eau en régime transitoire.

FIGURE III.4 : Contours des vitesses et des températures de l'eau et la boue de forage dans la tige (à droite : l'eau et à gauche la boue de forage).

FIGURE III.5 : La répartition de vitesse d'un fluide Non newtonien en régime turbulent.

FIGURE III.6 : Les profils des températures de l'eau en régime turbulent, dans la tige.

FIGURE III.7 : Les profils des températures de la boue à base d'eau en régime transitoire.

FIGURE III.8 : La pression hydrostatique le long de la tige pour les deux types des fluides de forage (N : Newtonien ; NN : Non Newtonien).

FIGURE III.9 : Profils des vitesses de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

FIGURE III.10 : Profils des vitesses de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

FIGURE III.11 : Profils des vitesses de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

LISTE DES FIGURES

FIGURE III.12 : Profils des vitesses de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

FIGURE III.13 : La couche limite écoulant sur un cylindre en rotation à écoulement axial superposé.

FIGURE III.14 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige à l'entrée de l'espace annulaire.

FIGURE III.15 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige au milieu de l'espace annulaire.

FIGURE III.16 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige à la sortie de l'espace annulaire.

FIGURE III.17 : Profils des températures de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

FIGURE III.18 : Profils des températures de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

FIGURE III. 19 : Profils des températures de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

FIGURE III.20 : Profils des températures de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

FIGURE III.21 : Profils des températures de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

NOMENCLATURE

C_P	Chaleur spécifique à pression constante	[J/kg.K]
D	Diamètre du trou	[m]
D_h	Diamètre intérieure	[m]
ECD	Densité équivalente de circulation	[g/cm ³]
F	Force	[N]
f	Coefficient de frottement	
g	Accélération terrestre	[m.s ⁻¹]
H	Hauteur	[m]
ID	Diamètre intérieur	[m]
K	Indice de consistance	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
k	Énergie cinétique turbulente	[m ² /s ²]
L	Largeur	[m]
n	Indice du comportement	
OD	Diamètre extérieure	[m]
P₁	La pression à l'intérieure de tige	[Pa]
P₂	La pression dans l'espace annulaire	[Pa]
P_h	Pression hydrostatique à la tête de puits	[Pa]
P_d	Pression dynamique	[Pa]
P_p	Pression de pompage	[Pa]
P_{frot}	Pression perdue par frottement	[Pa]
P_f	Pression de pore	[Pa]
P_o	Pression dynamique à travers l'outil de forage	[Pa]
P_v	Viscosité plastique	[Cp]

NOMENCLATURE

Q	Débit de forage	[m ⁻¹]
ROP	Taux d'avancement	[m/s]
RPM	Rotation par minute	[rad/s]
S	Section	[m ²]
T	Température	[K]
T_a	Température du fluide de forage	[K]
T_P	Température isotherme aux parois de la tige	[K]
T_f	Température isotherme aux parois de formation	[K]
T_∞	Température du fluide de forage à l'intérieure de tige	[K]
T_{ref}	Température de référence	[K]
u, v	Composantes du champ de vitesse	[m/s]
V	Vitesse du fluide	[m/s]
V_l	Vitesse moyenne	[m/s]
V_∞	Vitesse du fluide de forage à l'intérieure de tige	[m/s]
V_a	Vitesse du fluide de forage	[m/s]
W_p	Travail de la pompe	[W]
W_{frot}	Energie dissipée en circulation dans ce système	
WOB	Le poids sur l'outil.	[kg]
x, y	Coordonnées Cartésiennes	
Y_p	Yield point	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
Z	Profondeur	[m]
ρ	Masse volumique de la boue de forage	[g/cm ³]
ε	Taux de dissipation d'énergie en turbulence	[m ² /s ³]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]

NOMENCLATURE

μ	Viscosités dynamique	[kg/m.s]
μ_T	La viscosité turbulente locale	[kg/m.s]
μ_{eff}	La viscosité effective du fluide de forage	[Cp]
μ_e	La viscosité équivalente	[Cp]
μ_p	La viscosité plastique	[Cp]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s].
Γ_T	La diffusivité turbulente.	[W/m.K]
τ	La contrainte de cisaillement	[Pa]
γ	Taux de cisaillement	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
τ_0	Yield point minimal	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
0600	Lecture fann a 600 rpm.	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
0300	Lecture fann a 300 rpm.	[kg.s.n ⁻² .m ⁻¹]
3D	Trois dimension	
BHA	Botton Hole Assembly	
CFD	Computational fluid dynamics	
CFX	Central Florida Expressway	
LES	Large Eddy Simulation	
Pr_T	Nombre de Prandtl turbulent	
Re	Reynolds	
RMS	Reynolds stress model	
YPL	Yield power law	



INTRODUCTION

L'industrie du forage pétrolier tout comme les autres domaines industrielles a vécu des obstacles énormes tout au long de son évolution. Parmi ces obstacles, se pose le problème de nettoyage du trou inadéquat, qui peut entraîner des incidents coûteux, tels que le coincement, l'usure prématuré de la garniture, lenteur de forage, perte de circulation...etc.

Des nombreuses études ont été menées afin de mieux comprendre l'intérêt du nettoyage de trou dans le forage.

Certaines recherches ont été et sont encore en cours pour approfondir la compréhension du mécanisme de transfert de quantité de mouvement d'un fluide de forage, de l'impact d'un fluide et d'autres concepts considérés comme essentiels pour le nettoyage du fond de puits.

Pour comprendre le comportement de fluide de forage lors d'une opération de nettoyage d'un trou, vis-à-vis la pression et la température exercées lors de son écoulement, ce travail consiste deux cas, le premier concerne l'écoulement à l'intérieure de la garniture et le deuxième est au niveau de l'espace annulaire. En plan, les modèles étudiés, simulent un écoulement turbulent en convection forcée, de Poiseuille verticales et de couette, lorsque la garniture se met en rotation. En utilisant deux types des fluides de forage l'eau de type newtonien et la boue à base d'eau de type non-newtonien.

Le bilan énergétique est résolu numériquement par l'approche $k-\epsilon$, en utilisant la méthode numérique du volume finis et le solveur Ansys-fluent 17.0.

Le travail comporte trois chapitres : le premier chapitre comprend des généralités sur le nettoyage de trou et la rhéologie des fluides. Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations. Ces résultats concernent essentiellement la distribution des vitesses et des températures ainsi que la pression. En utilisant la formulation mathématique et numérique dans le deuxième chapitre.

Chapitre

I

GENERALITES

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

Ce chapitre comprend la description de processus de nettoyage des puits, ainsi que des définitions utiles de principaux facteurs influant sur sa rentabilité.

1. Définition d'une opération de nettoyage d'un puits :

Le nettoyage des trous est la capacité d'un fluide de forage à transporter et à suspendre les déblais de forage générés par l'outil de forage [1]. En représentant l'ensemble des phénomènes physiques et le comportement de fluide depuis qu'il a quitté l'outil jusqu'à ce qu'il soit apparu à la surface.

2. Description d'une opération de nettoyage d'un puits

Le nettoyage pendant le forage ou d'autres opérations consiste tout un cycle de fluide de forage, selon les étapes suivantes (voir fig I.1) [2][3] :

- Préparation de fluide de forage et sa conservation dans le bassin de décantation.
- Acheminement de ce fluide à travers une station de pompage (ou de compression) vers la tige de forage qui descend jusqu'au fond du trou.
- Evacuation de fluide de forage vers le fond du puits, à travers l'extrémité de l'outil de forage, qui tourne et arrache la formation rocheuse, en entraînant son avancement.
- Remonter de fluide de forage à la surface, en sens inverse de son parcours à l'intérieur des tiges, via l'espace annulaire, entre la tige et le trou foré, en transportant les déblais de forage.
- Retour de fluide de forage vers le bassin de décantation, en passant par un tamis vibrant pour la séparation des déblais de forage.

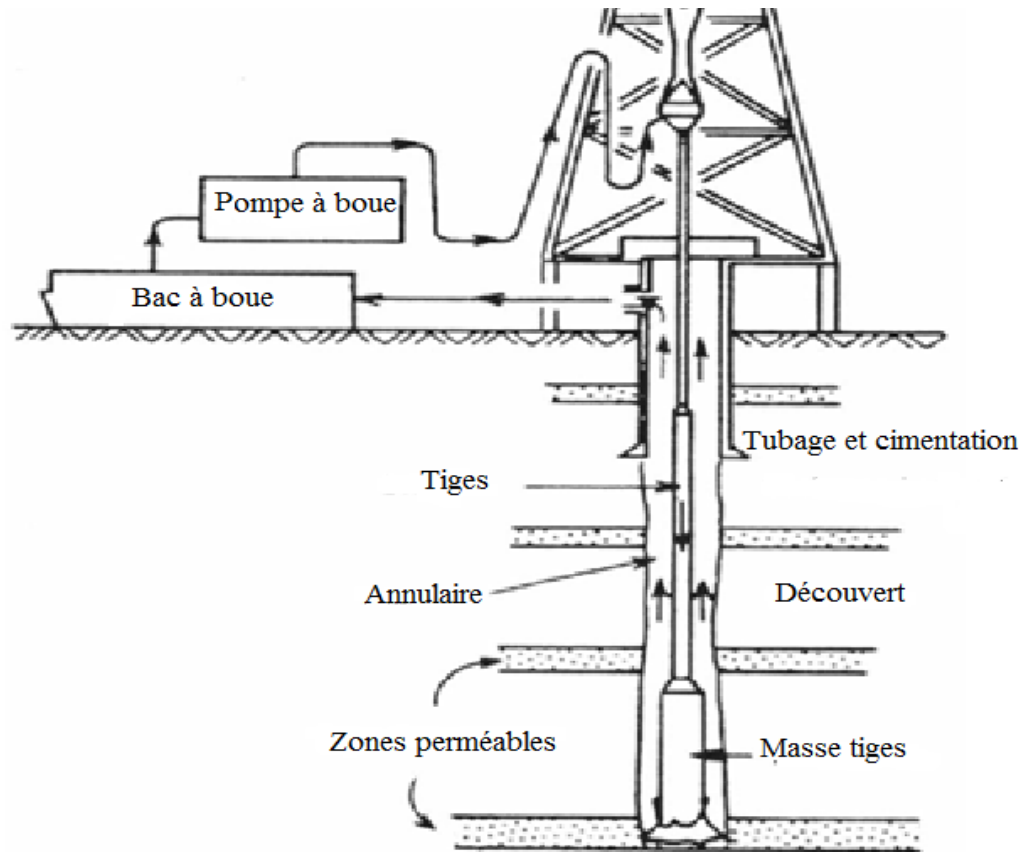


Fig.I.1: Le processus de la circulation du fluide de forage [6].

3. Paramètres influant sur l'opération de nettoyage

Le processus de dégagement des déblais de forage, lors de forage, est conditionné par ces paramètres :

3.1. Capacité et puissance d'installations

Le choix d'un appareil de forage constitue un préalable à toute opération de forage ; selon les besoins en capacité et en puissances requises pour [2]:

- Injecter le fluide de forage sous une pression suffisante pour l'évacuer à la surface en évacuant les déblais de forage. Cette puissance implique les pompes ou les compresseurs ou bien l'installation de pompage ou de compression en amont de l'appareil de forage.
- Exécuter le poids sur l'outil de forage, c'est-à-dire le poids de la garniture la plus lourde.

- Tourner l'outil de forage et souvent toute la garniture et le train des tiges, selon le mode de forage utilisé, rotary ou sliding. Pendant le sliding, le nettoyage des trous est minime et le lit des déblais de forage (cutting bed) est de susceptible forme [4]. C'est la raison qui défavorise un sliding continu lors de toute opération de forage.

L'expérience et les données de terrain indiquent que la rotation de la garniture était très bénéfique pour le transport des déblais.

Certains chercheurs estiment que la rotation de la garniture a un effet très faible en régime turbulent, par rapport à un régime laminaire, où l'effet de la rotation sur l'efficacité de transport des déblais sera plus important (voir fig. I.2) [6].

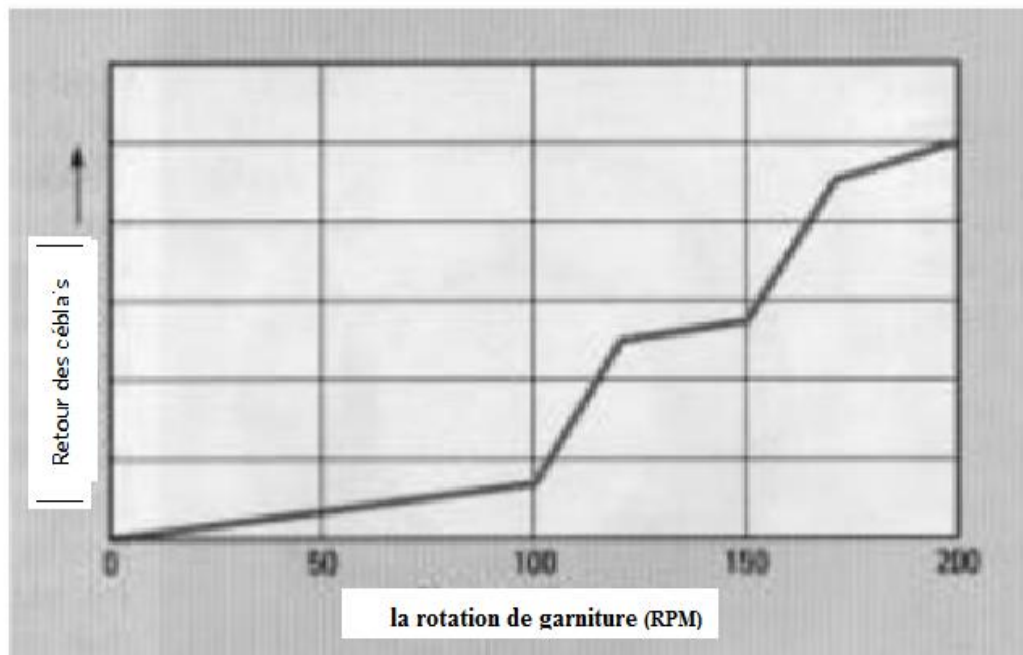


Fig.I.2 : L'effet de la rotation de la garniture sur le nettoyage [5].

3.2. Le profil et la géométrie du puits

Le problème de mauvais nettoyage se pose dans les puits déviés, en plus dans les puits fortement déviés et horizontaux, où les cuttings se déposent sur la génératrice inférieure du trou par effet de gravité notamment durant les arrêts de circulation, et par la suite favorise le développement d'un lit des déblais « cutting bed ».

Des travaux à l'échelle laboratoire ont montré que l'augmentation de l'angle de déviation au-delà de 67° par rapport à la verticale, rend le nettoyage du trou plus difficile et

par conséquent le débit requis augmente. Les exigences de débit atteignent le maximum aux environs des déviations de 65° à 67°, puis diminuent légèrement vers l'horizontale [7].

L'efficacité de déplacement des déblais de forage augmente avec l'augmentation du diamètre trou et la diminution de jeu annulaire (annular gap) [6].

Dans les puits à angle élevé, le train de tiges ne reste pas stable au fond du trou lors de la rotation. La garniture grimpe sur la paroi du trou et retombe, en créant une agitation supplémentaire, mais également une dégradation supplémentaire des déblais, tout en facilitant l'élimination des lits de déblais situés sur le côté bas de trou (voir Fig.I.5) [6].

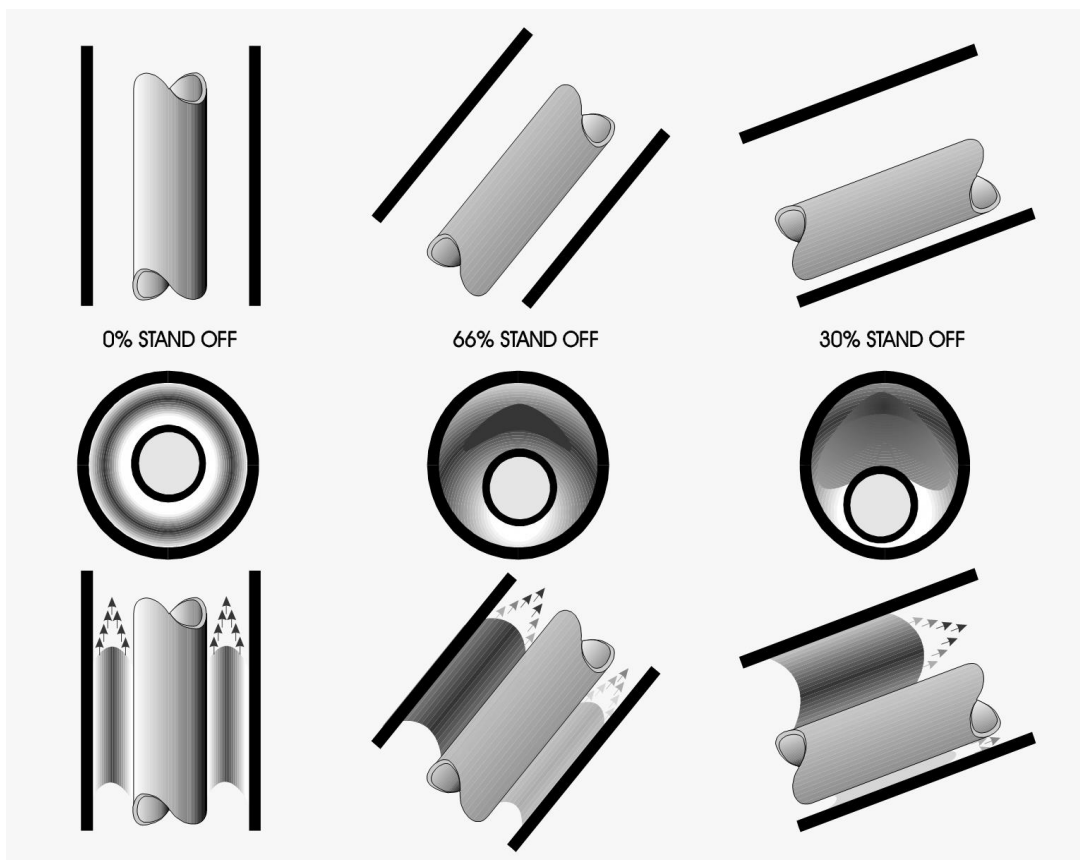


Fig.I.3 : Influence de L'excentricité de la garniture sur nettoyage [9].

3.3. Rhéologie et paramètres physiques du fluide de forage

L'étude de la rhéologie de fluide de forage est importante, car elle permet d'analyser spécifiquement son influence sur le nettoyage du puits [8]. Ainsi que l'aptitude de fluide de forage à débarrasser les déblais de forage dépend de ses paramètres physiques thermiques,

influencées par la température et la pression, environnantes, notamment les boues à base d’huile, qui diffèrent de comportement entre la surface et le fond du trou [10].

✓ **Densité du fluide de forage.**

La densité est un paramètre important des fluides de forage. Elle doit être suffisamment ajustée aux résistances mécaniques des formations afin d’empêcher les venues d’eau, d’huile et de gaz et par conséquent les éruptions et les fractures qui amènent des pertes de circulation.

Il est donc indispensable d’apporter aux fluides de forage tous les soins nécessaires à leur fabrication, leur contrôle et à leur entretien en cours d’utilisation. Leur mise en œuvre nécessite la compréhension des leurs réactions physiques et physico-chimiques.

✓ **La viscosité :**

La viscosité (μ) est la représentation de la résistance interne d’un fluide à l’écoulement, définie comme le rapport de la contrainte de cisaillement (τ) au taux de cisaillement (γ). Elle est exprimée en poise [8].

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \tag{I. 1}$$

La viscosité apparente est définie comme le rapport de la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation et dépend de la vitesse de cisaillement à laquelle la mesure est faite et de l’historique de la vitesse de cisaillement antérieure du fluide. Les forces visqueuses présentes dans un simple fluide newtonien sont caractérisées par une viscosité constante du fluide [6].

On définit :

❖ Le taux de cisaillement (ou vitesse de déformation) par :

$$\gamma = \frac{dv}{dr} = \frac{\text{différence de vitesses entre deux lames voisines}}{\text{Distance entre les deux lames}} \tag{I. 2}$$

❖ La tension de cisaillement comme force par unité de surface de la lame qui provoque le cisaillement. Soit alors :

$$\tau = \frac{dF}{ds} \tag{I. 3}$$

✓ **Le yield point (Yp) :**

La contrainte seuil est la résistance initiale à l'écoulement provoquée par des forces électrochimiques entre les particules, dues aux charges à la surface des particules dispersées dans la phase de fluide [8].

Le yield point dépend de:

- Propriétés de la surface des solides.
- Concentration en volume des solides.
- Environnement électrique de ces solides (types des ions).

A l'aide de lectures faites sur le viscosimètre Fann, le yield point est calculé par la formule suivante :

$$Y_p \left[\frac{\text{lb}}{100 \text{ ft}^2} \right] = 2 \times \theta_{300} - \theta_{600} \quad (\text{I.4})$$

Où :

θ_{300} et θ_{600} sont Lecture fann à 300 rpm et Lecture fann à 600 rpm successive.

Le yield point est la seconde composante de la résistance à l'écoulement d'un fluide de forage ; c'est une mesure des forces d'attraction.

3.3.1. Types de fluides :

➤ **Modèle Newtonien**

Le comportement des fluides newtoniens en écoulement peut être entièrement décrit par un seul terme appelé viscosité newtonienne (μ). Ce type de fluide est représenté par l'eau et le gasoil. La contrainte de cisaillement est liée au taux de cisaillement linéairement, la constante de proportionnalité étant la viscosité constante de Newton (μ) [7].

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (\text{I.5})$$

La courbe, selon la figure (I.4) est une droite passant par l'origine d'un repère cartésien, le fluide se met en mouvement dès qu'une force supérieur à zéro est appliquée sur lui (voir fig.I.6).

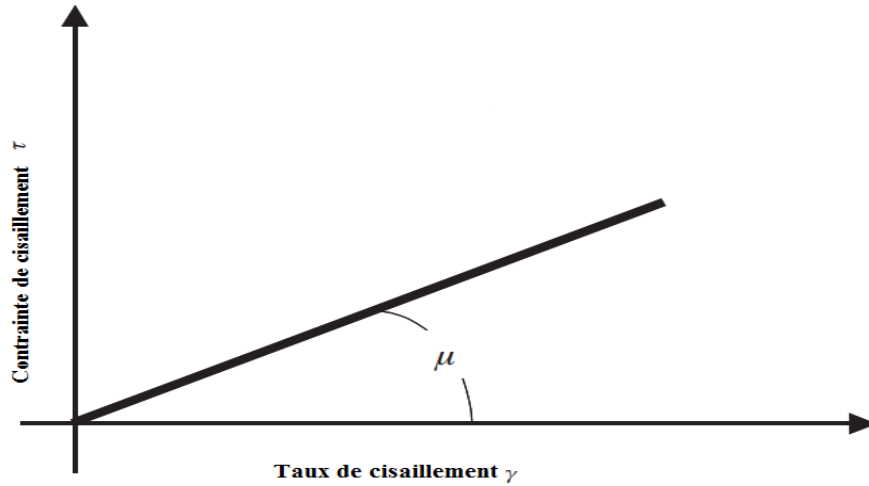


Fig.I.4 : Relation entre la taux et contrainte de cisaillement de fluide newtonien [6].

➤ **Modèle non newtonien**

Ce modèle ne montre pas une proportionnalité directe entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation (voir fig.I.5).

Le rapport entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation (viscosité), varie avec le taux de cisaillement. Ce rapport est appelé « viscosité effective », où le taux de cisaillement doit être identifié pour chaque valeur de la viscosité effective [8].

La plupart des fluides de forage correspondent à cette classification générale.

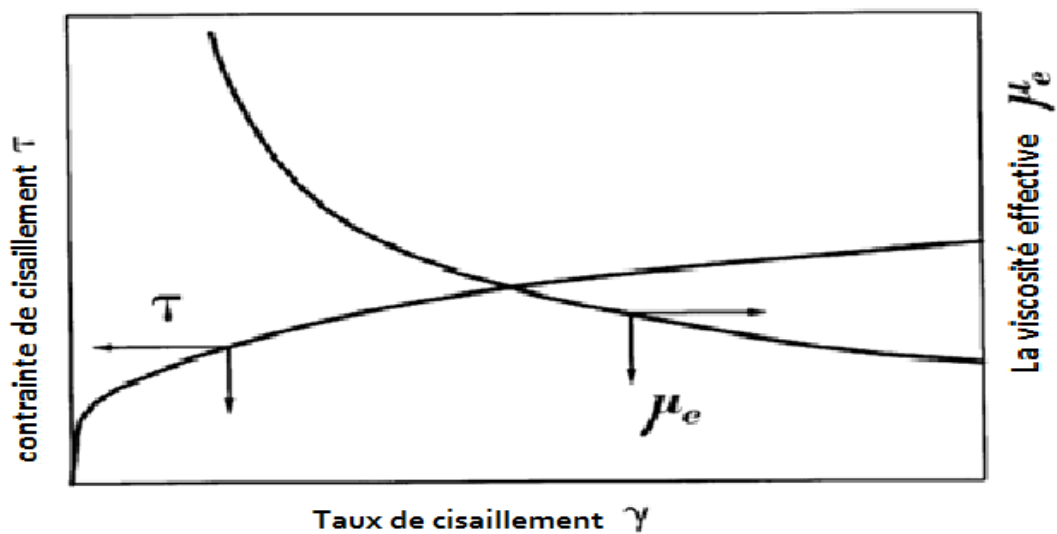


Fig.I.5: La viscosité effective de fluide Non-Newtonien [8].

Les fluides non newtoniens sont classés en quatre grandes catégories, selon la dépendance des propriétés du temps, comme suit :

- **Fluides non newtoniens indépendants du temps** : tels que
 - **Le modèle de plastiques binghamien** :

Le modèle plastiques binghamien est le modèle rhéologique mathématique le plus largement utilisé dans le domaine pétrolier. Toutes les données sont générées à partir des lectures 600 et 300 sur un viscomètre. Un fluide plastiques binghamien ne s'écoulera pas tant que la contrainte de cisaillement appliquée ne dépassera pas une certaine valeur minimale appelée contrainte de seuil.

Une fois la tension limite de cisaillement ou yield point dépassée, les variations de la contrainte de cisaillement sont proportionnelles à la variation de la vitesse de cisaillement, donc la constante de proportionnalité est appelée viscosité plastique [6][8].

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (1.6)$$

Avec :

τ_0 est yield point et μ_p est la viscosité plastique.

- **Le modèle pseudoplastique** :

Ces fluides sont caractérisés par la forme du durcissement d'écoulement. Lorsque la courbe de contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement de ces fluides est établie à l'échelle logarithmique. La viscosité effective d'un fluide pseudoplastique diminue avec l'augmentation des taux de cisaillement.

Pour les fluides de forage, le comportement pseudoplastique est généralement défini à l'aide de l'équation de la loi de puissance. Cette équation utilise deux paramètres, « K » et « n » [8].

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad (1.7)$$

Avec :

K : le coefficient de consistance, d'une boue à des taux de cisaillement très faibles

n : l'indice de comportement rhéologique sans dimension, où : $0 < n < 1$.

Elle peut être évaluée par la relation empirique :

$$n = 3.32 \log \left(\frac{f_{ann\ 600}}{f_{ann\ 300}} \right) \tag{I.8}$$

• **Le modèle dilatant :**

Le comportement des fluides dilatants est caractérisé par la courbe d'écoulement représenté par le fluide de puissance où n est supérieur à 1 (voir fig I. 6) [8].

$$\tau = K. \gamma^n \tag{I.9}$$

Avec : $n > 1$

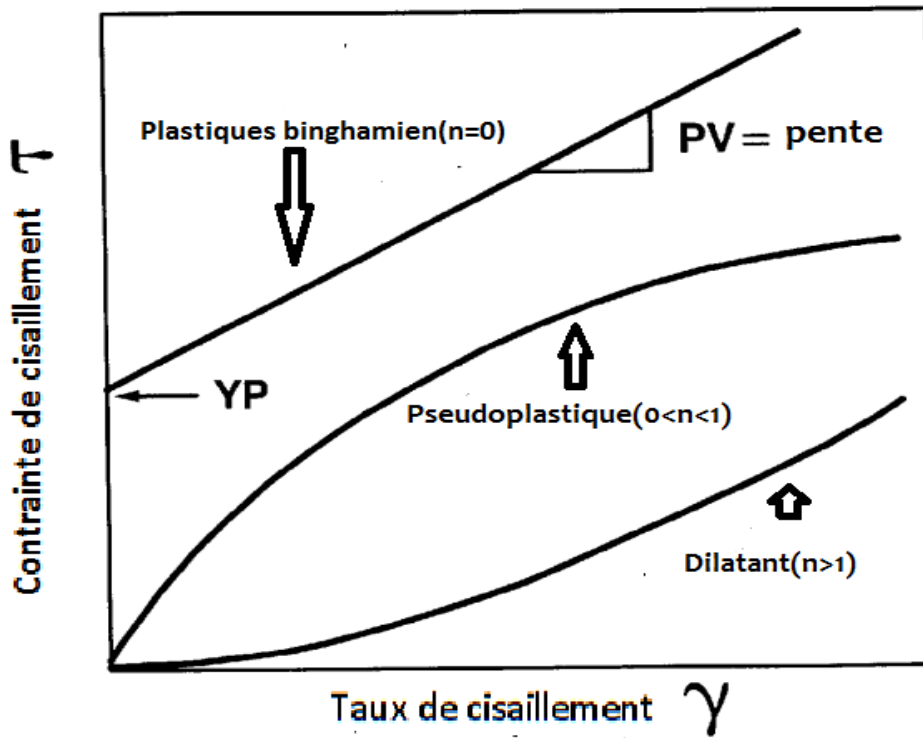


Fig.I.6: Rhéogramme de comportement de fluide non-newtonien [8].

○ **Fluides non newtoniens dépendants du temps**

• **Le modèle thixotropique**

Les fluides thixotropiques présentent un comportement dépendant du temps. Ils développent une structure de gel au repos, où en diminuant le taux de cisaillement appliqué.

Cette structure de gel peut se manifester par une « contrainte de rupture réelle ». La limite d'élasticité réelle est la contrainte résiduelle sur le fluide après réduction du taux de cisaillement à zéro [8].

- **Le modèle Herschel-Bulkley (yield Power law):**

Pratiquement tous les fluides de forage présentent les caractéristiques des fluides pseudoplastiques et thixotropes. Une façon de décrire le comportement de tels fluides par le modèle de fluide de puissance limité (Yield-Power Law : YPL) [6][8].

$$\tau = \tau_0 + K. \gamma^n \quad (I.10)$$

3.4. Les formations traversées

La vitesse moyenne de sédimentation est fonction de la taille, de la densité et de la forme des cuttings, de plus, elle dépend aussi de la rhéologie de la boue. C'est l'annulation du mouvement des déblais avec la boue de forage par l'effet de la pesanteur. Plus les déblais sont secs, fermes et petites, plus elles sont faciles à retirer du trou [4].

Afin d'éviter les problèmes générés par le mauvais nettoyage du puits (bouchage, collage, éboulement, perte de circulation, augmentation de viscosité et de gels, faible vitesse d'avancement) il faut que la vitesse de remonter des déblais soit supérieure à la vitesse de sédimentation [7].

Les cuttings sous forme de disque ou copeaux s'élèvent plus facilement que ceux en forme de sphère ou grain, plus les fragments sont importants, plus il leur est difficile de monter dans l'annulaire.

Le contrôle de la ROP instantanée est un moyen efficace pour éviter la surcharge de l'annulaire par des déblais. Cette vitesse doit toujours être contrôlée de manière à laisser au fluide assez de temps pour enlever les déblais générés dans le fond et minimiser l'augmentation de la densité du fluide dans l'annulaire. Une ROP plus élevée, rend l'opération de forage totalement moins coûteuse [4].

4. Problèmes liés au mauvais nettoyage :

Les problèmes liés au mauvais nettoyage du puits sont de plusieurs ordres :

- Augmentation des torques et drag (diminution de diamètre du puits).
- Difficultés de mouvement de la garniture (perte de temps pendant ces manœuvres).
- Instabilité des parois du puits et pertes de circulations.
- Mauvaise cimentation.
- Difficultés de contrôle des venues en cas d'éruption.
- Influence sur le mode d'écoulement de la boue.
- Bourrage de l'outil.
- Coût de revient élevé.

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

Le torque est la résistance à la rotation de la garniture de forage, et le drag est la résistance à la remontée ou à la descente de la garniture de forage. La traînée et le couple de la garniture peuvent être considérablement augmentés lorsque des shales géo-pressés sont rencontrés sans densité de boue suffisante [6][4].

Le mauvais nettoyage joue un rôle primordial dans l'augmentation des torques et drags pendant le forage des puits fortement déviés et horizontaux. Ces pertes de tractions et de rotation sont dues aux accumulations des déblais dans les différentes sections du puits. Le poids total de cette partie du train de tiges entraînera des situations indésirables de couple de frottement et de drag. De fait, leur persévérance causera la fatigue des éléments de garniture, ce qui cause des risques importants de rupture [6][7].

4.2. Difficultés de mouvement de la garniture et risque de coincement mécanique :

Un nettoyage insuffisant de trou produit l'accumulation des cuttings dans l'annulaire, ce qui provoque le blocage de rotation et pouvant conduire au collage par pression différentielle. Si cette condition existe lors tirage (trip out), le coincement est très probablement imminent (voir fig.I.7) [7].

Cette difficulté de maniabilité de la garniture mène à un déroulement très lent des opérations de manœuvres. Certaines mesures préventives comprennent:

- Une boue visqueuse et ou un jet hydraulique pour maintenir un écoulement turbulent dans l'annulaire.
- Faire tourner la garniture à une vitesse suffisante pour agiter entièrement le lit de cutting immobile, qui pourrait être formé du côté bas du trou.

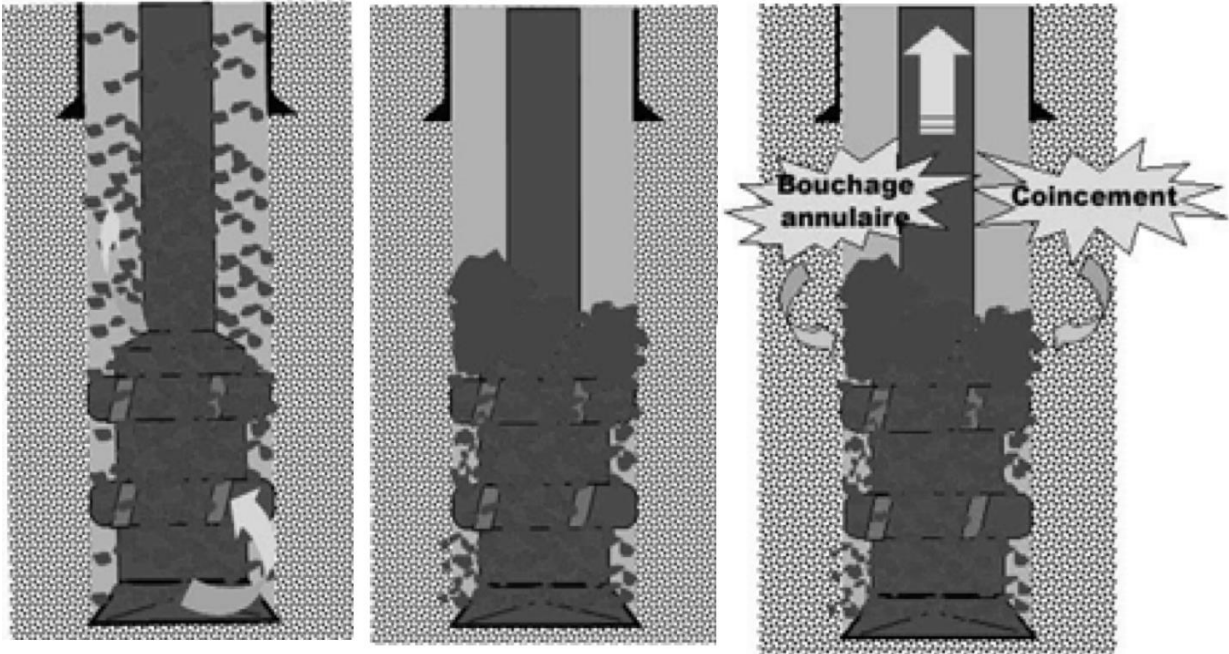


Fig.I.7 : Risque de coincement [11].

4.3. Instabilité des parois du puits et pertes de circulations :

Le problème d'instabilité des parois dans les puits de forage peut provoquer des élargissements qui rendent la perforation et la dégradation de la formation beaucoup plus difficile. La densité de la boue est un facteur majeur pour le contrôle du puits, en général, la boue plus dense est exigée pour stabiliser les parois.

La densité des fluides de forage peut être une bonne indication de la densité de circulation équivalente (ECD) et des limites de pression exercée sur les parois de puits. Le gradient de fracturation est en fonction de la profondeur verticale, mais ECD est en fonction de la profondeur du puits [6][7].

4.4. La mauvaise cimentation :

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

4.5. Difficultés de contrôle du puits :

Lors des venues, une augmentation significative de pression annulaire est liée aux forces de friction, sous la quantité des déblais dans la boue. Un mauvais nettoyage peut conduire à une usure rapide de la Duse hydraulique au cours de contrôle de venue [12].

4.6. Influence sur le mode d'écoulement de la boue :

Les régimes les plus couramment rencontrés dans les forages sont laminaires, turbulents et transitoires. Ces régimes d'écoulement peuvent être difficiles à identifier.

Non seulement le comportement des fluides varie dans le système en circulation, mais plusieurs régimes d'écoulement peuvent exister au même point du système. Par exemple, l'écoulement principal dans l'annulaire peut présenter un comportement laminaire, au moment où le fluide adjacent à la limite de la conduite peut être soumis à un écoulement turbulent [10].

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

4.7. Bourrage de l'outil :

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

Les hautes concentrations des solides contenant dans la boue et des cuttings forés mènent au bourrage de l'outil, ce sont fonction de la composition de la boue, la ROP et le taux de débit.

La pénétration excessive relative aux taux de débit réduit peut créer une concentration massive de solide réactif dans l'annulaire. Par conséquent, lors du forage de la formation argileuse, la basse concentration des solides dans la boue devrait être maintenue aussi basse que possible (5% en volume ou moins).

4.8. Coût de revient élevé :

Une mauvaise évacuation des déblais aura pour conséquence, l'intervention supplémentaire de boues légères ou visqueuses selon les problèmes, ce qu'est une dépense supplémentaire au coût du puits. Cette dépense est représentée dans les additifs économiques du puits tel que les additifs de la boue.

Chapitre

II

**FORMULATION
MATHEMATIQUE
ET NUMERIQUE**

La simulation numérique d'une opération de nettoyage d'un trou, lors de forage, est considérée parmi les meilleurs outils d'études et de recherches, pour comprendre le comportement des fluides de forage, vis-à-vis l'environnement de cette opération. Un environnement très délicat, vu :

- Ces conditions sévères (en température, pression et vitesses).
- Son emplacement en profondeur ou extrêmes profondeurs dans la croûte terrestre, là où l'observation devient trop difficile, si on ne dit pas impossible.

Plus le coût d'un forage très élevé, qui ne le permet plus d'être un environnement expérimental.

Simuler numériquement implique une modélisation, une mise en équations mathématiques et une résolution numérique, toute une approche à décortiquer dans ce chapitre.

1. Description physique :

Une opération de nettoyage d'un puits consiste l'existence de la garniture à l'intérieur d'un trou. D'après les références académiques classiques et fondamentales, telles que [6], [7] et [13], cette opération en trois dimensions peut être réduite en deux dimensions, c'est-à-dire en plan.

L'objectif principale de ce travail consiste à discerner le comportement du fluide de forage vis-à-vis la pression et la température exercées lors de son écoulement. Pour une raison de simplification, la porosité des parois de la formation rocheuse et le transport des cuttings ne sont pas pris en compte. Ainsi que les différents diamètres de la garniture sont considérés égaux et la section de l'outil de forage n'est pas prise en considération.

Ces simplifications nous permettent de diviser cette problématique en deux parties, la première concerne l'écoulement à l'intérieure de la garniture et la deuxième est au niveau de l'espace annulaire. En plan, les modèles étudiés, simulent à un écoulement entre deux plaques verticales en parallèles.

Le dimensionnement physique est basé sur la réalité, en réalisant un trou de 20 m de profondeur en première phase.

2. Hypothèses

Les hypothèses proposées sont :

- L'écoulement est incompressible, turbulent et permanent (les écoulements turbulents sont par nature stationnaire, cependant on dit qu'un écoulement est stationnaire,

si les variables moyennes sont indépendantes du temps et si les corrélations d'ordre deux constituées à partir de ces variables sans invariants par translation. Ce qui est applicable à de nombreux problèmes tels que la poussée ou la traînée d'une aile ou un flux traversant un tuyau).

- Le mode de transfert thermique est en convection forcée.
- Les paramètres thermophysiques (la masse volumique, la conductivité thermique et la capacité thermique) sont constants, calculés à une température de référence T_{ref} ou la température de film.
- Toutes les parois sont considérées imperméables et isothermes.
- Le fluide de forage, selon le cas étudié, est newtonien et non newtonien. (Modèle loi de puissance : power Law model).

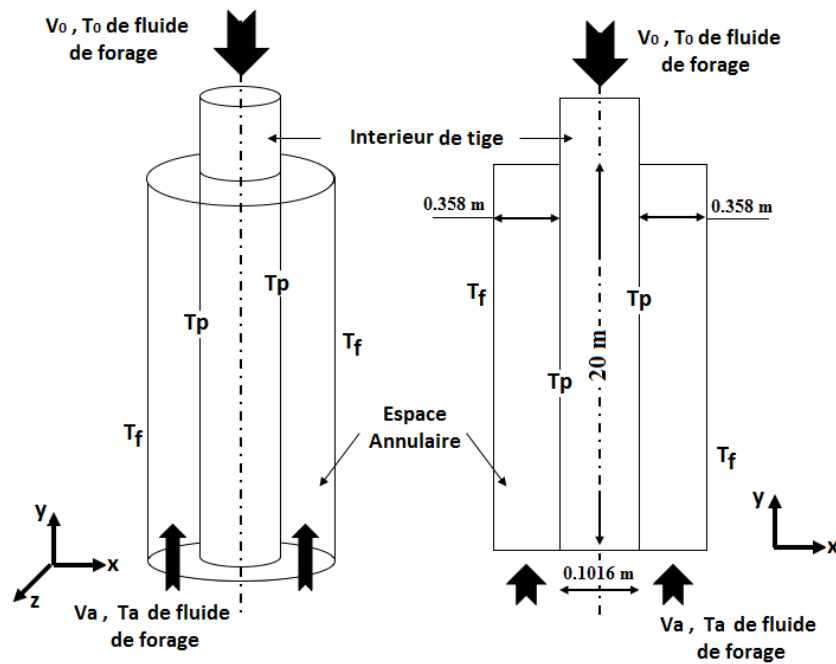


Fig.II.1 : Le modèle étudié en 3D et 2D.

3. Formulation mathématique :

Un système d'écoulement laminaire, incompressible et permanent en convection forcée, avec des dissipations visqueuses négligées, dans un plan est géré par le bilan énergétique suivant :

▪ Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II. 1})$$

▪ Equation de mouvement

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II. 2. a})$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II. 2. b})$$

▪ Equation d'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II. 3})$$

Lorsque le régime d'écoulement devient turbulent, La vitesse, la pression et la température sont considérées comme des fonctions aléatoires dans l'espace et le temps, dont ces valeurs instantanées se décomposent en :

$$u = \bar{u} + u' ; \quad v = \bar{v} + v' ; \quad P = \bar{P} + P' ; \quad T = \bar{T} + T'$$

Le symbole $(\bar{\quad})$ figure l'opérateur de moyenne statistique ou moyenne d'ensemble et le symbole (\quad') désigne les fluctuations ou les écarts par rapport à ces moyennes.

Les équations précédentes (II.1), (II.2.a), (II.2.b) et (II.3) s'écrivent sous les formes suivantes [22] :

▪ Equation de continuité

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (\text{II. 4})$$

▪ Equation de mouvement

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u\bar{u}})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v\bar{u}})}{\partial y} = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right] \\ & - \left[\frac{\partial (\overline{u'u'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (\text{II. 5. a})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u\bar{v}})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v\bar{v}})}{\partial y} = & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right] \\ & - \left[\frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v'v'})}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (\text{II. 5. b})$$

▪ Equation d'énergie

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u\bar{T}})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v\bar{T}})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) - \frac{\partial \overline{u'T'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'T'}}{\partial y} \quad (\text{III. 6})$$

On remarque que ce bilan énergétique ressemble à celui en régime laminaire, excepte les termes : $\overline{u'T'}$ et $\overline{v'T'}$, appelés les extra-termes de température et les contraintes de Reynolds, suivantes :

$$\overline{-\rho u'u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3}\rho k; \quad \overline{-\rho v'v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3}\rho k; \quad \overline{-\rho u'v'} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (\text{II. 7})$$

Où : μ_T est la viscosité turbulente et k l'énergie cinétique turbulente.

Par simulation on peut écrire les extra-termes de température en fonction de gradient de température, comme suit :

$$\overline{-\rho u'T'} = \Gamma_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \quad ; \quad \overline{-\rho v'T'} = \Gamma_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (\text{II. 8})$$

Où : Γ_T est la diffusivité turbulente.

Puisque le transport turbulent de quantité de mouvement et de chaleur est dû aux mêmes mécanismes, mélange par remous, la valeur de la diffusivité turbulente peut être prise, pour être proche de la viscosité turbulente.

D'après la définition du nombre de Prandtl turbulent, on a : $Pr_T = \mu_T / \Gamma_T$.

3.1. Modèle mathématique k-ε de turbulence

Parmi plusieurs modèles mathématiques pour résoudre les phénomènes physiques de turbulence (voir fig.II.2), vient le modèle k-ε, le plus répandu dans les applications pratiques à l'usage d'ingénierie. Il conduit à des résultats, qui sans être toujours quantitativement corrects, restent les plus souvent qualitativement représentatifs. En outre il est adapté à des procédures de résolution numérique d'équations classiques en mécanique des fluides. Nous pourrions retenir que :

➤ Ces avantages :

- C'est un modèle largement répandu.
- Il prend en compte la variabilité spatiale de l'agitation turbulente.
- Sa mise en œuvre est relativement simple.
- Il a une bonne prédiction des écoulements cisailés simples.

➤ Ces inconvénients :

- La dépendance locale et linéaire des tensions turbulentes et du champ moyen.
- La schématisation de l'équation pour ε.
- Peu adapté aux écoulements complexes (recirculation, anisotropie, production négative, ...).

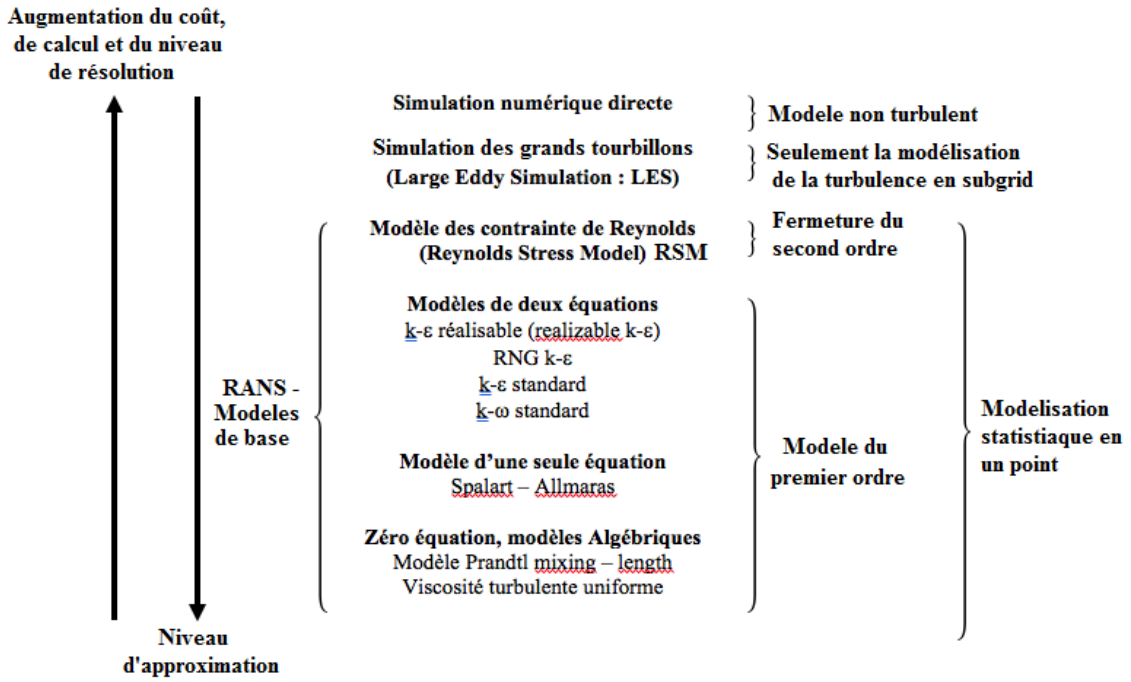


Fig.II.2 : Différents modèles de modélisation de turbulence.

L'énergie cinétique turbulente k et la dissipation de l'énergie turbulente, peuvent-être définies comme suit :

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad ; \quad \varepsilon = \nu_T \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right)} \quad ; \quad i, j = 1, 2, 3$$

Pour des valeurs locales de k et ε , la viscosité turbulente locale μ_T peut être évaluée, comme suit :

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \tag{II. 9}$$

Dont : $\nu_T = \mu_T / \rho$.

En intégrant les expressions des contraintes de Reynolds, équation (II.7) et les extra-terms de température, équation (II.8) dans les équations gouvernantes (II.4), (II.5.a), (II.5.b) et (II.6), on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{II. 10}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right] \tag{II. 11. a}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((v + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[(v + \nu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(v + \nu_T) \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (\text{II. 11. b})$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (\text{II. 12})$$

Où : $Pr = \nu \rho C_p / \lambda$.

$$u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + F - Q \quad (\text{II. 13})$$

F désigne le terme de production, dont :

$$F = 2\nu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \nu_T \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (\text{II. 14})$$

Q désigne le terme de destruction.

$$u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} F - C_{\varepsilon 2} Q) \quad (\text{II. 15})$$

C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ et $C_{\varepsilon 2}$ sont des constantes. D'après [23], elles égalent aux :

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44 \text{ et } C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

4. Les nombres adimensionnels

Le nombre de Reynolds (Re) représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans un écoulement. Pour caractériser la nature de son régime (laminaire, transitoire ou turbulent).

• Pour un fluide newtonien :

$$Re = \frac{\rho D_h V}{\mu} = \frac{D_h V}{\nu} \quad (\text{II. 16})$$

Où : D_h représente le diamètre hydraulique

V est la vitesse du fluide

$$V = \frac{1}{4\mu} \frac{dP_f}{ds} r^2 + \frac{C_1}{\mu} \ln r + C_2 \quad (\text{II. 17})$$

P_f est la pression de pore, C_1 et C_2 c'est des constantes d'intégration.

μ , ν sont les viscosités, dynamique et cinématique respectivement.

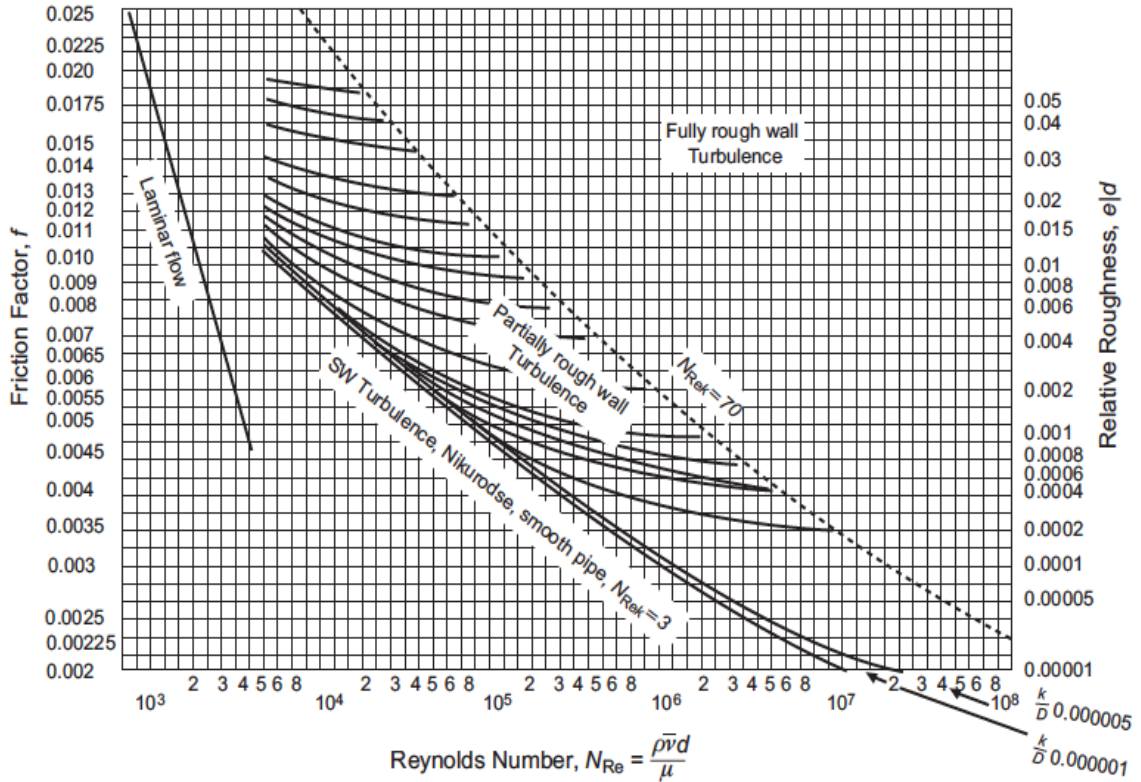


Fig.II.3 : Chart de Stanton [6].

- À l'intérieur de la tige (la garniture) :

D_h est le diamètre intérieur ID.

- Dans l'espace annulaire :

$D_h = D - OD$, la différence entre le diamètre du trou (D) et le diamètre extérieur de la tige.

Généralement, à $Re = 2100$, change son régime d'écoulement, du laminaire vers le turbulent, entre 2000 et 4000 le régime d'écoulement est considéré transitoire [6].

Le chart de Stanton [1], indiqué par la figure (II.3), interprète le régime d'écoulement à l'intérieur des tiges, en intégrant le coefficient de frottement (f), où :

$$f = \frac{d}{2\rho v^2} \frac{dP_f}{ds} \quad (II.18)$$

Et la rugosité absolue à l'intérieur des tiges et les éléments de la garniture, suivant ce tableau II.1

Tab.II.1 : La rugosité absolue pour différents types de tige [6].

Type de tige	La rugosité absolue, -e (mm)	La rugosité absolue, -e (in)
Acier riveté	0.00635-0.0635	0.00025-0.0025
Béton	0.002108-0.02108	0.000083-0.00083
Fonte (fer)	0.001803	0.000071
Fer galvanisé	0.0010668	0.000042
Fer asphalté	0.0008382	0.000033
Acier commercial	0.0003302	0.000013
Tube étiré	0.00001016	0.0000004

- Pour un fluide non newtonien :
 - Le modèle plastique de Bingham

$$Re = \frac{\rho D_h V}{\mu_p} \quad (II. 19)$$

Où : μ_p la viscosité plastique.

- Le modèle loi de puissance (Power-law model)
 - ✓ A l'intérieur des tiges :

$$Re = \frac{\rho V^{2-n} ID^n}{K(8)^{n-1}} \quad (II. 20)$$

Où : K est l'index de consistance et n l'index de comportement d'écoulement.

- ✓ En espace annulaire :

$$Re = \frac{\rho V(D - OD)}{\mu_e} \quad (II. 21)$$

Où : μ_e est la viscosité équivalente.

5. Formulation numérique et méthode de Résolution

La résolution de l'ensemble des équations gouvernantes de (II.10) jusqu'à (II.15) de ce système d'écoulement, est effectuée par la méthode numérique des volumes finis. En utilisant le code CFD, ANSYS-FLUENT 17.0.

5.1. Méthode des volumes finis

Les équations aux dérivées partielles sont résolues de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais ce n'est pas une nécessité [17].

Les caractéristiques principales de la méthode des volumes finis en mécanique des milieux continus, sont [18]:

- L'approche physique (bilan des flux).
- La formulation conservative.
- L'adaptation à des géométries quelconques.
- L'Existence de plusieurs schémas pour la résolution des termes non-linéaires.
- L'utilisation par plusieurs codes commerciaux en mécanique tel que Fluent et CFX.

5.2. Les conditions aux limites

Le tableau II.2 récapitule les conditions aux limites imposées sur ce système d'écoulement.

Tab.II.2 : Les conditions aux limites appliquées à l'intérieure de la tige et dans l'espace annulaire.

	A l'intérieure de tige	Dans l'espace annulaire
À L'entrée	-Vitesse du fluide de forage (V_{∞}) -Température du fluide de forage (T_{∞})	-Vitesse du fluide de forage (V_a) -Température du fluide de forage (T_a)
À la sortie	-La pression (P_1)	-La pression (P_2)
Aux Parois	-La température isotherme aux parois de la tige (T_p)	-La température isotherme aux parois de formation (T_f)

- Calcul de pression

▪ **La pression hydrostatique [6] :**

En conditions statiques, un élément d'une colonne de fluide, de surface transversale A à une profondeur Z, dans un trou foré est influencée par trois forces verticale, (voir fig.II.4).

Une force (F_1) exercée vers le bas sur l'élément de fluide égale à :

$$F_1 = P \cdot A \tag{II. 22}$$

La flottabilité (F_2) pousse le fluide vers le haut, selon :

$$F_2 = \left(P + \frac{dP}{dx} \right) \cdot \Delta Z \quad (\text{II. 23})$$

De plus, le poids (F_3) de l'élément de fluide exerce une force vers le bas donnée par:

$$F_3 = \rho g A \cdot \Delta Z \quad (\text{II. 24})$$

Où ρ est la densité du liquide et g l'accélération terrestre, égale à $9,81 \text{ m / s}^2$.

Comme le fluide est au repos, il n'existe pas des forces de cisaillement et les trois forces (F_1 , F_2 et F_3) sont en équilibre, où :

$$F_1 - F_2 + F_3 = 0 \quad (\text{II. 25})$$

$$P \cdot A - \left(P + \frac{dP}{dx} \right) \cdot \Delta Z + \rho g A \cdot \Delta Z = 0 \quad (\text{II. 26})$$

En mettant :

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \quad (\text{II. 27})$$

Comme le fluide de forage est considéré incompressible, l'intégral de l'équation précédente (II.24) nous mène à :

$$P_h = \rho g Z + P_0 \quad (\text{II. 28})$$

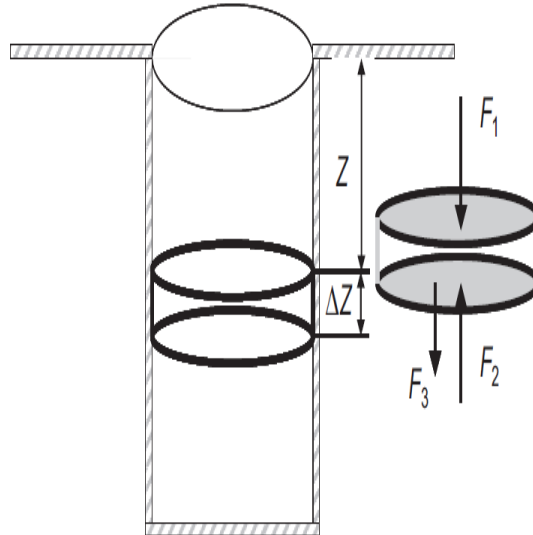


Fig.II.4: Forces agissant sur un élément de fluide, d'une colonne d'eau dans un trou foré [6].

▪ **Programme de pression d'un forage**

$$P_p = P_{\text{frot}} + P_0 \quad (\text{II. 29})$$

Avec : P_p est la pression de pompage.

P_{frot} est la pression perdue par frottement.

P_0 est la pression dynamique à travers l'outil de forage.

Le bilan d'énergie mécanique dans un système d'écoulement simulé par la figure II.5 et formulé par ce qui suit :

$$\rho(Z_s - Z_e) + \frac{\rho}{2g}(V_s^2 - V_e^2) + P_s - P_e = W_p - W_{\text{frot}} \quad (\text{II.30})$$

Où : les indices, s désigne la sortie et e désigne l'entrée.

V est la vitesse moyenne.

W_p est le travail de la pompe.

W_{frot} est l'énergie dissipée en circulation dans ce système.

Lors d'un forage, le système d'écoulement sera assimilé à un tube en U, (voir fig.II.6) où :

$$P_s = P_e \text{ lorsque } Z_s = Z_e$$

La pression de frottement égale à, en jumelant l'équation (II.29) et l'équation (II.30)

$$P_p - P_{\text{frot}} = P_h + P_d + P_s - P_e$$

Avec : P_h est la pression hydrostatique à la tête de puits et P_d est la pression dynamique.

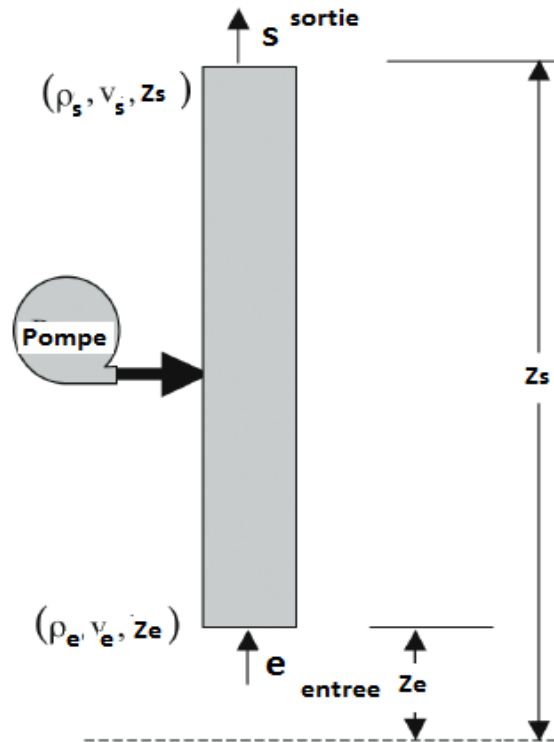


Fig.II.5: Un système d'écoulement [7].

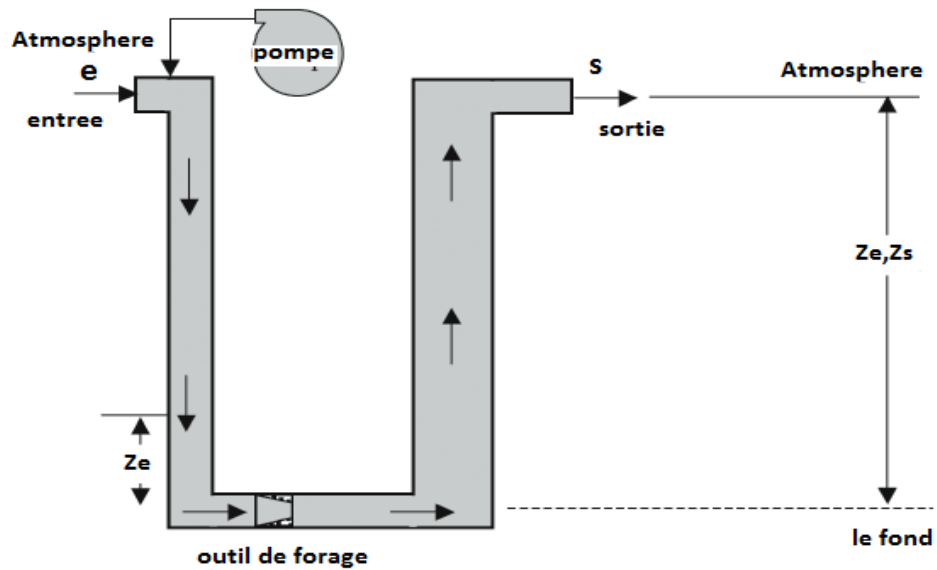


Fig.II.6 : Un système d'écoulement en tube en U [7].

5.3. Les schémas utilisés sur le solveur Ansys-Fluent

Fluent est un solveur très répandu en industrie universelle. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de modélisation des systèmes d'écoulement des fluides. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. Il dispose d'une bibliothèque riche, contenant un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects multidisciplinaires des systèmes d'écoulement et des phénomènes de transport (tel que la mécanique des fluides, le transfert thermique, la thermodynamique, ...etc).

Les schémas convenables pour résoudre les équations différentielles qui gèrent ces systèmes d'écoulement sous les conditions aux limites citées ci-dessus :

- Pour déterminer le champ de pression : le schéma SIMPLE dans le cas d'un écoulement laminaire, le schéma COUPLED pour un régime turbulent.
- Le schéma seconde ordre upwind, pour la discrétisation des termes convectifs dans l'équation dynamique, l'équation d'énergie, l'équation de taux de dissipation et l'équation de l'énergie cinétique.

6. Maillage

Le choix du maillage est une étape essentielle qui influe sur la précision et l'exactitude des résultats numériques. Donc, un maillage répondant aux objectifs, contient un nombre de mailles, une distance entre les mailles et une forme de maille, convenables.

Pratiquement, il n'existe pas des règles précises pour la création d'un maillage convenable, cependant il existe des différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable, comme :

- Le maintien d'une bonne qualité des éléments.
- L'assurance d'une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- L'assurance d'un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et celles à maillage grossier.
- La minimisation du nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable)

6.1. Indépendance de maillage

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr que la solution influe la réalité.

L'indépendance de la solution par rapport au maillage est réalisée pour une hauteur (H=20m) et une largeur (L=0.1016m), entre trois cas selon le tableau II.3.

Tab.II.3 : Tableau comparatif des maillages proposés.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Nbre de maille	10000	40000	90000	150000
Temps de calcul [seconde]	60	300	763	96

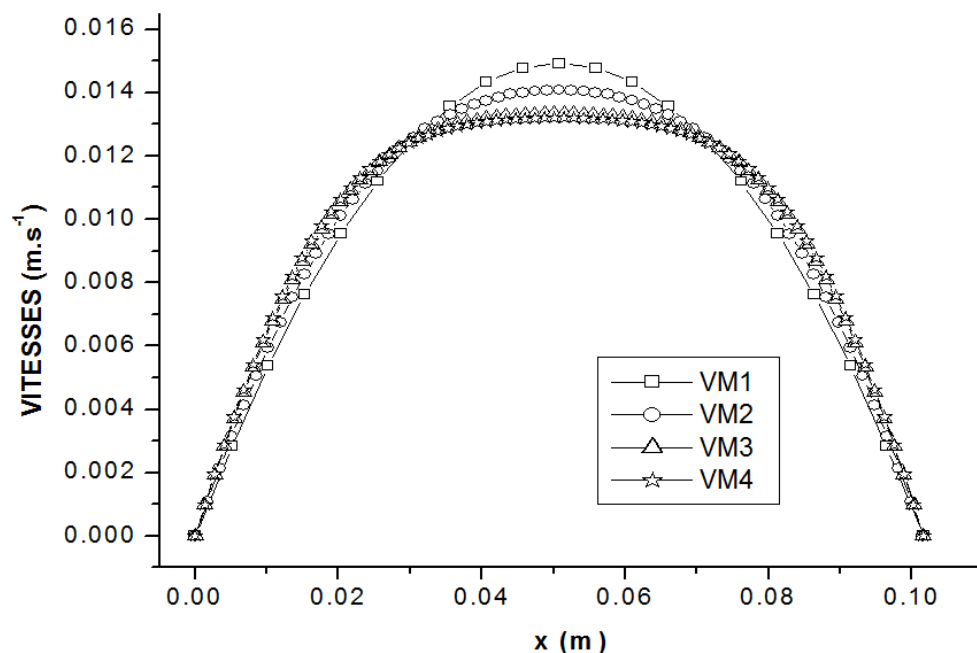


Fig.II.7 : Courbe de la vitesse pour différents maillages.

La figure II.7 montre l'évolution du profil de la vitesse des cas étudiés. On constate que l'écart entre le premier cas (M1) est supérieur à celui compris entre et (M2 et M3) et M4. Donc, le maillage choisi était le quatrième cas (voir fig.II.8), vu sa bonne précision des résultats et le minimum du temps de calcul pris en exécution.

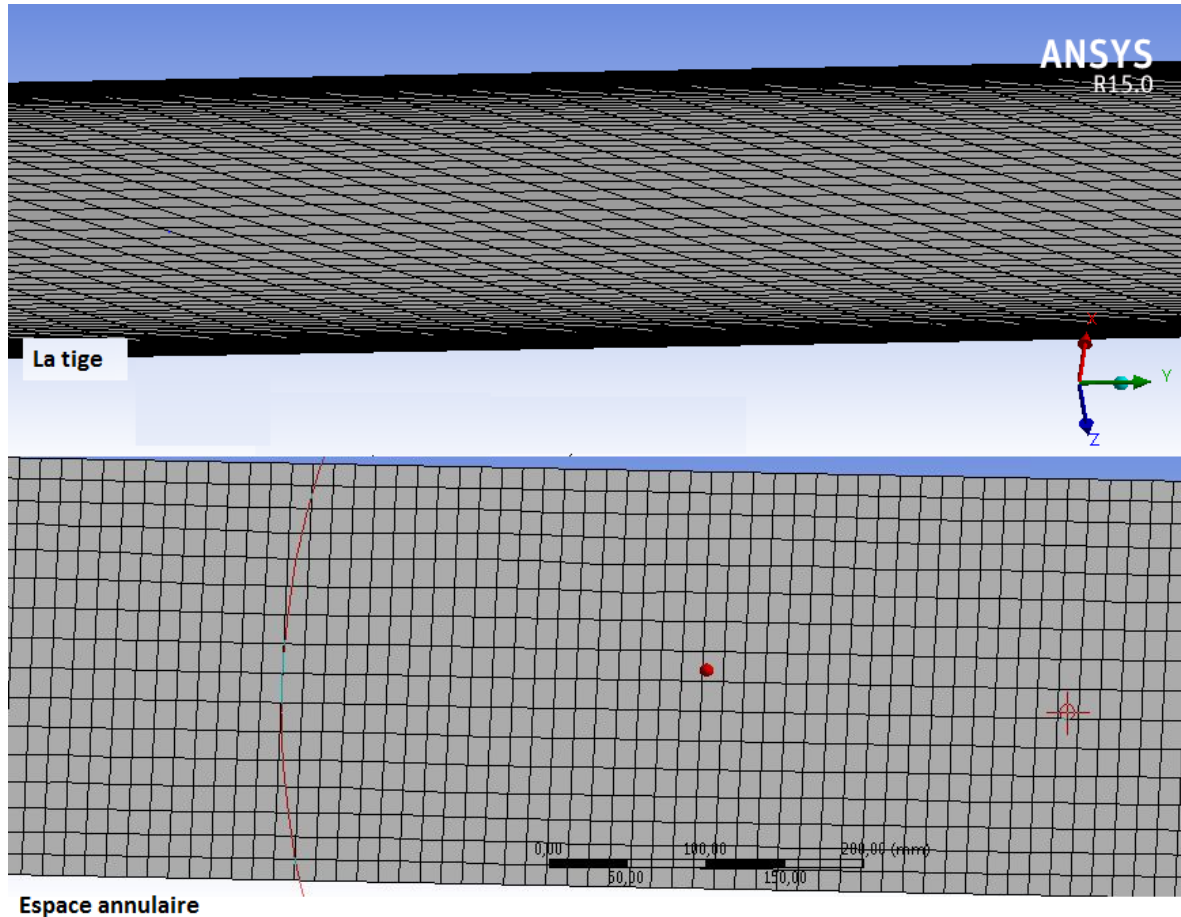


Fig.II.8 : Schéma de maillage choisi (en haut de celui de la tige et en bas celui de l'espace annulaire).

7. Validation

Ce travail est validé sur des livres académiques [6], [7] et [13].

Chapitre

III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le prescrit de plusieurs cas dans ce travail était pour comprendre le comportement des fluides de forage, lors d'une opération de nettoyage du trou en cours de forage. Ces cas comprennent :

- Deux types des fluides, l'eau de type newtonien et une boue à base d'eau de type non-newtonien.

- Deux régimes d'écoulement, transitoire et turbulent, imposés par le nombre de Reynolds calculé.

- Deux endroits différents, à l'intérieur de la tige et dans l'espace annulaire, pour suivre toute l'allure du fluide de forage, à partir de pompage dans la tige, jusqu'au surface, en retour.

- Deux modes de fonctionnement, en fixant et en tournant la garniture (les tiges).

Ces cas sont étudiés dans ce chapitre, à travers des résultats obtenus de la simulation décrite en deuxième chapitre.

1. Le conditionnement de ce système d'écoulement

Pour que les résultats obtenus à partir d'un logiciel seront plus logiques, en rapprochant de la réalité, il faut bien identifier les hypothèses et les conditions aux limites, définir les nombres adimensionnels et les caractéristiques thermophysiques du fluide de forage.

- ❖ Les fluides de forage utilisés sont :

- Un fluide de forage newtonien : l'eau.

Ces caractéristiques thermophysiques (selon Fluent) sont considérées constantes à une température de référence à l'entrée de la tige ($T_0 = 333 \text{ K}$) et à l'entrée de l'espace annulaire ($T_a = 317 \text{ K}$) sont mentionné dans le tableau III.1.

La température à l'entrée de l'espace annulaire est calculée sur la base de la température à la sortie de l'outil de forage (315 K) et la température de fond (317 K) [19].

Tab.III.1 : Les caractéristiques thermophysiques de l'eau à l'entrée de la tige et à L'entrée de l'espace annulaire.

La masse volumique (ρ)	998.2 kg/m ³
La viscosité dynamique (μ)	0.001003 kg/m.s
La conductibilité thermique (λ)	0.6 W/m.s
La capacité thermique (C_p)	4182 j/kg.K

- Un fluide de forage non newtonien de type (fluide de puissance : power law) : une boue à base d'eau.

Ces caractéristiques thermophysiques, à une température de référence à l'entrée de la tige ($T_0 = 333 \text{ K}$) et à l'entrée de l'espace annulaire ($T_a = 317 \text{ K}$) sont mentionnées dans le tableau III.2.

Tab.III.2 : Les caractéristiques thermophysiques de la boue de forage à l'entrée de la tige et à l'entrée de l'espace annulaire.

La masse volumique (ρ)	1205 kg/m ³
Index de consistance (K)	0.0577 kg.s ⁽ⁿ⁻²⁾ /m
Index d'écoulement (n)	0.8549
La conductibilité thermique (λ)	0.6 W/m.s
La capacité thermique (C_p)	4182 J/kg.K

❖ La température aux parois de la tige est considérée isotherme ambiante ($T_p = 303 \text{ K}$), ainsi que la température le long du trou ($T_f = (T_{\text{surface}} + T_{\text{fond}})/2$), donc à peu près (308 K)

❖ La vitesse de fluide de forage

- ($V_\infty = 0.9 \text{ m/s}$) à l'entrée de la tige est calculée à partir d'un débit ($q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$), pris d'une opération de forage réel.

- ($V_a = 4.67 \text{ m/s}$ pour l'eau, $V_a = 5.5 \text{ m/s}$ pour la boue) à l'entrée de l'espace annulaire est calculé à partir de l'équation suivante [7]:

$$V_a = C_d \sqrt{\frac{2g}{\gamma} P_b} \quad \text{(III. 1)}$$

Avec : P_b est le changement de pression dynamique à travers l'outil de forage.

γ est le poids spécifique de fluide de forage.

g est la densité.

C_d est le coefficient de décharge de la duse (jet).

❖ Le régime d'écoulement est prouvé sur la base du nombre de Reynolds [6], calculé à partir des équations (II.16) pour le fluide newtonien, (II.20) et (II.21) pour le fluide non newtonien dans la tige et dans l'espace annulaire, successivement. (Voir le tableau III.3)

Tab.III.3 : Les régimes d'écoulement des fluides de forage dans la tige et l'espace annulaire.

Position Type de fluide de forage	Dans la tige		Dans l'espace annulaire			
	Newtonien	Non-Newtonien	Newtonien		Non-Newtonien	
			Fixe	Mobile	Fixe	Mobile
Nombre de Reynolds	90000	3500	1.66×10^6	1.66×10^6	82652.02	82652.02
Régime d'écoulement	Turbulent	Transitoire	Turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent

2. Résultats et discussions

Le comportement des fluides de forage durant l'opération de nettoyage, après le forage d'un trou de 20 m de profondeur, en première phase (voir fig.II.1), est détaillé comme suit :

- L'allure de vitesse est étudiée en plusieurs stades à : 0.2 m, 0.5 m, 1 m, 2 m, 10 m et 18 m de l'entrée,
- Les profils des températures ont été pris en trois stades, 2 m, 10 m et 18 m de l'entrée
- La pression statique, automatiquement est examinée le long de la tige ou l'espace annulaire.

2.1 Le 1^{er} cas : La tige

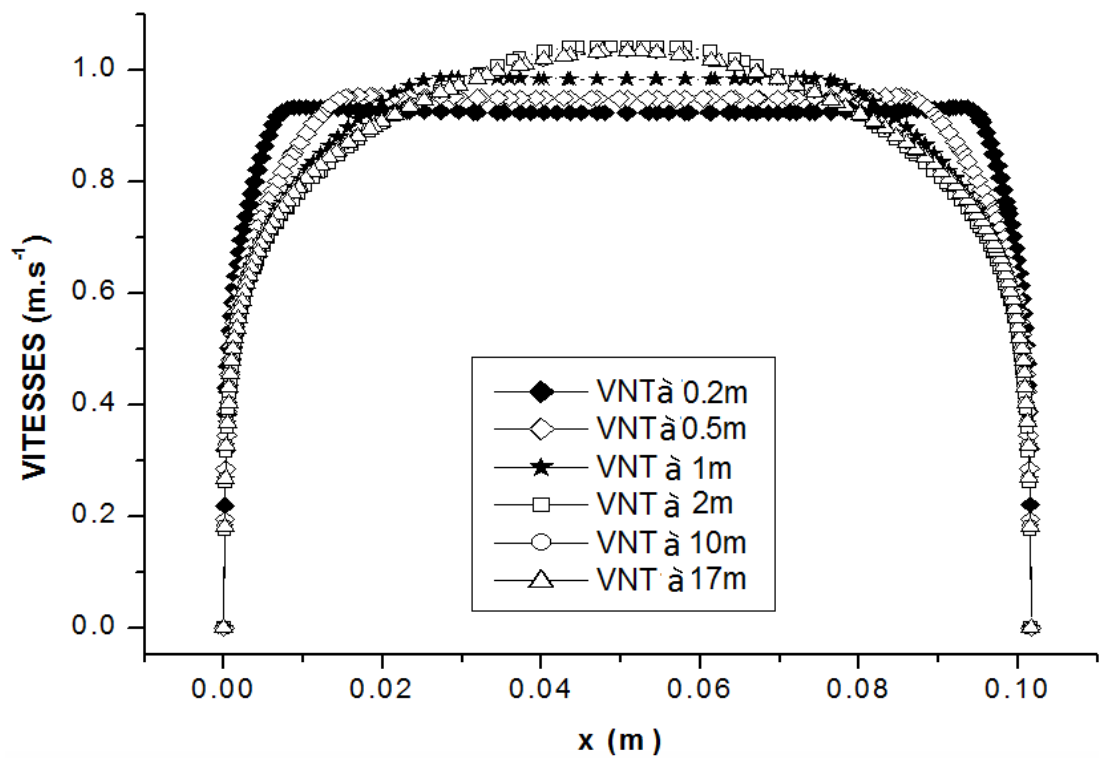
L'objectif dans cette partie est de voir comment se comporte un fluide de forage, de point de vue rhéologique, dans la tige avant d'atteindre l'espace annulaire. Pour remplir cet objectif on a étudié deux types de fluide de forage, incompressibles, newtonien (l'eau) et non newtonien (une boue à base d'eau).

2.1.1 Les profils de vitesses

La figure III.1, montre les profils des vitesses de l'eau, le long de la tige, en écoulement turbulent. Ces profils sont validés sur [20], [21], [22] et [24]. (Voir fig.III.2)

On constate que dans l'ensemble de l'écoulement, la vitesse est voisine de sa valeur maximale. On retrouve là l'effet de la turbulence qui, en assurant un meilleur mélange de l'écoulement, qui tend à uniformiser la répartition de vitesse. A la paroi la vitesse est nulle et il s'ensuit qu'elle varie plus vite [21].

Près de l'entrée le profil des vitesses est sous forme d'un rectangle (voir le profil de vitesse à 0.2 m de l'entrée), la couche limite étant très fine, ensuite cette dernière se développe asymptotiquement vers sa forme établit, au-delà de 2 m de l'entrée. Cette distance est prouvée et justifiée d'après [22].



VNT: Vitesse de fluide Newtonien Turbulent

Fig.III.1 : les profils des vitesses de l'eau en régime turbulent, dans la tige.

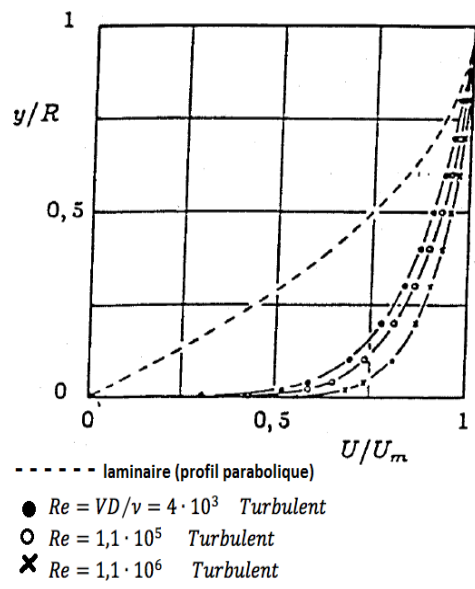


Fig.III.2 : Gradients de vitesses auprès des parois en régimes, laminaire et turbulent [24].

Le développement de la couche limite passe par trois stades, commençant par une couche limite laminaire, avant l'établissement de profil des vitesses. Lorsque ce dernier s'établit, c'est le point de transition, puis la couche limite turbulente naît.

La couche limite laminaire ne disparaît pas totalement, elle diminue dans une couche très mince, dite « sous couche limite laminaire » qui assure, auprès des parois, la diffusion visqueuse (voir fig.III.4). La tension de cette dernière est prépondérante devant la tension turbulente.

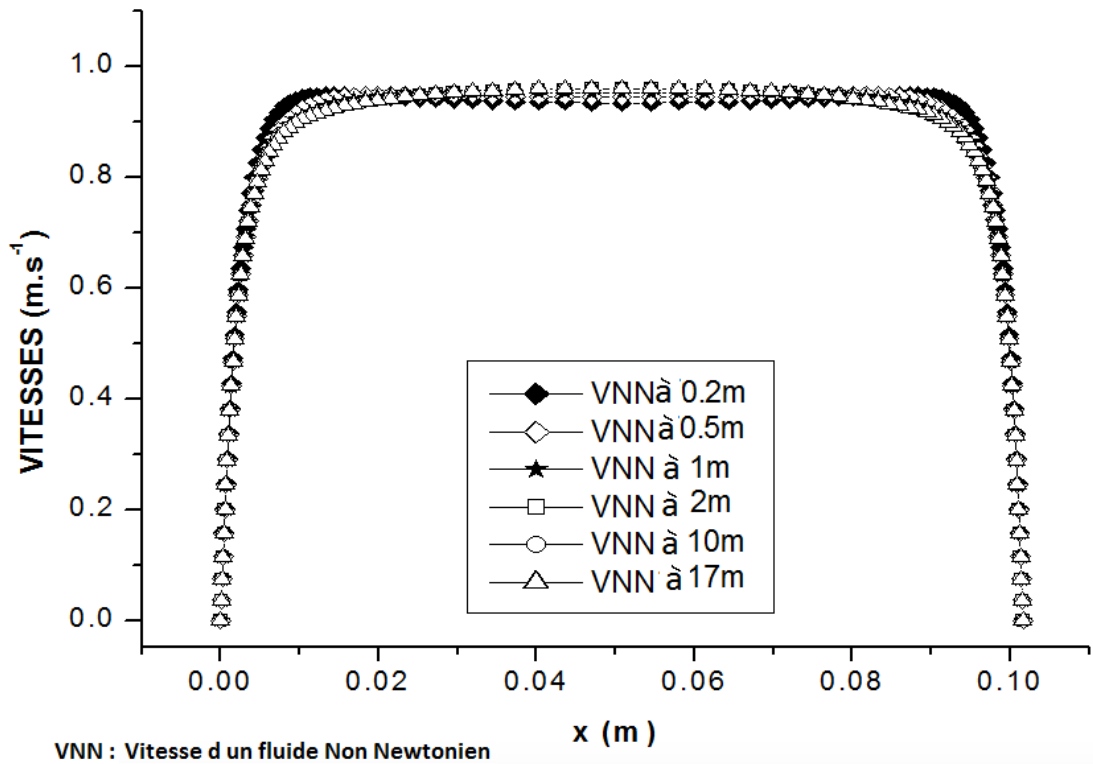


Fig.III.3 : Les profils des vitesses de la boue à base d'eau en régime transitoire.

D'après le tableau III.3, le nombre de Reynolds de l'écoulement du fluide non newtonien (la boue de forge à base d'eau) implique un régime transitoire à l'intérieur de la tige (garniture), selon [6]. Dans un tel cas, le choix de bilan énergétique conforme est primordial, comme la transition entre deux régimes d'écoulement implique soit un écoulement laminaire instable ou perturbé (appelé turbulence jeune) ou un écoulement purement turbulent, lorsque ces instabilités ou perturbations se superposent, en augmentant le degré de liberté du système d'écoulement, où il était en quelques sortes « verrouillé » par la viscosité [20].

Dans cette problématique, le choix était sur l'application d'un bilan énergétique simplifié, relevant au modèle de Navier-Stokes, comme la prescription des conditions aux limites et initiales est toujours valable. Ainsi que son échelle géométrique n'engendre pas des phénomènes tourbillonnaires assez grands [25], [20].

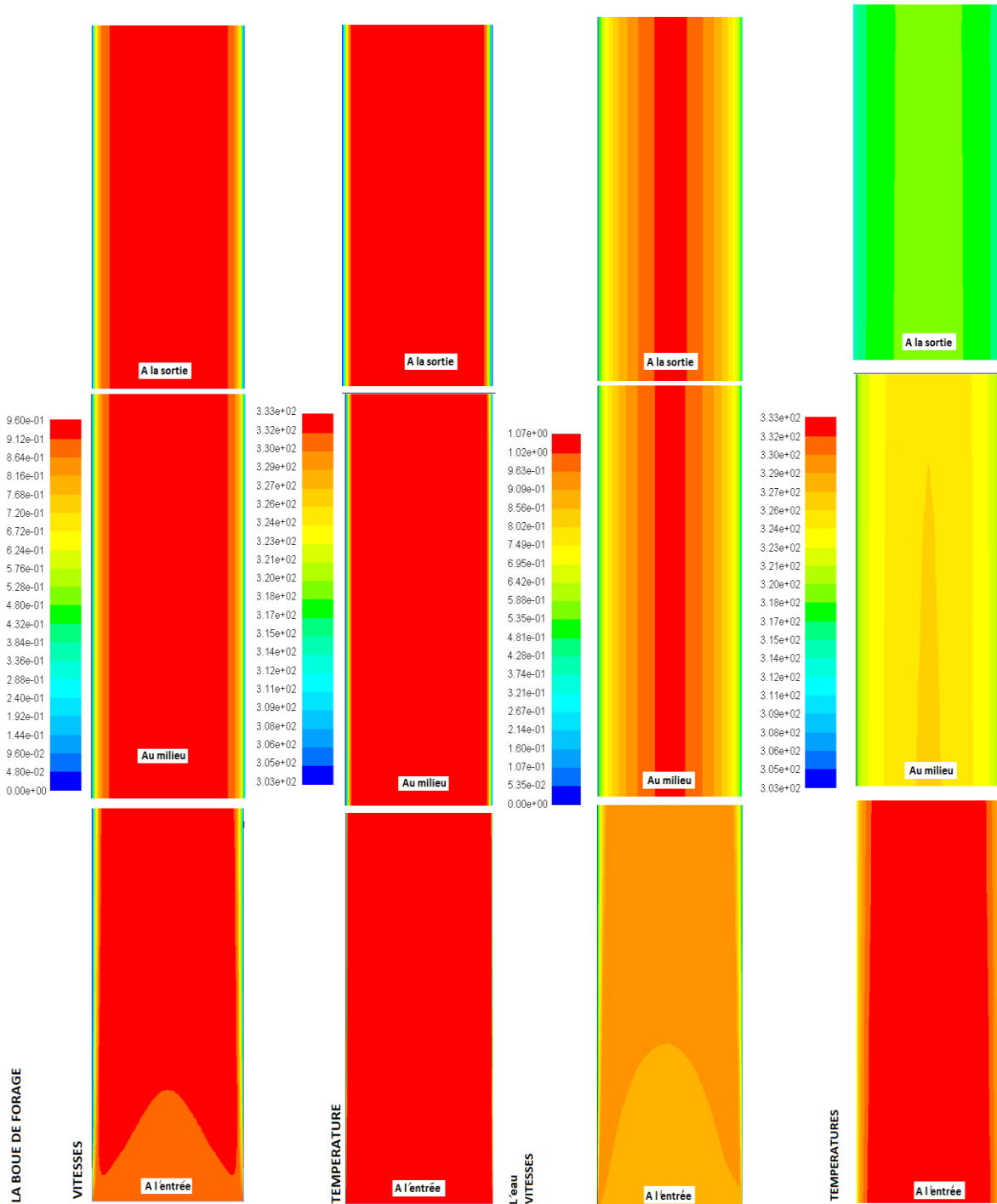


Fig.III.4 : Contours des vitesses et des températures de l'eau et la boue de forage dans la tige (à droite : l'eau et à gauche la boue de forage).

Les profils des vitesses, dans la figure.III.3, ont une forme aplatis avec un gradient plus élevé au voisinage des parois.

Conformément aux concepts traditionnels qui ont prouvé l'intérêt des fluides newtoniens, il est possible de diviser le profil de vitesses des fluides non newtoniens de type « Fluide de puissance », en régime turbulent, en trois zones (voir fig.III.5) [26]:

- Une zone proche des parois : se déplace à très basse vitesse, là où la force de cisaillement nette agisse sur tous les éléments de fluide, ce qui explique l'existence d'une contrainte de cisaillement presque constante. Ainsi que le taux de cisaillement dans cette couche doit également être constant, ou inversement, la variation de vitesse doit être linéaire dans la sous-couche laminaire.

- Une zone de transition : la région qui sépare la sous-couche visqueuse ou laminaire et le noyau totalement turbulent dominant dans la partie médiane de la tige (garniture).

- Une région entièrement turbulente : comprenant la majeure partie du flux de fluide où le transfert de quantité de mouvement est presque entièrement imputable à des tourbillons aléatoires, où les effets de la viscosité sont négligeables.

La distance d'établissement de cet écoulement est au-delà de 1 m. elle est courte par rapport à l'écoulement d'un fluide newtonien (voir fig.III.3).

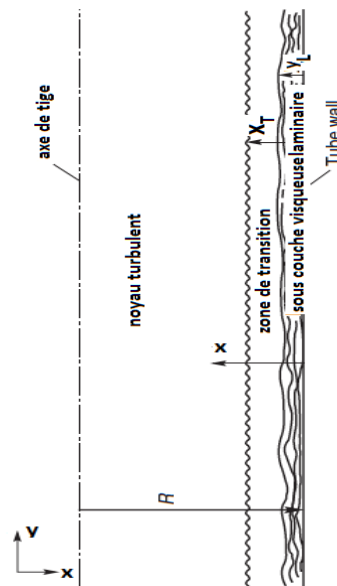


Fig.III.5 : La répartition de vitesse d'un fluide Non newtonien en régime turbulent [26].

2.1.2 Les profils de température

Le profil des températures ont les mêmes allures des vitesses citées ci-dessus, aplatis au centre de la tige, dans la région centrale de la couche limite turbulente, raides auprès des parois, vu les gradients aigus, de vitesses et de températures dans cette couche mince (voir fig.III.6 et III.7).

En turbulence, les tourbillons sont le responsable de transport de quantité de mouvement et de la chaleur, en mélangeant le fluide par agitation turbulente macroscopiques. Ce phénomène assure donc l’homogénéisation spatiale des propriétés et améliore ainsi considérablement la quantité de mouvement et la chaleur.

Les mouvements des tourbillons perdent leur intensité près des parois et diminuent à cause de l’absence de glissement et en raison de la condition d’adhérence.

Il n’est donc pas surprenant que la contrainte de cisaillement et le flux thermique de la paroi soient beaucoup plus importants en écoulement turbulent par rapport à celui en écoulement laminaire [28].

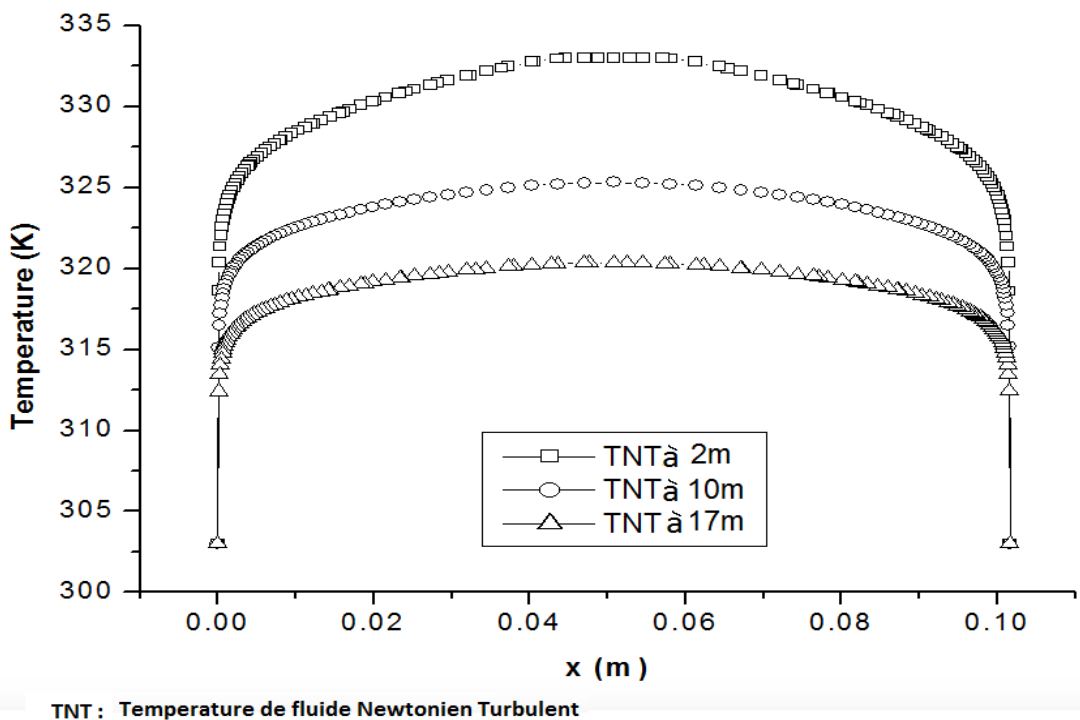


Fig.III.6 : Les profils des températures de l’eau en régime turbulent, dans la tige.

Comme l’écoulement de l’eau est en plein turbulence, elle a eu des échanges thermiques avec les parois le long de la tige. En revanche, la boue n’a pas effectuée un transfert thermique, vu qu’elle est en régime transitoire là où la vitesse d’écoulement

accélérée et la convection forcée, étaient suffisantes pour éliminer l'effet de ses propriétés physiques intrinsèques (voir fig.III.3).

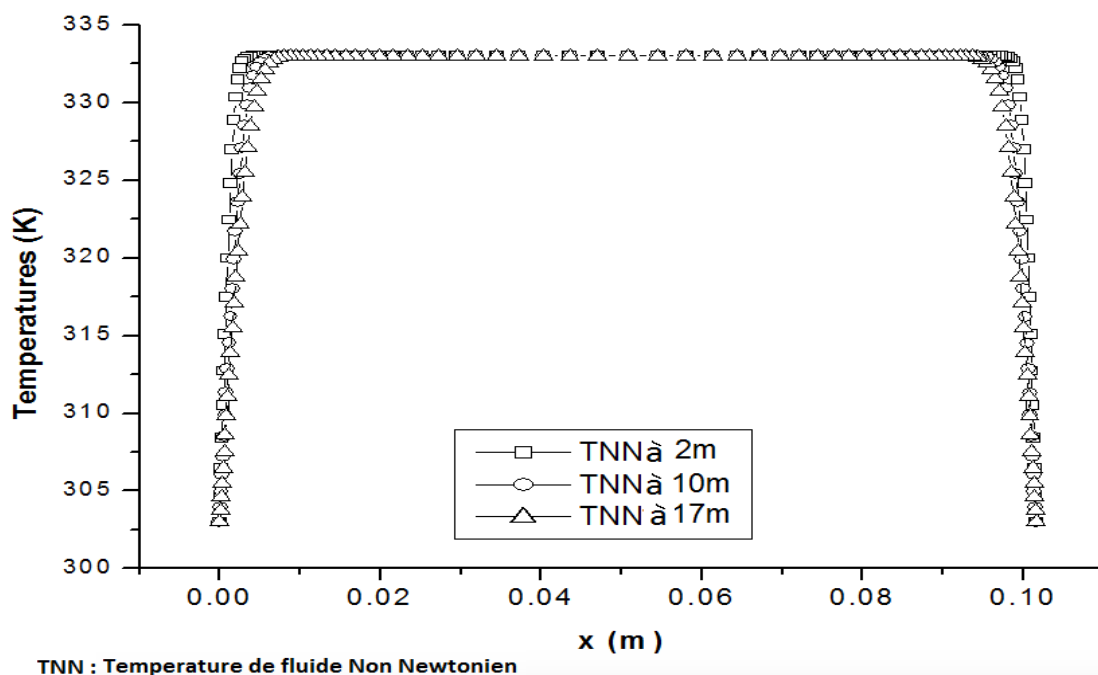


Fig.III.7 : Les profils des températures de la boue à base d'eau en régime transitoire.

2.1.3 La pression

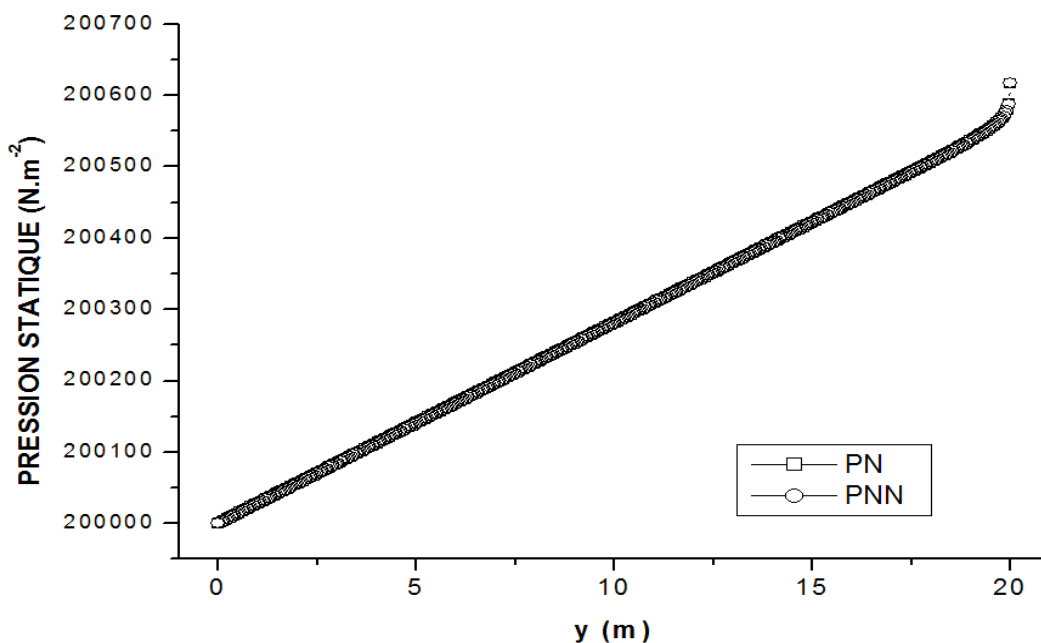


Fig.III.8 : La pression hydrostatique le long de la tige pour les deux types des fluides de forage (N : Newtonien ; NN : Non Newtonien).

Qualitativement, l'effet de gradient de pression est le même en régime turbulent qu'en régime laminaire. Mais la couche limite turbulente est moins sensible aux gradients de pressions par rapport à une couche limite laminaire, car elle résiste mieux aux phénomènes créés par ce dernier, tel que le décollement [21].

D'après la figure III.8, les pertes de charges, le long de la tige, entre les deux types des fluides de forage sont identiques.

2.2 Le 2^{ème} cas : L'espace annulaire

L'objectif dans ce cas est de voir l'effet de la rotation de la tige (garniture) sur le comportement des deux fluides choisis, étudiés dans le cas précédent, dans l'espace annulaire. Pour atteindre ce but, cet espace est considéré tantôt comme un écoulement entre deux plaques en parallèles, similaire à l'écoulement de poiseuille, lorsque la tige ne tourne pas, tantôt comme un écoulement plan de Couette, lorsque la tige se met en rotation.

2.2.1 Profils de vitesses

Les figures III.9 et III.10 montrent que les vitesses ont une allure aplatie au centre de l'espace annulaire avec des forts gradients auprès des parois, pour les deux types de fluides étudiés, selon les mêmes causes et suivant la même interprétation citée ci-dessus (voir §2.1.1).

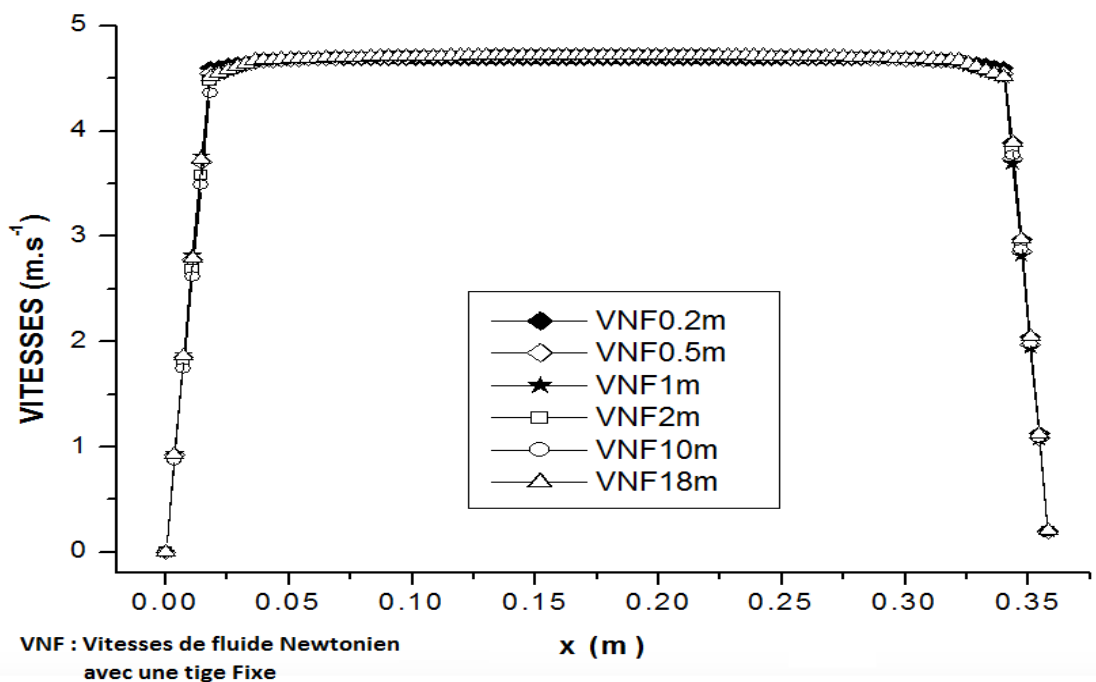


Fig.III.9 : Profils des vitesses de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

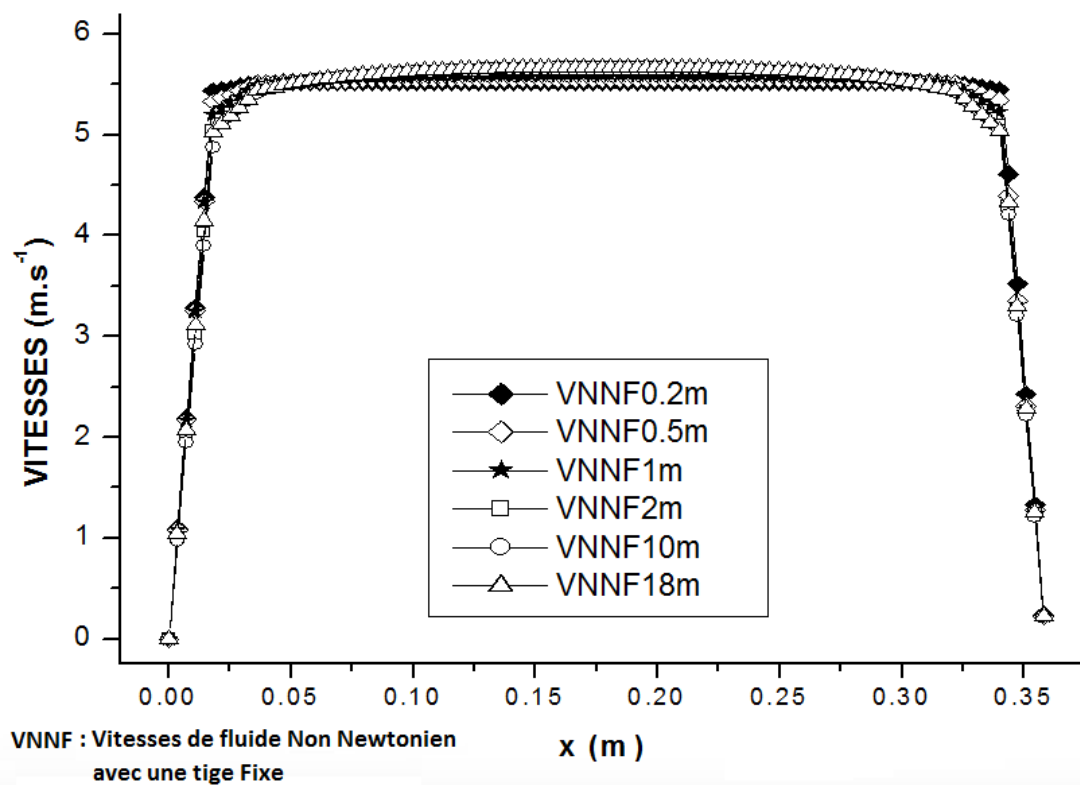


Fig.III.10 : Profils des vitesses de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

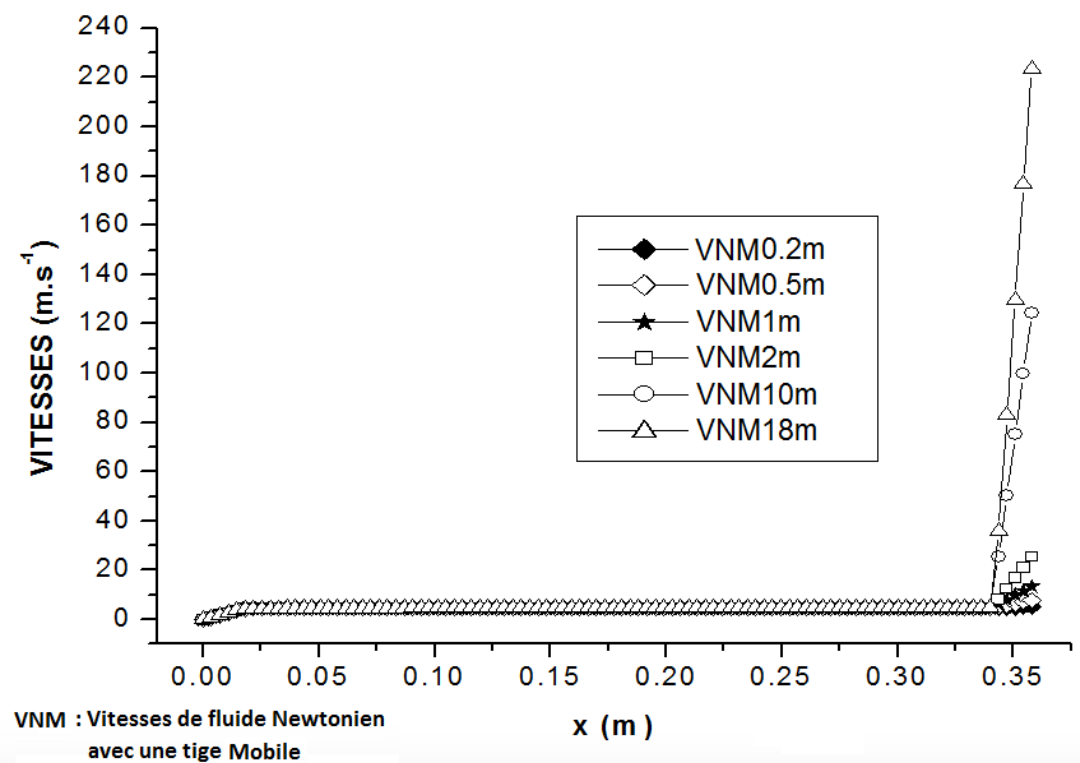


Fig.III.11 : Profils des vitesses de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

La rotation de la tige influe sur les profils des vitesses des deux fluides de forage étudiés. Les figures III.11 et III.12 sont validées par les références [6], [7] et [13]. Ce modèle d'écoulement en régime turbulent est prouvé par des corrélations empiriques. Ces profils de vitesses pour les deux fluides ne s'annulent pas auprès des deux parois, dont le maximum s'enregistre à la paroi mobile de la tige, et le minimum, en inversant le sens, s'enregistre à la paroi de la formation. Ils continuent l'allure au bord des sous couches visqueuses, auprès des deux parois. La continuité des vitesses s'allonge au large du canal sous forme d'un palier. Le passage de la sous-couche visqueuse au noyau turbulent est brutal (discontinuité dans la contrainte de cisaillement) [27].

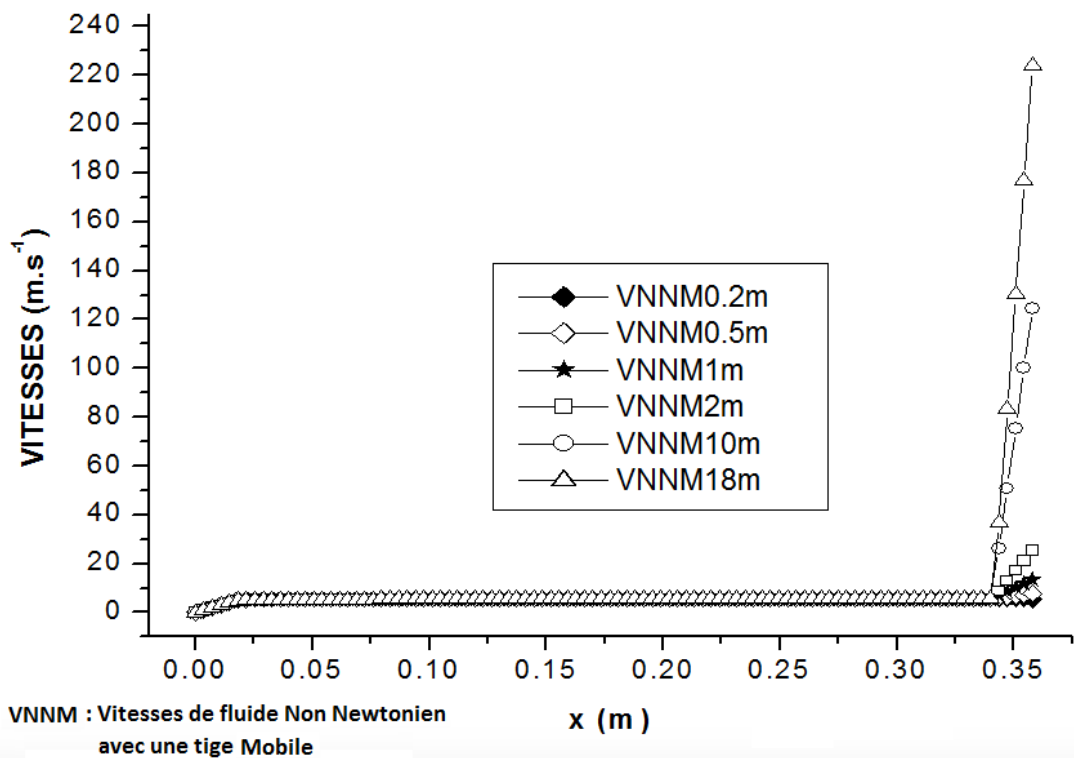


Fig.III.12 : Profils des vitesses de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

L'établissement des vitesses des deux fluides de forage, en gardant la tige fixe est rapide par rapport au cas précédent où ils circulent dans la tige. Par contre les vitesses, adjacentes à la tige mobile, des mêmes fluides ne cessent pas d'augmenter en fonction de la longueur de l'espace annulaire, en égarant le phénomène d'établissement. (Voir fig.III.9, III.10, III.11, III.12).

La couche limite asymétrique, comme c'est illustré dans la figure III.13, sur la tige en rotation, en flux axial, est constituée de deux composantes, une axiale et une autre composante circonférentielle due à la condition antidérapante à la surface du corps [27].

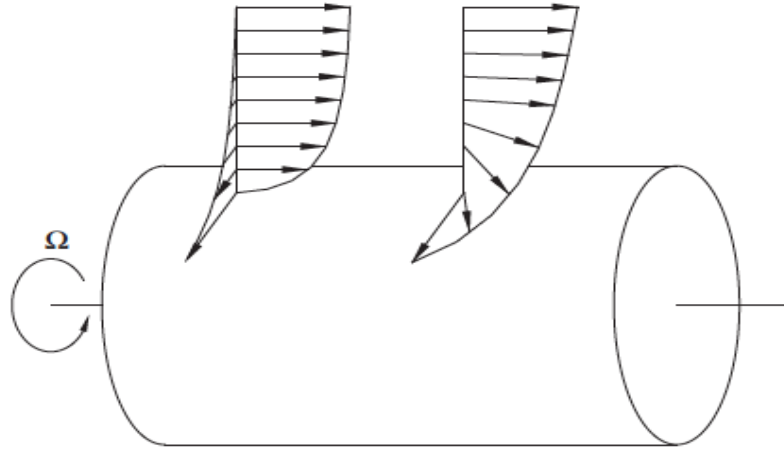


Fig.III.13 : La couche limite écoulant sur un cylindre en rotation à écoulement axial superposé [27].

Pour mieux comprendre l'effet de la rotation des tiges sur le comportement de fluide de forage, deux vitesses de rotation sont étudiées (la première vitesse égale à 8,5 rad/s et la deuxième égale à 13 rad/s).

L'accroissement de vitesse des deux fluides de forage, lorsque la tige tourne, est remarquable, car son maximum augmente de 4,5 m/s pour l'eau et de 5,5 m/s pour la boue de forage, aux environ 230 m/s. (voir fig. III.9, III.10, III.11 et III.12).

En cas de rotation, le fluide de forage, sous les conditions de glissement auprès des parois, co-tourne dans le voisinage immédiat du la tige tournante, où il soumet à l'influence de ses « forces centrifuges puissantes ».

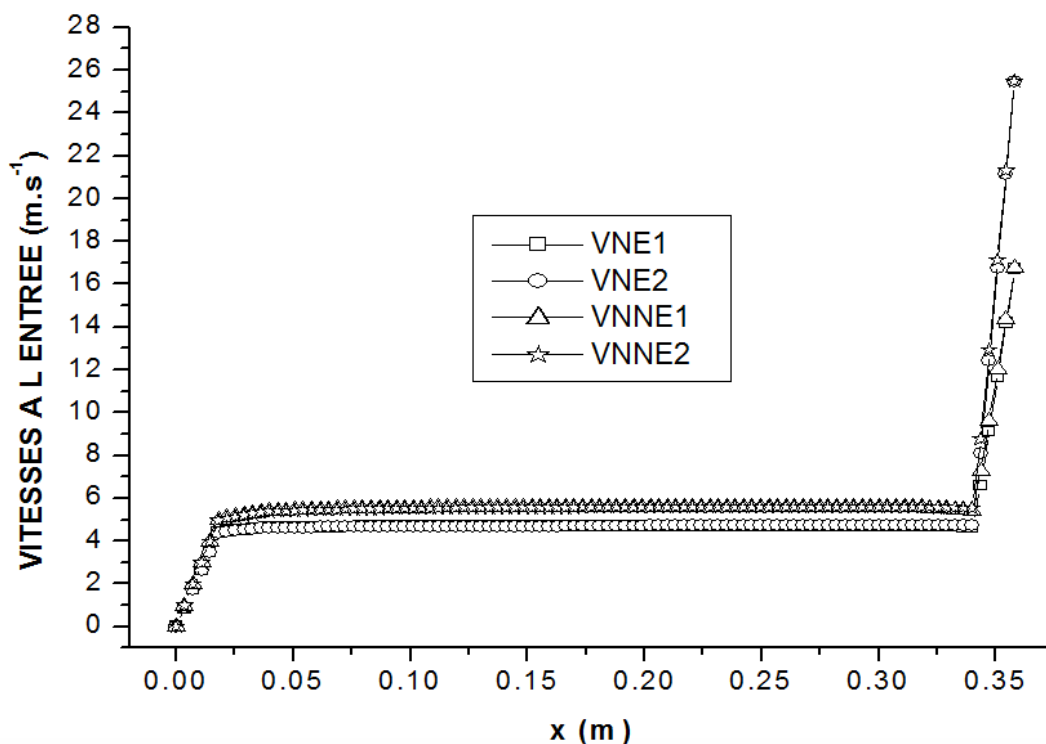


Fig.III.14 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige à l'entrée de l'espace annulaire.

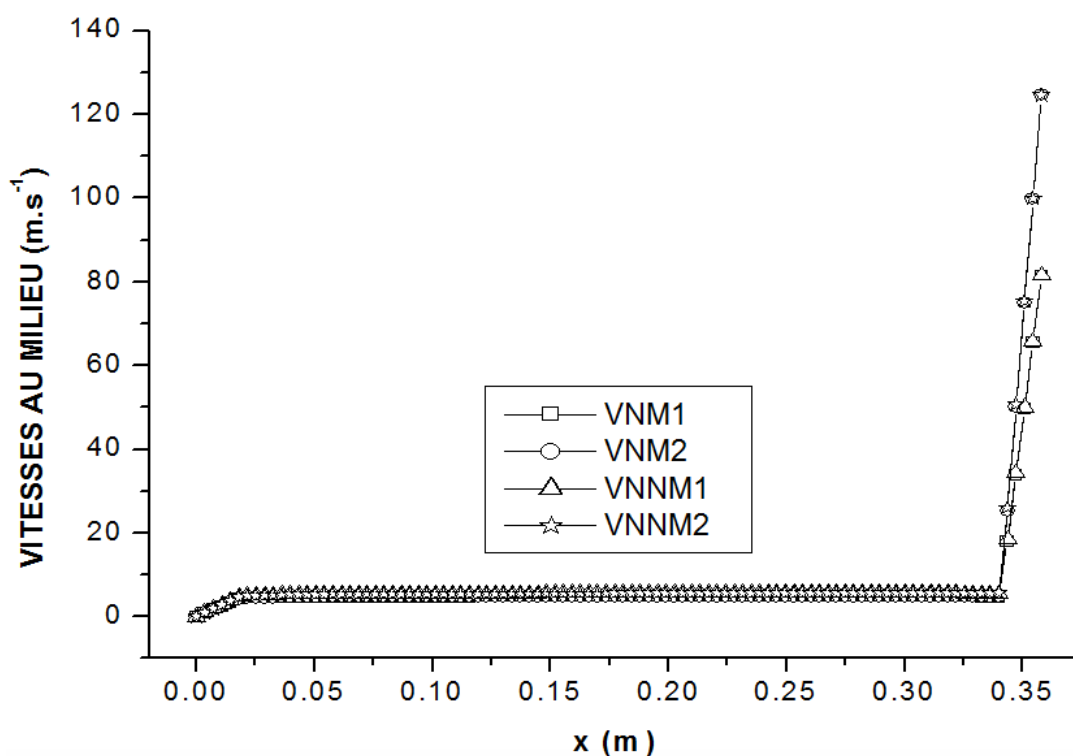


Fig.III.15 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige au milieu de l'espace annulaire.

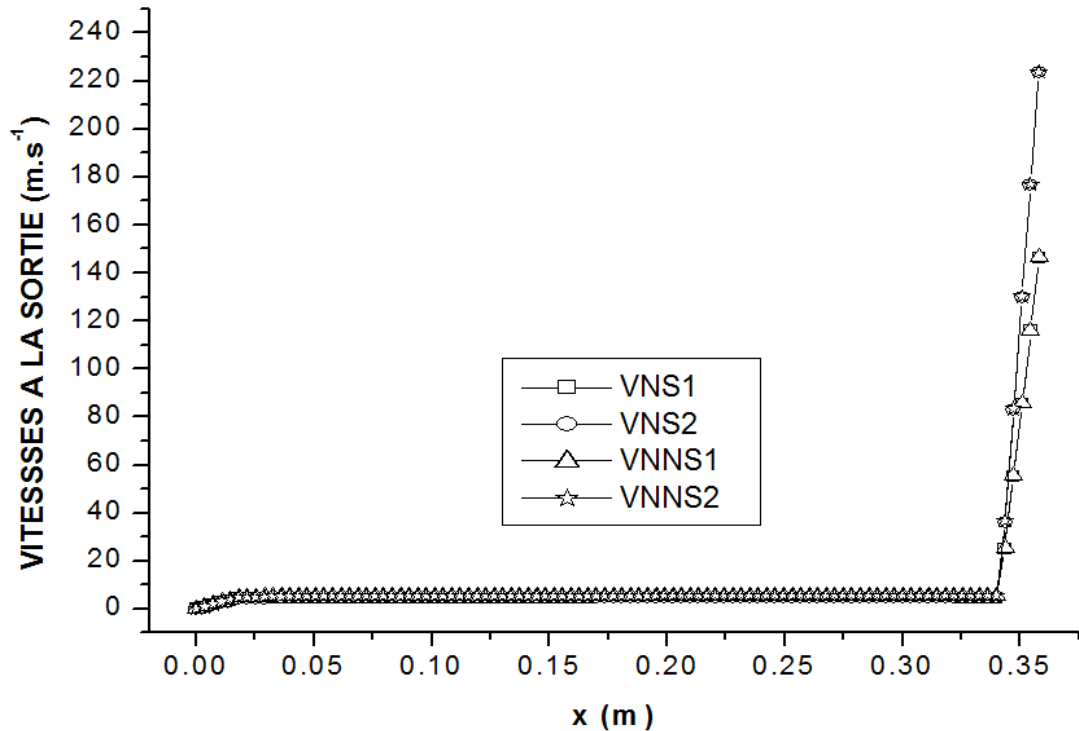


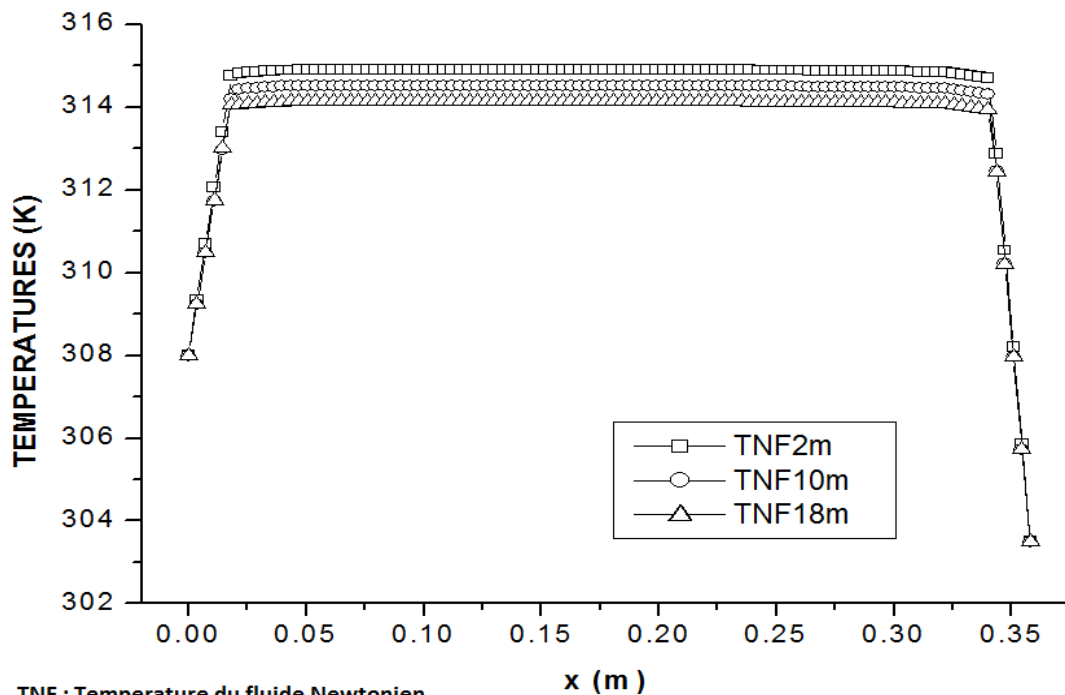
Fig.III.16 : Les vitesses des fluides de forage, Newtonien (VN) et Non Newtonien (VNN) en fonction des deux rotations de la tige à la sortie de l'espace annulaire.

Les figures III.14, III.15 et III.16, montrent même que la vitesse du fluide de forage augmente progressivement de l'entrée vers la sortie de l'espace annulaire, automatiquement la couche limite adjacente à la tige tournante se développe en fonction du paramètre de rotation [27] et en fonction de la longueur de la tige. C'est le secret qui du forage en rotary, lors de nettoyage de puits.

La rhéologie du fluide de forage joue elle-même un rôle significatif sur son déplacement dans l'espace annulaire, car le mouvement de la tige anime le phénomène de transport de la turbulence [27].

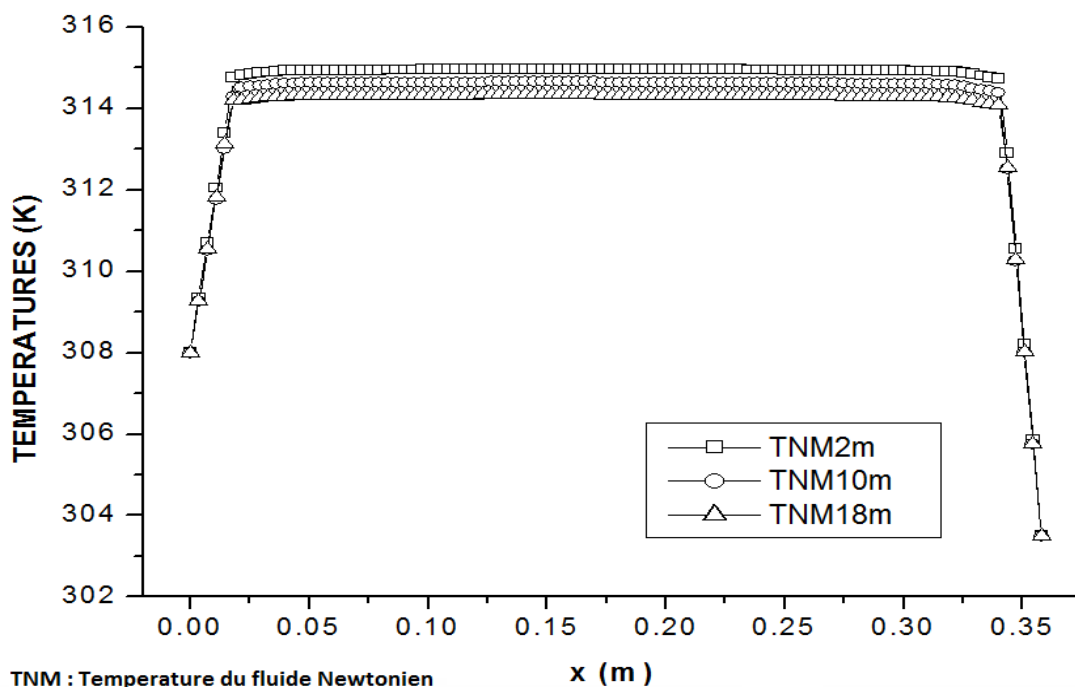
2.2.2 Profils de températures

Les profils des températures de l'eau, d'après les figures III.17 et III.18 ont une forme aplatis au centre de l'espace annulaire, là où la turbulence, comme c'est expliqué ci-dessus (voir §.2.1.2), assure le mélangeage du fluide par les grands tourbillons, en ayant la même température. Auprès des parois, ces profils marquent des droites d'une forte pente, due aux gradients importants de température. L'eau à la sortie perd de la chaleur, mais cet échange thermique avec les deux parois est faible par rapport à celui effectué le long de la tige, vu la nature de convection (forcée) au sein de ce système.



TNF : Temperature du fluide Newtonien avec une tige Fixe

Fig.III.17 : Profils des températures de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige fixe.



TNM : Temperature du fluide Newtonien avec une tige Mobile

Fig.III.18 : Profils des températures de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige fixe.

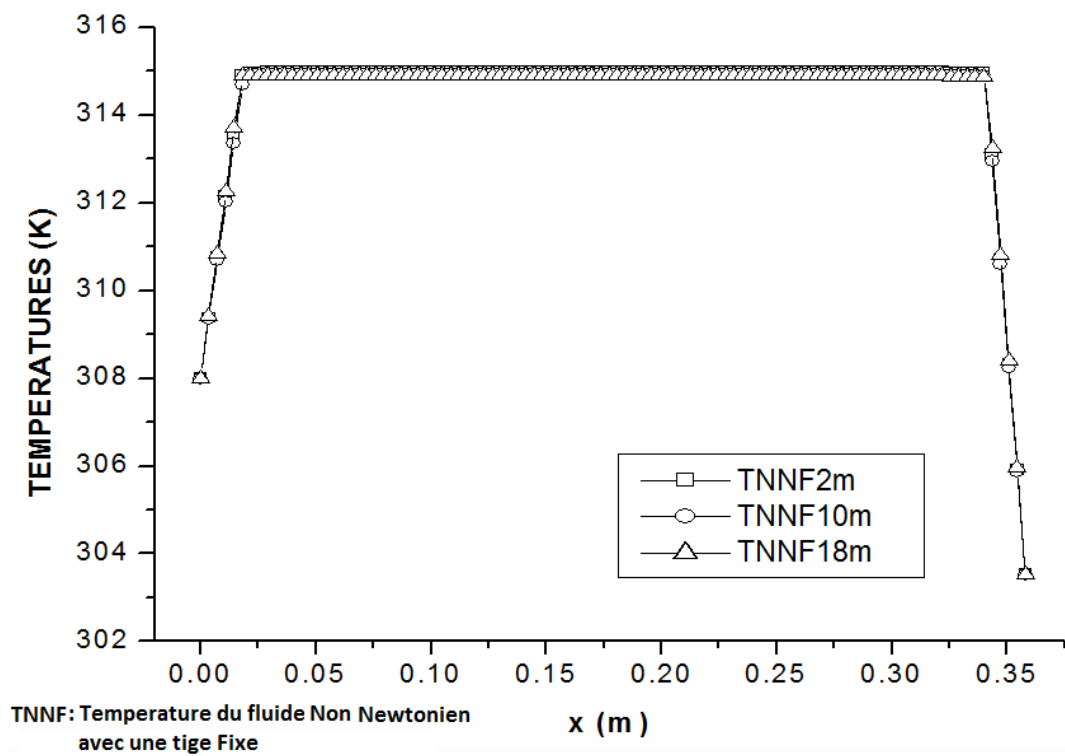


Fig.III.19 : Profils des températures de l'eau dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

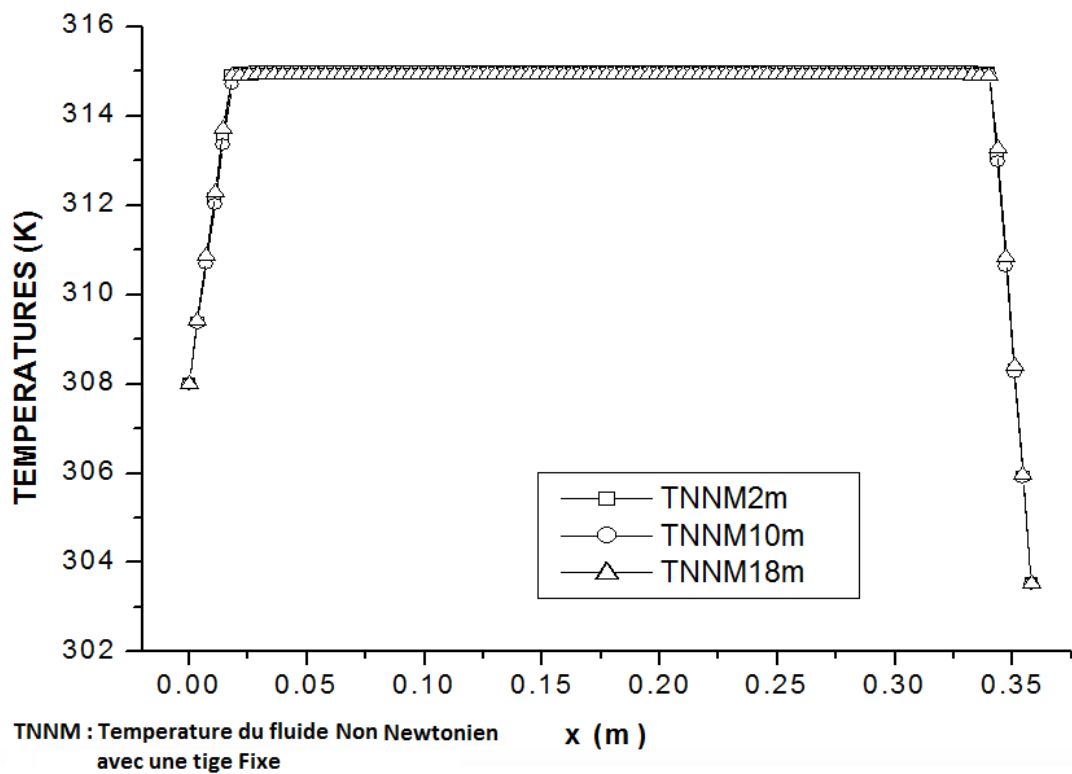


Fig.III.20 : Profils des températures de la boue de forage dans l'espace annulaire avec une tige mobile.

Sous l'influence de la même convection thermique, les figures III.19 et III.20 montrent que la boue de forage a eu le même comportement thermique de l'eau, avec un pauvre, si on ne dit pas avec absence, d'échange de températures, avec les parois.

La rotation ou la fixation de la tige n'influent pas sur le processus thermique au sein de ce système d'écoulement, vu que la convection thermique est forcée. (D'après les quatre figures de températures précédentes).



CONCLUSION

L'étude de l'écoulement turbulent en convection forcée et incompressible, de deux types des fluides de forage, newtonien (l'eau) et non newtonien (la boue à base d'eau), en première phase de forage ,après la réalisation d'un trou de 20 mètres de profondeur, à l'intérieur de garniture et dans l'espace annulaire, a confirmé les points suivants :

✓ La vitesse à la sortie de garniture et les pertes de charge le long de garniture, des deux types des fluides étudiés était presque les mêmes, ce qui confirme que la dépendance de débit de fluide de forage est liée beaucoup plus à la pression de pompage, quel que soit le type de fluide de forage.

✓ A l'intérieur de la tige et dans l'espace annulaire, les échanges thermiques entre les parois et le fluide de forage dépendent de la tension de turbulence que de la nature de fluide de forage.

✓ Dans l'espace annulaire, la rotation de garniture met le fluide de forage sous l'influence de ses « forces centrifuges puissantes », où sa vitesse ne cesse pas d'augmenter jusqu'à la surface. Ce mécanisme confirme l'utilité, l'efficacité et l'influence remarquable de forage rotary sur le déplacement de fluide de forage le long des trajectoires ci élevées.

Cette étude nécessite encore des améliorations et des compléments tels que :

- Déclaration des températures des parois selon les gradients au niveau de la formation et de garniture pour approcher encore de la réalité.
- Etude de jet à la sortie de l'outil de forage.
- Utilisation d'autres types de fluide de forage.

- [1] www.petrowiki.org/Hole_cleaning (20/05/2019).
- [2] Jean-Paul NGYEN. Techniques d'exploitation pétrolière, Le forage, 1993.
- [3] Module 1, Formation JDF, A. Slimani et M. Daddou, Division forage .Département formation. Mars 2004.
- [4] ASME Shale Shaker Committee, Drilling fluids processing handbook, American Association of drilling engineers, 19th November 2004.
- [5] Azar, J., Pilehvari, A. and Shizari, S.: "State of the Art Cuttings transport in horizontal wellbores, Drilling and Completion. SPE, September 1999.
- [6] Robert F. Mitchell and Stefan Z. Miska, Fundamentals of drilling engineering. Society of petroleum engineers. v12. 2011.
- [7] J.J. Azar and G. Robello Samuel, Drilling engineering, Technology & Engineering, 2007.
- [8] Drilling fluids manual, Amoco production company, Louisiana State University.
- [9] Hole cleaning and Hydraulics, Unegbu Celestine Tobenna, Stavanger, June 2010.
- [10] Guo, Boyun, Applied drilling circulation systems: hydraulics 2011.
- [11] Enspm. Ifp Training, Les Diagraphies Gamma, 2004.
- [12] Drilling engineering. Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, 1999.
- [13] Bourgoyne, A.T., Chenevert, M.E., Millheim, K.K., et Young, F.S. Jr. Applied drilling engineering. Textbook Series, SPE. 1991.
- [14] Dr. Bill Mitchell, Oilwell drilling engineering 1974 to Mitchell Engineering.10th Edition, 1st Revision, July 1995.
- [15] Azar, J., Pilehvari, A. and Shizari, S.: "State of the Art Cuttings transport in horizontal wellbores, Drilling and Completion. SPE, September 1999.
- [16] Daniel D. Joseph, Toshio Funada and Jing Wang, Potential flows of viscous and viscoelastic fluids, Cambridge University Press, 2007.
- [17] Azeddine Soudani, simulation de la combustion turbulente non –premelangee par le modèle « L.E.S »,2006.
- [18] ZANGA Joseph Maurency, Modélisation et simulation des écoulements dans les centrales hydroélectriques, Mémoire d'ingénieur de l'université du Québec en Abitibi Témiscaminque, 2018.
- [19] Vebjorn Langaker, A temperatures model for extended reach drilling application, Master's Thisis, Universitetet i Stavanger, 2017.
- [20] P. CHASSING, Turbulence en mécanique des fluides: Analyse du phénomène en vue de sa modélisation à l'usage de l'ingénieur, CEPADUES, 2000.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [21] J. COUSTEIX, Aérodynamique : Turbulence et couche limite, CEPADUES, 1989.
- [22] R.OUZIAUX et J.PERRIER, Mécanique des fluides appliquées, 3ème édition, Dunod, 1978.
- [23] B.E.Lauder et D.B.Spalding. The numerical computation of turbulent flows. Imperial college of science and technology, Department of mechanical engineering, Exhibition Road, March 1974.
- [24] H. Schlichting , K. Gersten, Boundary-Layer Theory, 8ème édition, edition Springer, 2000.
- [25] J. Padet, FLuides en écoulement : modèles et méthodes, édition Elsevier et Masson, 2000
- [26] J.F. Richardson R.P. Chhabra; Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications, 2nd edition, March 2008.
- [27] P. R.N. Childs, Rotating Flow, édition Elsevier, 2011.
- [28] Y. A. CENGEL, Heat transfer (a practical approach), 2nd edition, McGraw-Hill, 2003.