

Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des hydrocarbures, des énergies renouvelables et des sciences de la terre
et de l'univers Département Forage et MCP

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme Master

Option : Forage

Thème :

**Simulation de l'écoulement de fluide de
forage à travers l'outil de forage
Tridimensionnel**

Présenté Par :

✚ BENREGUIG AYMEN

✚ MERABET Mohamed Taha

✓ Soutenu le 13/06/2023

Devant le jury :

Mme. Chaiche Zineb

MCB UKM Ouargla

président

Mr. Hadjab Riad

MCB UKM Ouargla

examineur

Mme. Hadjadj Souad

MCB UKM Ouargla

encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Abstract:

This work uses a 3D numerical simulation of the drilling fluid as it passes through the drilling tool using the ANSYS-Fluent 19.2 solver. The flow is turbulent, forced, and incompressible, the liquid is non-newtonian obeyed by the law of power and the drilling tool is a three-throated jet, equipped with three nozzles.

This study aims to understand the phenomenon of pressure drop in the drilling bit and the dynamic and thermal behavior of the drilling fluid.

The results show that geometric singularities are the primary cause of the pressure drop in the drilling tool.

Keywords: turbulence, drilling fluid, drilling tool with three-throated jet, pressure drop, power law.

الملخص

يستخدم هذا العمل المحاكاة العددية ثلاثية الأبعاد لسائل الحفر أثناء مروره عبر أداة الحفر بواسطة البرنامج ANSYS-Fluent 19.2.

التدفق مضطرب، منتظم، قسري وغير قابل للضغط، والسائل غير نيوتوني يخضع لقانون الاستطاعة وأداة الحفر عبارة عن تريكون نفاث، ومجهزة بثلاثة مخارج.

الهدف من هذه الدراسة هو فهم ظاهرة انخفاض الضغط في أداة الحفر والسلوك الديناميكي والحراري لطين الحفر، أثناء ذلك.

تظهر النتائج أن السبب الرئيسي لانخفاض الضغط في أداة الحفر هو التغيرات الهندسية.

الكلمات المفتاحية : تدفق مضطرب، طين الحفر، تريكون نفاث، سائل الحفر، انخفاض الضغط

Résumé :

Ce travail utilise la simulation numérique en 3D du fluide de forage lorsqu'il traverse l'outil de forage en utilisant le solveur ANSYS-Fluent 19.2. L'écoulement est turbulent, forcé et incompressible, le fluide est non-newtonien obéit par la loi de puissance et l'outil de forage est un tricône à jet, dotés par trois duses.

L'objectif de cette étude est de comprendre le phénomène de chute de pression dans l'outil de forage et le comportement hydrodynamique et thermique du fluide de forage.

Les résultats montrent que le premier responsable de la chute de pression dans l'outil de forage sont les singularités géométriques.

Les mots clés : turbulence, fluide de forage, tricône à jet, la loi de puissance, chute de pression



Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.

*Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à Notre encadreur **Mme. HADJADJ Souad**, pour sa précieuse aide, ces orientations et le temps qu'elle nous accordé pour l'encadrement.*

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister cette soutenance.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à 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.

Merci à tous et à toutes.

BENREGUIG AYMEN, MERABET MOHAMED TAHA



*Je dédie ce modeste travail comme un témoignage
d'affection, de respect et d'admiration*

*A mon très **cher père***

*Pour m'avoir soutenu moralement et matériellement jusqu'à ce jour, pour son
amour, et ses encouragements. Que ce travail, soit pour vous, une déclaration de ma
Profonde gratitude et reconnaissance.*

*A ma très **chère mère***

*Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré
d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et
affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé jamais de me soutenir et de
m'encourager durant toutes les années de mes études.*

Qu'ALLAH vous protège et vous donne la santé, le bonheur et la longue vie

*A mon **frère Adam** et Mes **Sœurs***

*A toute la **famille** et à tous mes chers **Amis***

B. Ayman



*Je dédie ce modeste travail comme un témoignage d'affection,
de respect et d'admiration*

*A mon très **cher père***

Pour m'avoir soutenu moralement et matériellement jusqu'à ce jour, pour son amour, et ses encouragements. Que ce travail, soit pour vous, une déclaration de ma Profonde gratitude et reconnaissance.

*A ma très **chère mère***

Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé jamais de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études.

Qu'ALLAH vous protège et vous donne la santé, le bonheur et la longue vie

*A mon **frère** et Ma **Sœur***

*A toute la **famille** et à tous mes chers **Amis***

M.Mohamed Taha

SOMMAIRE

Abstract.....	2
الملخص.....	2
Résumé.....	2
Remerciements.....	3
Dédicaces.....	4
Sommaire.....	6
Liste des tableaux.....	8
Liste des figures.....	8
Nomenclature.....	10
INTRODUCTION.....	13
CHAPITRE I : GENERALITES.....	14
I.1. Définition de Fluide de forage.....	15
I.2. Caractéristique rhéologiques.....	15
I.3. Fluide pseudo plastique ou la loi de puissance.....	16
I.3.1. Définition et courbe typique.....	16
I.3.2. Indice de consistance du fluide et indice de comportement du flux.....	17
I.3.3. Détermination de l'indice de comportement d'écoulement n et de l'indice de consistance K dans un viscosimètre Fann.....	17
I.4. L'écoulement Turbulent.....	18
I.5. L'outil de forage à molettes (Tricônes)	22
a. Tricône conventionnelle.....	22
b. Tricône à jets.....	23
I.6. L'hydraulique à l'outil à molettes (Tricône).....	24

I.7. L'écoulement à travers un tricône à molette.....	24
CHAPITRE II : Formulations mathématiques et numériques.....	27
II.1. Description de la problématique et modélisation	28
II.2. Formulation mathématique.....	30
II.2.1. Modèle mathématique k- ϵ de turbulence.....	32
II.2.2. Les nombres adimensionnels	32
II.3. Formulation numérique.....	33
II 3.1. Méthode des volumes finis.....	34
II 3.2. Les conditions aux limites.....	34
II 3.3. Les schémas utilisés sur le solveur Ansys-Fluent.....	35
II 3.4. Maillage.....	36
II 3.4.1 Indépendance de maillage.....	36
CHAPITRE III : RESULTA ET DISCUSION.....	39
III.1. Hypothèses et conditions aux limites	40
III.1.1. Les caractéristiques physiques de fluide de forage utilisé.....	40
III.1.2. Les conditions aux limites	40
III.2. Résultats et discussions	41
III .2.1. Les profils de vitesses	41
III.2.2. Les profils de température.....	46
III.2.3. Les profils de pression	49
CONCLUSION.....	51
Références bibliographiques.....	53

Liste des tableaux :

TABLEAU II.1: LES CONDITIONS AUX LIMITES APPLIQUEES A L'INTERIEURE DE L'OUTIL	34
TABLEAU II.2: LES CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DE L'EAU	35
TABLEAU II.3: LE REGIME D'ECOULEMENT CALCULE.....	35
TABLEAU II.4: TABLEAU COMPARATIF DES MAILLAGES PROPOSES	37
TABLEAU III.1: LES CARACTERISTIQUES THERMOPHYSIQUES DE LA BOUE DE FORAGE BENTONITIQUE	40
TABLEAU III.2: LES REGIMES D'ECOULEMENT DES FLUIDES DE FORAGE A TRAVERS L'OUTIL....	41

Liste des figures :

FIGURE I.1: COURBE D'ECOULEMENT DES FLUIDES A LOI DE PUISSANCE.	17
FIGURE I.2: DETERMINATION DES PARAMETRES RHEOLOGIQUES FLUIDES DE LA LOI DE PUISSANCE	18
FIGURE I.3: RUGOSITE RELATIVE D'UNE CONDUITE.....	20
FIGURE I.4: CORRELATION DE BLASIUS POUR DIVERS FLUIDES DE LOI DE PUISSANCE.....	21
FIGURE I.5: CORRELATION DE VON KARMAN POUR DIVERS FLUIDES DE LOI DE PUISSANCE	21
FIGURE I.6: OUTIL TRICONE REELLE	23
FIGURE I.7: LE PASSAGE DU FLUIDE A TRAVERS LES TRICONES. À DROITE : OUTIL A JET (3 DUSES), A GAUCHE : OUTIL CONVENTIONNEL A CIRCULATION CENTRALE.....	24
FIGURE I. 8: L'ECOULEMENT A TRAVERS L'OUTIL TRICONE.....	26
FIGURE I.9: L'ECOULEMENT A TRAVERS LA DUSE.....	24
FIGURE II.1: LA ZONE DE CIRCULATION DE LA BOUE DE FORAGE DANS UN TRICONE A JET, A. UNE COUPE TRIDIMENSIONNELLE REELLE, B. UNE PROJECTION VERTICALE BIDIMENSIONNELLE, C. ILLUSTRATION TRIDIMENSIONNELLE	28
FIGURE II.2: LA ZONE DE CIRCULATION DE LA BOUE DE FORAGE, EN HAUT LA PROJECTION VERTICALE ET EN BAS LA PROJECTION HORIZONTALE.....	29
FIGURE II.3: LE MODELE DE LA ZONE DE CIRCULATION DE LA BOUE DE FORAGE DANS L'OUTIL DE FORAGE CREER SUR ANSYS DESIGN MODELER, A. LA PROJECTION HORIZONTALE, B. PROJECTION VERTICALE, C. MODELE EN 3D	30
FIGURE II.4: LES PROFILS DES VITESSES POUR LES DIFFERENTS MAILLAGES ETUDIES	37
FIGURE II.5: LE MAILLAGE DU 5EME CAS CHOISI, A. DE L'EXTERIEUR, B. UNE PROJECTION VERTICALE.....	38

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

FIGURE II.6: LE MAILLAGE DU 5EME CAS CHOISI, A. LA PROJECTION HORIZONTALE, B. LA PROJECTION VERTICALE D'UNE DES DUSES	38
FIGURE III.1: LE CONTOUR DE VITESSE DE LA BOUE EN REGIME TURBULENT DANS LE CYLINDRE	42
FIGURE III.2: LE PROFIL DE VITESSE DANS LE CYLINDRE	42
FIGURE III.3: LE CONTOUR DE VITESSE DANS LES DUSES, A. A 0°, B. A 120°, C. A 240°	44
FIGURE III.4: LES PROFILS DES VITESSES DANS LE COUDE 3.....	44
FIGURE III.5: LES PROFILS DES VITESSES DANS LA DUSE 3.....	45
FIGURE III.6: LE CONTOUR DE TEMPERATURE D'UN ECOULEMENT TURBULENT DE LA BOUE DANS L'OUTIL	47
FIGURE III.7: LE PROFIL DE TEMPERATURE D'UN ECOULEMENT TURBULENT DE LA BOUE DANS CYLINDRE	47
FIGURE III.8: LES PROFILS DES TEMPERATURES DANS LE COUDE 3.....	48
FIGURE III.9: LES PROFILS DES TEMPERATURES DANS LA DUSE 3.....	48
FIGURE III.10: LE CONTOUR DE PRESSION STATIQUE DANS L'OUTIL.....	50
FIGURE III.11: LE CONTOUR DE PRESSION DYNAMIQUE DANS L'OUTIL, A. EN PROJECTION VERTICALE, B. A L'ORIFICE ET LA COURBURE DU COUDE	50

Nomenclatures :

C_p	Chaleur spécifique [j/kg. K]
C_d	Facteur de correction
D_h	Diamètre intérieure [m]
k	l'énergie cinétique turbulente [m^2/s^2]
K	Indice de consistance [kg.s.n-2.m-1]
n	Indice du comportement
p	Pression hydrostatique [Pa]
p_s	Pression hydrostatique a la sortie de l'outil [Pa]
Q	débit du fluide de forage [m^3/s]
Re	Reynolds
T	Température [K]
T_P	Température isotherme aux parois de la tige [K]
T_0	Température A l'entrée de l'outil de forage [K]
μ	viscosité dynamique [kg/m.s]
μ_T	viscosité turbulente locale [kg/m.s]
μ_a	viscosité apparente en [cp]
u, v, w	Composantes du champ de vitesse [m/s]
V_n	la vitesse aux duses
V_0	vitesse du fluide de forage [m/s]
x, y, z	Coordonnées Cartésiennes
Y_p	Contrainte seuil [Pa ou en $lb/100ft^2$]

τ	contrainte de cisaillement [Pa]
ρ	Masse volumique de la boue de forage [kg/m^3]
ν	Viscosité cinématique [m^2/s]
ε	Taux de dissipation d'énergie en turbulence [m^2/s^3]
Γ_T	La diffusivité turbulente. [W/m.K]
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement en [S^{-1}]
λ	Conductivité thermique [W/m.K]
CFD	Computational fluid dynamics
EDP	équations aux dérivées partielles
3D	Tridimensionnel

INTRODUCTION :

INTRODUCTION :

L'outil de forage est l'élément perforateur de la roche. Il démantèle la roche grâce à plusieurs rangés de dents ou cutters.

Les outils molettes sont souvent dotés de trois cônes (Tricône) ou rarement de deux cônes (bicône). Il est constitué de trois parties principales : les mollettes, les roulements et le corps de l'outil. Les cônes tournent de façon indépendante et sont montés sur trois bras réunis entre eux par soudure constituant le corps de l'outil.

Le logement à l'intérieur de l'outil de forage est invisible par rapport à ses composantes visibles citées ci-dessus, mais il réferme une opération si importante, identique en valeur, à la perforation de la roche, la circulation de la boue de forage, qui assure, le nettoyage de l'outil et du trou, la lubrification, ...etc.

Cette étude concerne l'écoulement permanent, turbulent, forcé et incompressible, d'un fluide non newtonien, obéit par la loi de puissance, dans l'outil de forage, pour mieux comprendre le comportement hydraulique et thermique de ce fluide, ainsi que le phénomène connu de chute de pression dans cette zone.

L'écoulement est simulé numériquement en trois dimensions, par la méthode des volumes finis, en utilisant le code Ansys Fluent 19.2 pour la résolution d'un bilan énergétique, composé de 7 équations différentielles du second ordre.

Ce travail est considéré comme une suite à celui intitulé « Simulation d'un écoulement turbulent incompressible et forcé d'un fluide de forage à travers l'outil de forage », réalisé en 2021. Cette simulation a été en deux dimensions et le travail actuel est en trois dimensions, pour encore éclaircir le comportement dans les duses, les éléments les plus sensibles dans le système de circulation de la boue.

Le travail comporte trois chapitres : le premier chapitre comprend des généralités sur le fluide de forage et sa rhéologie ainsi que l'hydraulique à l'outil à molettes (tricônes). Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leurs interprétations en utilisant la modélisation géométrique, mathématique et numérique dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE I :

Généralités

L'outil de forage est l'élément le plus basique utilisé pour forer, et le choix des meilleures conditions de fonctionnement de ce dernier est l'un des problèmes les plus fondamentaux auxquels il est confronté. Une très grande variété des outils de forage sont fabriqués pour différentes situations rencontrées lors des opérations de forage. Il est important de savoir les bases de la conception de l'outil afin qu'il puisse comprendre pleinement les différences entre les différents outils disponibles.

Le fluide ou communément appelé la boue de forage reste en contact avec le puits le long de l'opération de forage. Lors du forage, un volume de fluide est injecté dans le train de tiges, sortant du trépan dans l'espace annulaire tige-puits et montant jusqu'à la surface pour l'enlèvement des débris solides de coupe ou pour le nettoyage du puits, selon les besoins.

Ce chapitre entame des généralités sur la rhéologie du fluide de forage et l'hydraulique d'un tricône à jet, les deux éléments importants pour cette simulation.

I.1. Définition de Fluide de forage :

La boue de forage qui, à l'origine était considérée uniquement comme un véhicule de transport des déblais de forage jusqu'en surface, actuellement, elle est reconnue comme un facteur majeur pour le succès d'une opération de forage.

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système des fluides non newtoniens, visqueux ou viscoplastiques composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argile, polymères, tensioactifs, déblais, ciment,...).

I.2. Les caractéristiques rhéologiques :

À une température et une pression données, les fluides sont caractérisés par [1] :

A. Leur comportement dans des conditions transitoires, telles que manifestées par leur temps de réponse aux conditions modifiées de l'écoulement.

B. Leur comportement en flux laminaire, est caractérisé par leur courbe d'écoulement expérimentale, ou rhéogramme. Les coefficients constants de l'équation d'écoulement représentée par cette courbe sont des paramètres rhéologiques, spécifiques au fluide particulier. Si l'écoulement est laminaire, l'équation de l'écoulement relie la contrainte de cisaillement τ avec la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

Pour un fluide donné, il varie selon la température et la pression. Nous avons dit que dans le

flux laminaire le fluide est cisailé en couches laminaires, parallèlement à la direction de l'écoulement, chaque couche se déplaçant à sa vitesse spécifique. Nous pouvons donc définir :

(a) **Un taux de cisaillement** : est le rapport suivant

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{\text{différence de vitesse entre deux couches adjacentes}}{\text{distance entre les deux couches}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (\text{I.1})$$

(b) **Une contrainte de cisaillement**, qui est la force par unité de surface de la couche laminaire qui provoque le cisaillement. c.-à-d. que τ a les dimensions de la pression. Elle est souvent exprimée en (lb/100 ft) ou (lb force/100 ft²), dans le Système international d'unités (SI) en Pascal (Pa).

Pour un taux de cisaillement donné, la viscosité apparente μ_a est définie par l'équation :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.2})$$

Où τ est la contrainte de cisaillement menant à $\dot{\gamma}$.

μ_a à les dimensions de la viscosité.

Dans le système SI, μ_a est exprimé en pascal-seconde (Pa. s). L'unité habituellement utilisée est son sous-multiple - le millipascal- seconde (mPa • s). Elle est égale au centipoise (cP).

(c) Leur comportement au repos, manifesté par la formation de gel après un certain temps, **pour les fluides thixotropes.**

Un fluide est thixotrope si :

- a) Il forme un gel après avoir été secoué et laissé debout.
- b) Il revient à son état initial après avoir été secoué de nouveau.

À température et pression constantes, le comportement thixotrope est réversible.

I.3. Fluide pseudo plastique ou la loi de puissance :

I.3.1. Définition et courbe typique :

Les fluides pseudo-plastiques, comme les fluides newtoniens, s'écouleront sous n'importe quel stress appliqué, aussi petit soit-il. Mais, à la différence des fluides newtoniens, la contrainte de cisaillement n'est pas proportionnelle à la vitesse de cisaillement, mais à sa nth puissance ; d'où le nom de fluides de loi de puissance. L'équation du flux est :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (\text{I.3})$$

Où K est l'indice de cohérence ou de consistance en $[\text{Pa} \cdot \text{s}^n]$ ou en $[\text{lb} \cdot \text{s}^n / 100 \text{ ft}^2]$, et n est l'indice de comportement d'écoulement, il est sans dimension. Il peut avoir comme valeur l'unité ou plus petit que l'unité. Si n égale à l'unité, l'équation devient identique à l'équation d'écoulement d'un fluide newtonien ayant la viscosité K .

La figure I.1 représente les courbes d'écoulement d'un fluide de loi de puissance en coordonnées cartésiennes et logarithmiques respectivement.

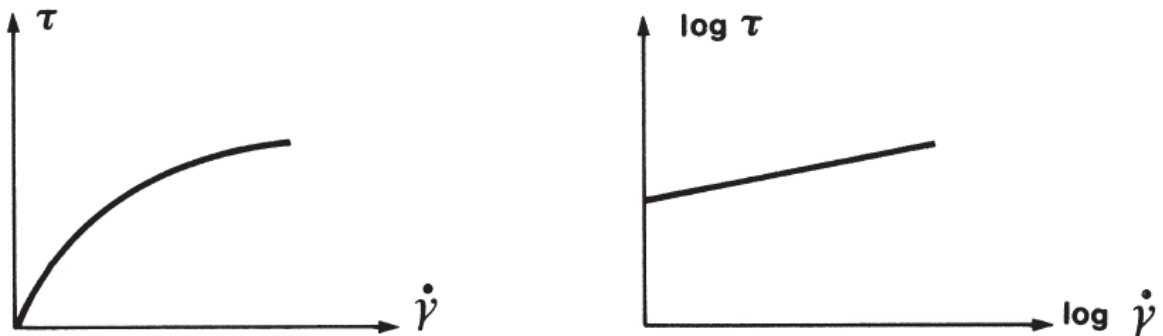


Figure I.1: Courbe d'écoulement des fluides à loi de puissance. [1]

I.3.2. Indice de consistance du fluide et indice de comportement du flux :

En coordonnées logarithmiques, la courbe d'écoulement est une ligne droite, géré par l'équation suivante :

$$y = \log K + nx \quad (\text{I.4})$$

Où :

$$y = \log \tau \quad (\text{I.5})$$

Et :

$$x = \log \dot{\gamma} \quad (\text{I.6})$$

L'indice de comportement du flux n représente la pente de cette ligne, tandis que l'indice de consistance du fluide K est donné par l'intersection de la courbe du flux avec l'axe à $\dot{\gamma} = 1$:

$$n = \frac{\log \tau - \log \tau'}{\log \dot{\gamma} - \log \dot{\gamma}'} = \frac{\log \frac{\tau}{\tau'}}{\log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}'}} \quad (\text{I.7})$$

I.3.3. Détermination de l'indice de comportement d'écoulement n et de l'indice de consistance K dans un viscosimètre Fann :

Les déterminations faites dans un viscosimètre Fann à six vitesses (ou, si cet instrument n'est pas disponible, dans un viscosimètre Fann à deux vitesses, en utilisant également g_0 , qui est considéré comme représentant une détermination à 3 tr/min) sont tracées, sous forme de rhéogramme, sur du papier log, taux de cisaillement à (s^{-1}) tracée sur l'abscisse, contraintes de cisaillement en ($lb/100 ft^2$) sur l'ordonnée.

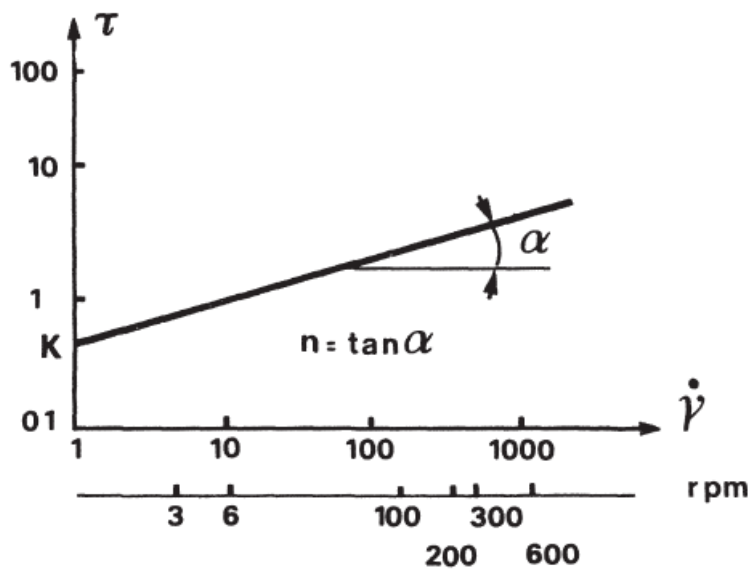


Figure I.2: Détermination des paramètres rhéologiques fluides de la loi de Puissance [1]

Détermination de n :

Si $\dot{\gamma} = 2\dot{\gamma}'$ en a :

$$n = \frac{\log \frac{\tau}{\tau'}}{\log 2} = \frac{\log \frac{\theta}{\theta'}}{\log 2} = 3.32 \log \frac{\theta}{\theta'} \quad (I.8)$$

Si τ est donnée en [$lb/100 ft^2$] et $\dot{\gamma}$ en [s^{-1}], l'unité de K sera [$lb \cdot s^n/100 ft^2$]. Si τ donné en pascal l'unité de K sera [$Pa \cdot S^n$]. Il sera rappelé que $1 [lb_{force}/100 ft^2] = 0.478964 [Pa]$.

I.4. L'écoulement turbulent :

Contrairement à l'écoulement laminaire, l'analyse des pertes de pression d'un écoulement turbulent de fluide dans une conduite est largement empirique.

Le cisaillement aléatoire et le mouvement de mélange des particules de fluide rend l'analyse mathématique ordonnée presque impossible. Les pertes de pression en flux turbulent sont calculées à partir de l'équation de Fanning définie pour tout modèle de fluide par :

$$\Delta p = \frac{2fL\rho\bar{v}^2}{D} \quad (\text{I.9})$$

Où :

Δp Perte de pression

f Facteurs de friction

L Longueur de section

ρ Densité de fluide

v Vitesse moyenne

D Diamètre de tige

L'équation de Fanning est empiriquement dérivée, comme le nombre de Reynolds, elle tente de quantifier les facteurs de base affectant l'écoulement.

Le paramètre f , appelé facteur de frottement de Fanning, est une fonction du nombre de Reynolds et des conditions de surface de la paroi de la conduite. Son état de surface est donné par le paramètre de rugosité relative ε/D . ε Ou la rugosité absolue est la profondeur moyenne des irrégularités de la paroi de la conduite. D est le diamètre intérieur de la conduite. Les paramètres sont illustrés dans la figure I.3. Noter que plus la conduite est rugueuse, plus la rugosité relative devient importante, comme on pouvait s'y attendre, pour des valeurs plus faibles de rugosité relative le facteur de frottement s'affaiblit qui, à son tour, réduit les pertes de pression.

La relation Blasius égale à :

$$f = y * Re^{-z} \quad (\text{I.10})$$

C'est une fonction de puissance, qui donne une ligne droite sur un tracé log-log. Pour les fluides newtoniens, les valeurs de y vont de 0.046 à 0.079, et les valeurs de z vont de 0.20 à 0.25. Pour les fluides de loi de puissance, y et z montrent une certaine dépendance à l'indice de comportement d'écoulement n . Les résultats expérimentaux donnent des expressions pour y et z .

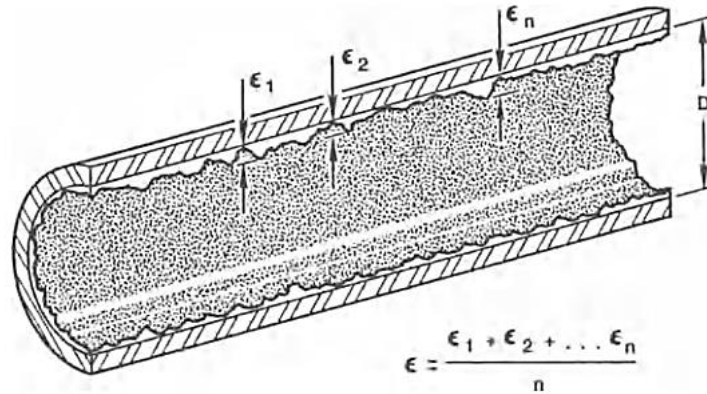


Figure I.3: Rugosité relative d'une conduite [7]

$$y = \frac{\log n + 3.93}{50} \quad (\text{I.11})$$

$$z = \frac{1.75 - \log n}{7} \quad (\text{I.12})$$

La relation Von Karman est plus complexe. De la forme :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n \cdot 75} * \log \left[Re * f^{1 - \left(\frac{n}{2}\right)} \right] - \frac{0.4}{n^{1.2}} \quad (\text{I.13})$$

Les figures I.4 et I.5 montrent les corrélations de Blasius et von Karman pour divers fluides de loi de puissance. Une ligne est également tracée pour représenter le régime d'écoulement laminaire.

Les expressions mathématiques données ci-dessus sont largement utilisées pour l'analyse informatisée de l'écoulement turbulent. Les expressions mathématiques pour d'autres fluides non-newtonien en plus du fluide de loi de puissance sont rares parce que la préparation des fluides avec les propriétés nécessaires est difficile.

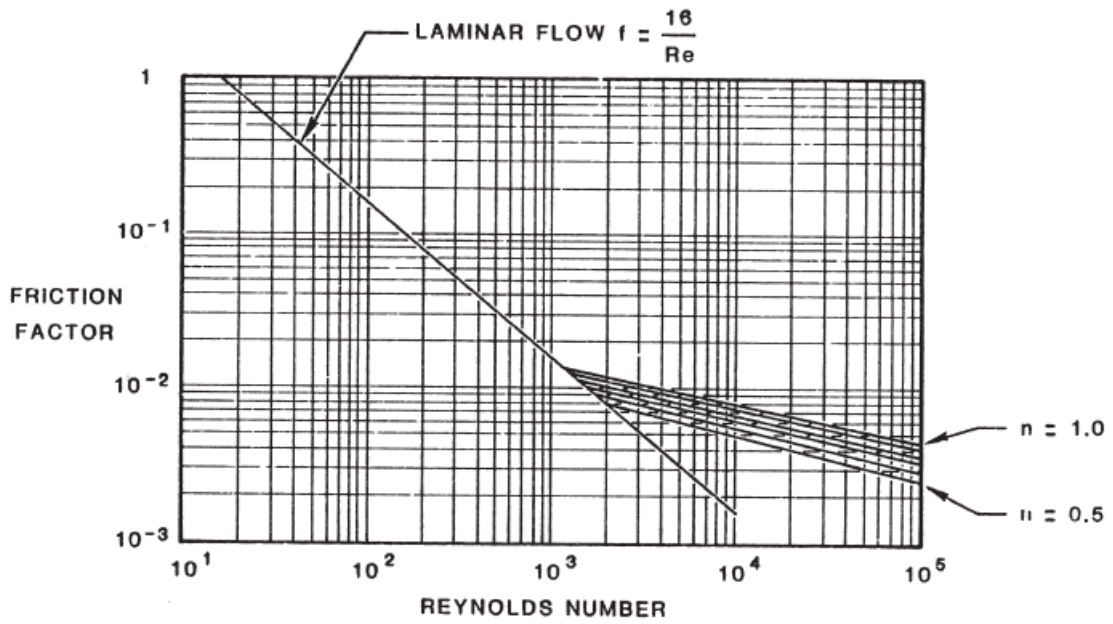


Figure I.4: Corrélation de blasius pour divers fluides de loi de puissance [7]

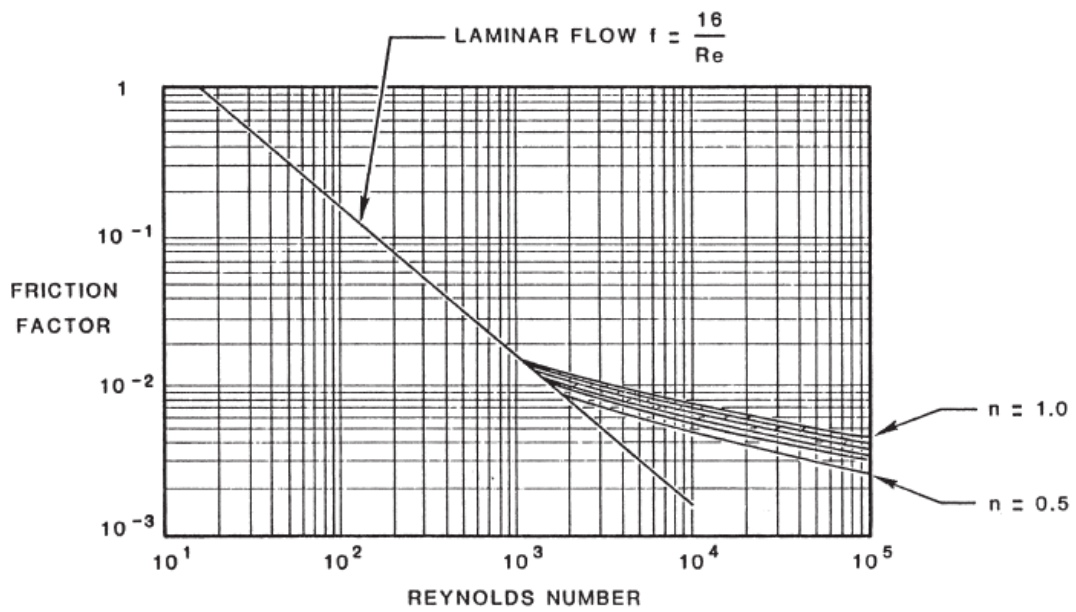


Figure I.5: Corrélation de Von Karman pour divers fluides de loi de puissance [7]

I.5. L'outil de forage a mollettes (tricônes) :

Les outils de forage sont une pièce là moins volumineuse mais la plus importante. Ont évolué au cours du temps pour répondre aux problèmes techniques du forage qui deviennent de plus en plus complexes. Toutes ces évolutions ont eu pour but d'augmenter la vitesse d'avancement et la durée de vie des outils, et donc de réduire le coût du forage. Sont choisis en fonction de la nature et la forabilité des roches traversées, nature et caractéristiques du fluide de forage utilisé, paramètres de forage et adaptation des outils avec la formation.

Un outil à molettes est constitué de trois parties principales : les molettes, les roulements et le corps de l'outil. Les molettes présentent des rangées circonférentielles de dents s'intercalant entre les rangées de dents des cônes adjacents. Les dents sont soit en acier usinées dans le cône, soit des picots de carbure de tungstène sertis dans des perçages à la surface des cônes. Les molettes sont montées sur des arbres de roulements qui sont partie intégrante du corps de l'outil.

La taille ou l'épaisseur des différents constituants de l'outil dépendent du type de formation à forer. Les outils pour formations tendres, qui nécessitent peu de poids, ont des roulements plus petits, des cônes moins épais et des jambes de plus faible section que les outils pour formations dures. Ceci laisse plus de place pour des éléments de coupe longs et minces.

Les outils pour formations dures, qui travaillent avec des poids plus importants, ont des éléments de coupe plus trapus, des roulements plus gros et des corps plus solides [2].

Il existe plusieurs types d'outils à molettes à dents en acier, notamment :

A- les bicônes (2 cônes)

B- les tricônes (3 cônes) (comme c'est illustré dans la figure I.6)

Le tricône est le plus utilisé. Le bicône utilisé auparavant pour la déviation est aujourd'hui peu utilisé.

a. Tricône conventionnels :

Dans ce type d'outil, la boue passe par un ou plusieurs événements situés au-dessus des molettes : on facilite ainsi l'enlèvement des déblais ; mais l'énergie hydraulique à l'outil est surtout dépensée au nettoyage des dents, ainsi l'évacuation des déblais n'est pas parfaite, ce qui implique un rebroyage des déblais. Ce type d'outil est peu demandé aujourd'hui [3].(voir la figure I.6)



Figure I.6: outil tricône réelle

b. Tricône A jets :

Ils améliorent l'enlèvement des déblais : les événements des outils conventionnels sont remplacés par des duses en carbure de tungstène qui débouchent directement sur le fond du trou. Si le débit de boue est suffisant il se produit au fond du trou une turbulence qui refoule instantanément les déblais dans l'espace annulaire : cela implique un meilleur nettoyage de fond et évite le rebroyage des déblais. La turbulence nettoie les dents de l'outil. (voir la figure I.7)



Figure I.7: le passage du fluide à travers les tricônes. À droite : Outil à jet (3 duses), à gauche : Outil conventionnel à circulation Centrale [4]

I.6. L’hydraulique à l’outil à molettes (tricônes) :

Dans l'outil à molettes classique appelé "conventionnel", le jet de boue est dirigé de l'intérieur de l'outil sur les molettes au moyen d'évents percés dans le fond de l'outil. Les molettes sont lubrifiées, refroidies, nettoyées, mais les déblais de forage ne sont pas remontés immédiatement dès leur formation, d'où le "rebroyage" des déblais.

L'outil "jet" est apparu sur le marché en 1948. Les événements de l'outil conventionnel ont été remplacés par des duses interchangeables placées sur le côté de l'outil, entre les molettes. Le jet de boue est dirigé directement sur le fond du trou et, si le débit est suffisant, il se crée une turbulence qui refoule instantanément les déblais dans l'espace annulaire. Les dents des outils attaquent le terrain vierge de tout déblai.

I.7. L’écoulement à travers un tricône à molette :

Lors d’un écoulement d’un fluide incompressible à travers une section rétrécie comme une duse (voir figure I.8), en pratique, on suppose généralement que le changement de pression dû au changement de hauteur est négligeable, de même que la vitesse V_0 en amont des duses qui est négligeable par rapport à la vitesse aux duses V_n , on néglige aussi les pertes de charge au niveau des duses donc on a :

L'équation est exprimée on différent système d'unité de (lb/inch²), (lb/gallon), (ft/s)

$$P_1 - 8.074 \times 10^{-4} \rho V_n^2 = P_2 \tag{I.14}$$

En remplaçant le changement de pression (P_1-P_2) par Δp_b , on obtient l'équation de la vitesse aux duses :

$$V_n = \sqrt{\frac{\Delta p_b}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (\text{I.15})$$

Malheureusement, la vitesse de sortie prédite par l'équation (I.15) n'est jamais réalisée parce que l'hypothèse d'un écoulement sans frottement n'est pas strictement vraie. Pour compenser cette différence, un facteur de correction C_d est généralement introduit.

L'équation (I.15) est donc modifiée pour devenir :

$$V_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta p_b}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (\text{I.16})$$

Le coefficient de correction a été déterminés expérimentalement par Eckel et Bielstein, ces auteurs ont indiqué qu'il pouvait atteindre 0.98 mais ont recommandé 0.95 comme étant plus pratique. [5]

Un tricône à plusieurs duses, leur nombre est généralement le même que celui des cônes, si la perte de charge est la même dans toutes les duses la vitesse le sera aussi.

Par conséquent, si les duses sont de sections différentes le débit à l'entrée des duses est ajusté de sorte à ce que le rapport q/A soit le même pour chaque duse tel que :

$$\bar{V} = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2}{A_2} = \frac{q_3}{A_3} \quad (\text{I.17})$$

En simplifiant l'équation, on obtient :

$$q = \bar{V}_n (A_1 + A_2 + A_3) = \bar{V}_n A_i \quad (\text{I.18})$$

Sur chantier, la vitesse aux duses est calculée par l'équation (I.19)

$$V_n = \frac{q}{3.117 A_t} \quad (\text{I.19})$$

En combinant les équations (I.16) et (I.17) on obtient :

$$\Delta p_b = \frac{8.311 \times 10^{-10} \rho q^2}{C_d^2 A_t^2} \quad (\text{I.20})$$

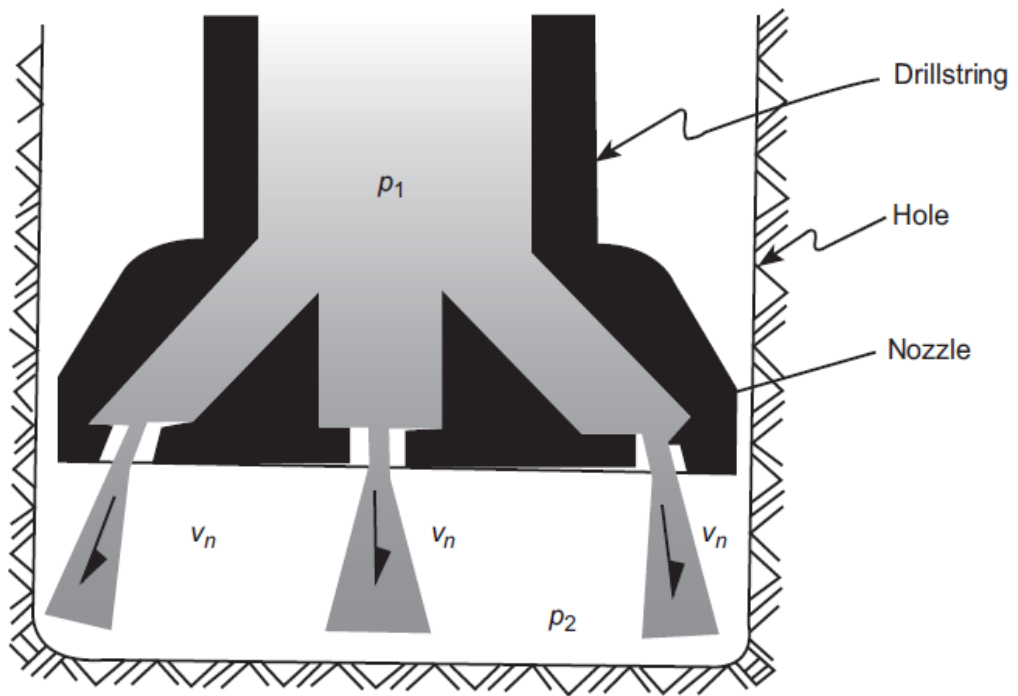


Figure I.8: l'écoulement à travers l'outil tricône [6]

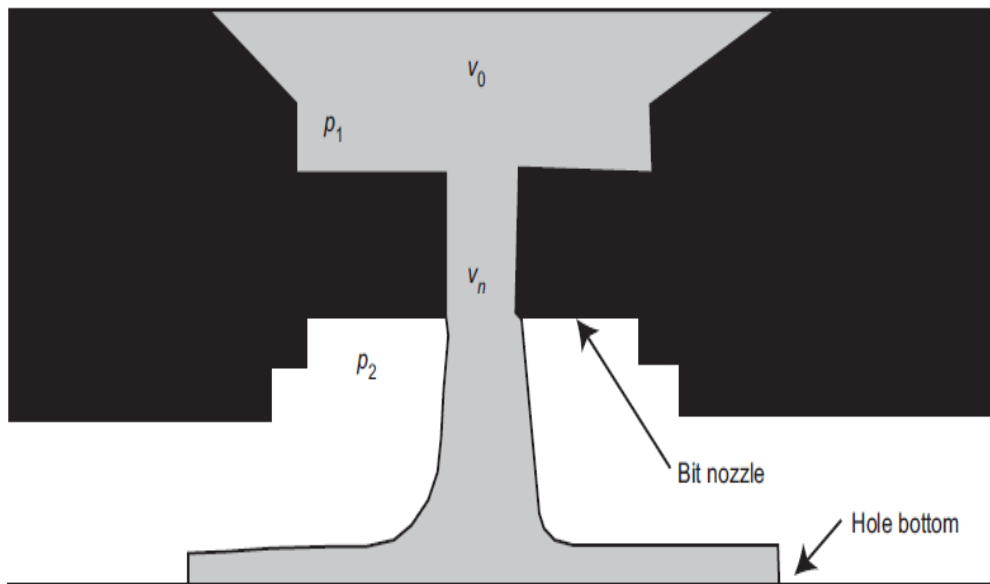


Figure I.9: l'écoulement à travers la duse. [6]

CHAPITRE II :
Formulations
Mathématiques et
numériques

La Simulation se définit comme un outil qui permet l'exploitation d'une représentation virtuelle - ou modèle - du comportement d'un objet, d'un système, d'un phénomène, d'un processus industriel ou d'une organisation [8]. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo.

L'utilisation de la simulation évite les coûts supplémentaires des opérations expérimentales, in-situ, tel que la circulation du fluide de forage en traversant tricône.

Ce chapitre, consiste la simulation numérique tridimensionnelle de l'écoulement d'un fluide de forage en traversant un outil de forage (tricône à jet). L'analyse de cette problématique, commence par la modélisation, puis la mise en équations mathématiques et s'achève par le choix du maillage optimal et indépendant.

II.1. Description de la problématique et modélisation :

Le but de ce travail est d'étudier le comportement dynamique et thermique d'un écoulement tridimensionnel forcé, turbulent et incompressible du fluide de forage, considéré comme fluide non newtonien obéit par la loi de puissance lorsqu'il traverse l'outil de forage (tricônes).

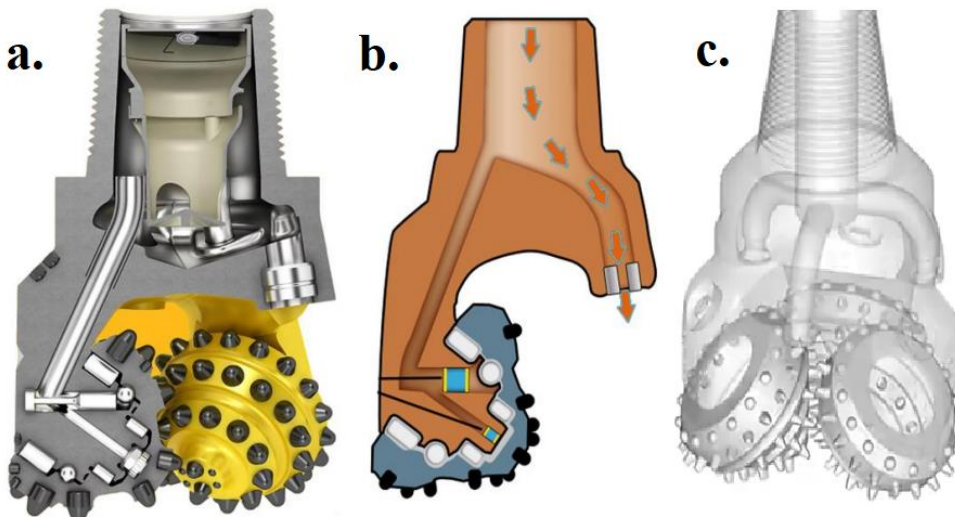


Figure II.1: La zone de circulation de la boue de forage dans un tricône à jet, a. Une coupe tridimensionnelle réelle [9], b. une projection verticale bidimensionnelle [10], c. Illustration tridimensionnelle [11]

Les hypothèses :

- ✓ L'écoulement est turbulent et permanent
- ✓ Le fluide est incompressible et non newtonien, obéit par la loi de puissance
- ✓ Les caractéristiques thermophysiques de ce fluide sont supposées constantes
- ✓ Les parois de la zone de circulation sont isothermes et non poreuses
- ✓ Le mode de transfert thermique est une convection forcée

Le modèle étudié dans ce travail est engendré à partir de la figure II.1, en le projetant sur un tricône réel désigné au forage de la première phase, le long des premières 100 m de profondeur. La figure II.2 montre les projections verticales et horizontales proposées, de la zone où circule la boue de forage. La longueur de cette zone est de 350 mm, dont 82.24 mm représente la longueur de duse. Le rayon à l'entrée de cette zone est de 50.8 mm et le diamètre de chaque duse égale à 15.87 mm.

La projection horizontale montre les positions des trois duses dans le logement principal considéré comme un cylindre. Ces positions peuvent prendre les angles suivants, si la première duse se trouve à 0° (d'azimut), 120° et 240° .

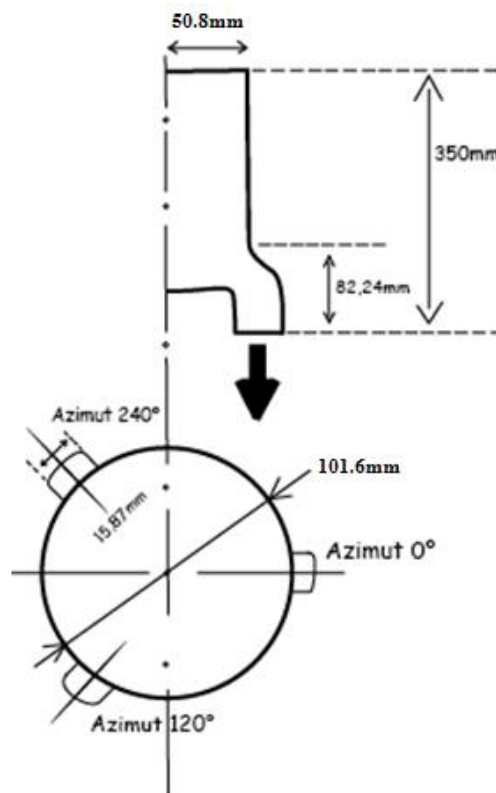


Figure II.2: la zone de circulation de la boue de forage, en haut la projection verticale et en bas la projection horizontal

La projection verticale montre l'un quart de cette zone, y compris une des duses existantes, aux angles cités ci-dessus, 0°, 120° et 240°.

La figure II.3, montre le modèle réalisé dans le design modeler du logiciel Ansys Fluent 19.2, en trois dimensions plus les deux projections horizontale et verticale. Il se compose d'un cylindre principal, muni de trois trous circulaires en bas, ces trous sont les entrées des duses. Chaque duse commence par un coude et se termine par un petit cylindre.

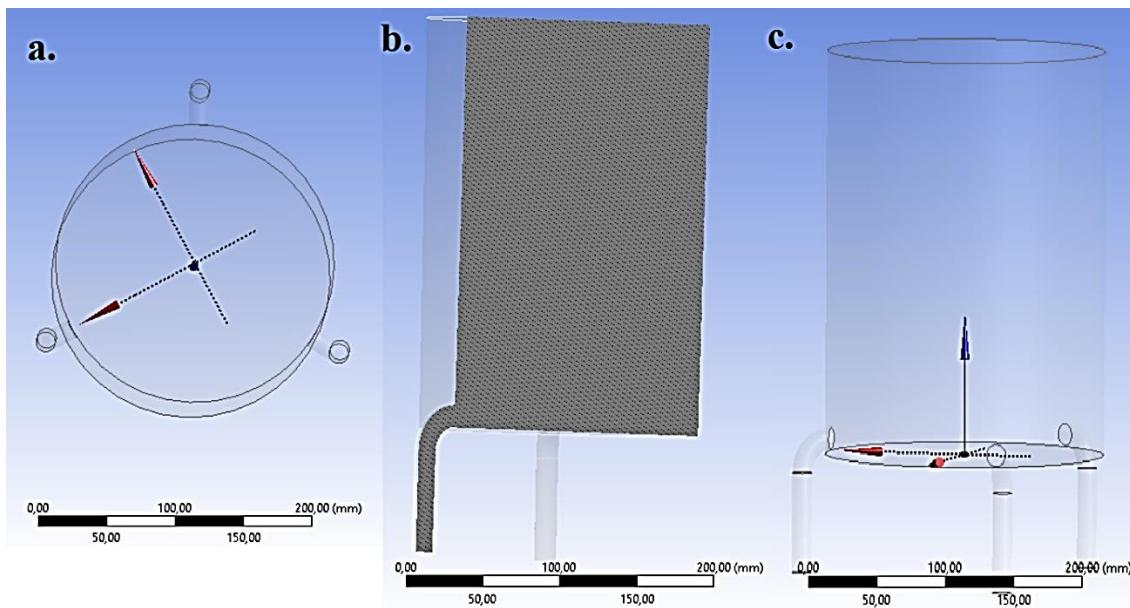


Figure II.3: le modèle de la zone de circulation de la boue de forage dans l'outil de forage créer sur Ansys Design Modeler, a. la projection horizontale, b. projection verticale, c. modèle en 3D

II.2. Formulation mathématique :

Pour 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 :

➤ L'Equation de continuité :

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

➤ L'Equations de mouvements :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (\text{II.2.a})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (\text{II.2.b})$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (\text{II.2.c})$$

➤ L'Equation d'énergie :

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

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 :

$$u = \bar{u} + u'; v = \bar{v} + v'; w = \bar{w} + w'; p = \bar{p} + p'; T = \bar{T} + T'$$

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

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

- L'équation de continuité :

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

- L'équation de quantité de mouvement :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \overline{\mu \nabla^2 U_i} - \frac{\partial (\rho \bar{u}_i u_i)}{\partial x_j} \quad (\text{II.5})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad (\text{II.5.a})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} \quad (\text{II.5.b})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right) + \rho \left(\frac{\partial \bar{w}'u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}'v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'w'}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} \quad (\text{II.5.c})$$

➤ L'Equation d'énergie :

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

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

$$\overline{-\rho u'u'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k; \overline{-\rho v'v'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k; \overline{-\rho w'w'} = 2\mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \frac{2}{3} \rho k;$$

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

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 :

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

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.

II.2.1. Modèle mathématique k- ϵ de turbulence :

Le modèle k- ϵ conçu par B. E Launder et D. B Spalding (1972) est devenu le plus populaire des modèles de turbulence pour sa simplicité et la possibilité de l'utiliser pour différents types d'écoulement.

Le modèle de turbulence k-epsilon (k- ϵ) est le modèle le plus couramment utilisé dans la dynamique des fluides pour modéliser les écoulements avec un flux entièrement turbulent. Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport. La première variable est l'énergie cinétique turbulente (k). La deuxième variable est le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ϵ). Le modèle k- ϵ se concentre sur les mécanismes qui affectent l'énergie cinétique turbulente. On suppose que le fluide présente les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions. [12]

II.2.2. Les nombres adimensionnels :

Le nombre de Reynolds, noté Re , correspond à un nombre sans dimension qui est utilisé en mécanique des fluides. C'est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans un écoulement, Cette grandeur permet alors de caractériser un écoulement, en particulier la nature de son régime. Il est ainsi possible de savoir si un écoulement est laminaire, transitoire ou turbulent.

- Pour un fluide newtonien :

$$Re = \frac{\rho D_h v}{\mu} = \frac{D_h v}{\nu} \quad (\text{II.9})$$

Où : D_h représente le diamètre hydraulique
 V est la vitesse du fluide

Nombre de Reynolds sont plus élevés en turbulent que ceux d'un régime laminaire. A titre d'exemple, le régime turbulent est observé pour un écoulement :

- Dans une conduite à : $Re > 4.10^3$
- Sur une plaque plane à : $Re > 10^6$

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 [13].

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

$$R_e = \frac{\rho D_h v}{u_p} \quad (\text{II.10})$$

Où : u_p la viscosité plastique.

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

$$R_e = \frac{\rho v^{2-n} D^n}{K(8)^{n-1}} \quad (\text{II.11})$$

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

II.3. Formulation numérique :

La résolution de l'ensemble des équations gouvernantes de ce système d'écoulement est effectuée par la méthode numérique des volumes finis. En utilisant le code CFD, ANSYS-FLUENT 19.2.

II.3.1. Méthode des volumes finis :

Les équations régissant le phénomène étudié sont des équations aux dérivées partielles (EDP) non-linéaires, dont la résolution analytique ne peut être possible au moyen des outils d'analyse mathématique contemporain. Mais, une solution numérique peut être possible en transformant ces équations différentielles en systèmes d'équations algébriques linéaires par une méthode de discrétisation avant de résoudre ce système par des méthodes directes ou par itérations.

Pour obtenir une solution numérique, le problème étudié doit être discrétisé en transformant les équations différentielles en un système d'équations algébriques. Il existe plusieurs méthodes de discrétisation telles que : la méthode des volumes finis, des différences finies et des éléments finis... etc.

Pour notre présente étude, nous avons choisi la méthode des volumes finis pour discrétiser les équations du modèle mathématique.

Les caractéristiques principales de la méthode des volumes finis en mécanique des milieux continus, sont [14] :

- 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

II.3.2. Les conditions aux limites :

Le tableau II.1 récapitule les conditions aux limites imposées sur ce système d'écoulement.

- La vitesse à l'entrée est calculée à partir du débit d'injection utilisé en place dans le chantier de forage pétrolier
- La température du fluide à l'entrée de l'outil de forage est prise en équivalence d'une température de ce fluide à la sortie d'une pompe
- La température des parois est calculée à partir de la température ambiante au sol, en prenant en considération le gradient de température dans le sol.
- Le fluide utiliser pour sélectionner le maillage optimal est l'eau, voir ses caractéristiques physiques dans le tableau II.2
- Le régime d'écoulement calculé est indiqué sur le tableau II.3

Tableau II.1: Les conditions aux limites appliquées à l'intérieure de l'outil

A l'entrée	Vitesse du fluide (V_0) Température du fluide (T_0)
A la sortie	La pression (P_S)
Aux parois	La température aux parois (T_p)

Tableau II.2: Les caractéristiques thermophysiques de l'eau

La masse volumique (ρ)	998.2 kg/m ³
La viscosité dynamique (μ)	0.001003kg/m. s
Conductivité thermique (λ)	0.6 W/m.K
Chaleur spécifique (Cp)	4182 J/kg.K

Tableau II.3: Le régime d'écoulement calculé

Type de fluide de forage	Newtonien
Nombre de Reynolds	518714
Régime d'écoulement	Turbulent

II.3.3. Les schémas utilisés sur le solveur Ansys-Fluent :

Depuis quelques années, l'accroissement de la puissance des ordinateurs et le développement des méthodes numériques ont permis de conduire des calculs tridimensionnels de l'écoulement dans plusieurs configurations, tout en tenant compte de l'effet de la viscosité et de la turbulence.

Ce progrès a fait de la modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) un outil de plus en plus important pour le développement et l'optimisation du dimensionnement de différents procédés industriels. Parmi une large gamme de codes de calcul de l'écoulement connus on peut citer : CFX, Fluent, Numeca, Star-CD, Openfoam etc...

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.

II.3.4. Le maillage :

Le maillage est le processus dans lequel l'espace géométrique continu d'un objet est décomposé en milliers ou plus des formes pour définir correctement la forme physique de l'objet. Ce processus consomme généralement une partie importante du temps dans l'acquisition des résultats de simulation. En conséquence, ansys maillage a créé des outils avancés de génération de maillage automatisés peuvent fournir des solutions plus rapides et plus précises. [15]

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)

II.3.4.1. Indépendance de maillage :

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr que la solution représente la réalité. Pour atteindre cet objectif, six maillages différents ont été créés (voir tableau II.4), avec différentes répartitions du domaine à étudier et plusieurs raffinements auprès des parois du cylindre principal et des duses, à l'entrée des coudes des duses et à leurs sorties, pour mieux présenter les gradients du courbes résultantes.

Tableau II.4: Tableau comparatif des maillages proposés

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Nombre de maille	350240	152283	125798	117805	114026	110691
Nombre de nœuds	109445	52566	44036	41391	40143	39132
Temps d'exécution (sec)	145	70	71	72	56	68

La figure II.4 montre les profils des vitesses des cas étudiés. L'écart entre ces derniers tend vers le zéro, ce qui confirme l'indépendance du modèle du maillage.

Le maillage du cinquième cas (voir fig.II.5-6), vu son temps de calcul optimal, notamment le nombre des éléments est assez grand et le raffinement est suffisant

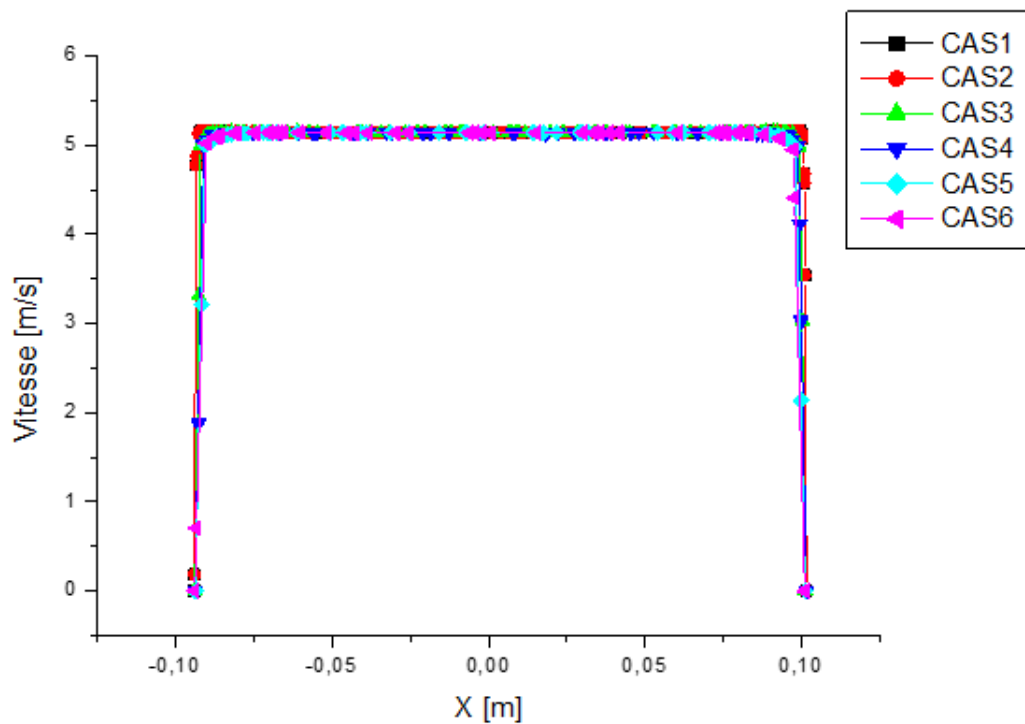


Figure II.4: les profils des vitesses pour les différents maillages étudiés

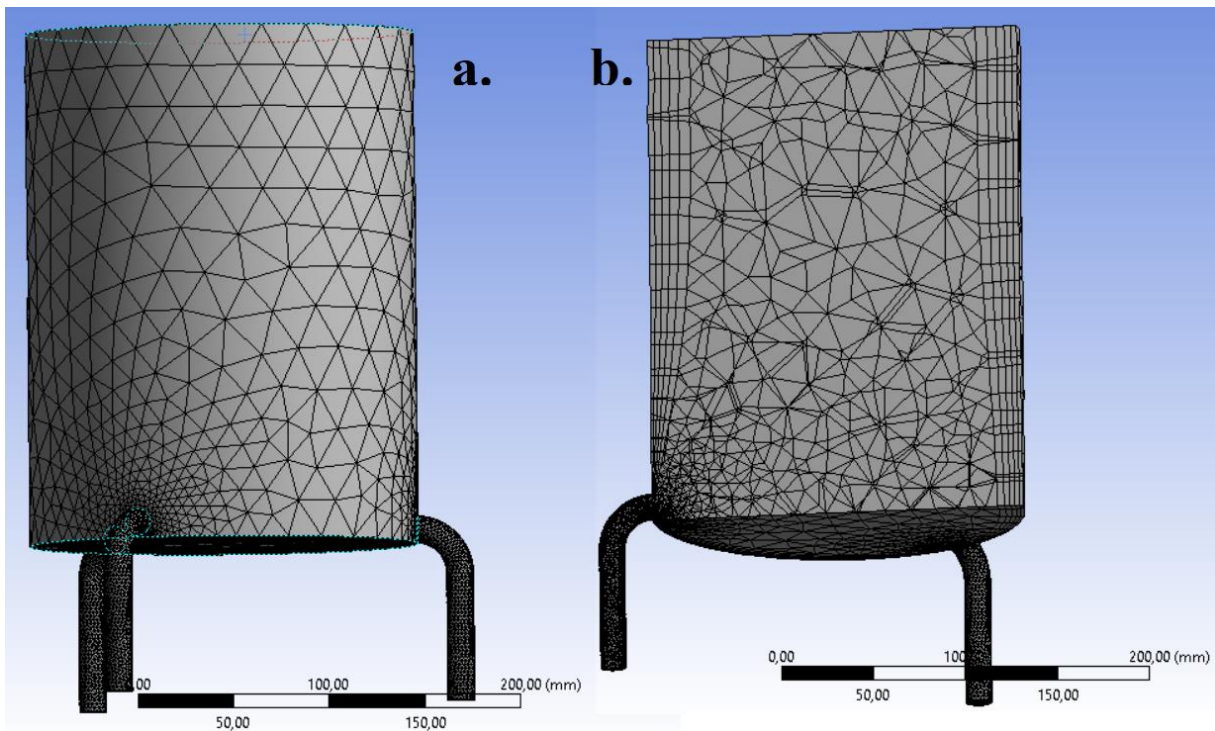


Figure II.5: Le maillage du 5ème cas choisi, a. de l'extérieur, b. une projection verticale

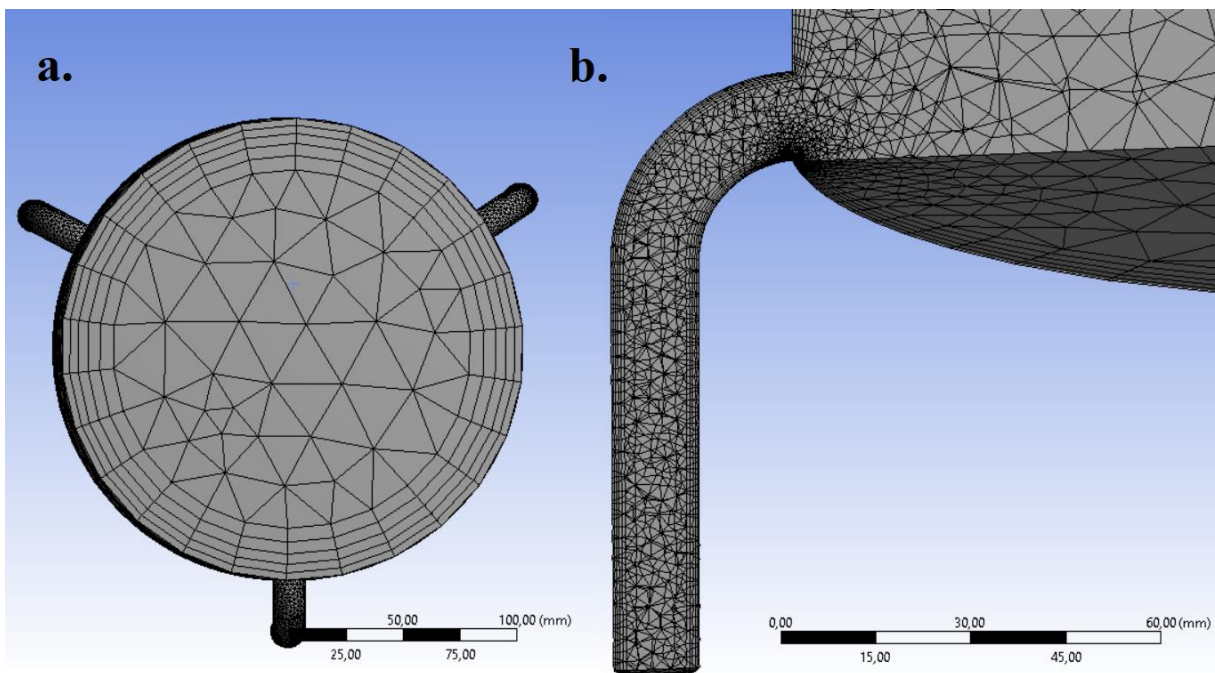


Figure II.6: Le maillage du 5ème cas choisi, a. la projection horizontale, b. la projection verticale d'une des duses

CHAPITRE III :

Résultats et

Discussions

Ce chapitre comprend les résultats et les discussions de l'écoulement du fluide de forage à travers la zone de circulation dans un tricône à molette (jet) doté par trois duses. Les calculs sont effectués à l'aide du code Ansys Fluent 19.2, basé sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations du mouvement.

III.1. Hypothèses et conditions aux limites :

L'écoulement étudié est turbulent en convection thermique forcée, en utilisant un fluide incompressible, non newtonien obéit par la loi de puissance.

III.1.1. Les caractéristiques physiques de fluide de forage utilisé :

Les caractéristiques physiques de la boue benthonique sont résumées dans le tableau III.1

Tableau III.1: les caractéristiques thermophysiques de la boue de forage bentonitique

La masse volumique (ρ)	1200 kg/m³
Index de consistance (K)	0.0577 kg.s (n ⁻²)/m
Index d'écoulement (n)	0.8549
Conductivité thermique (λ)	0.6 W/m.k
Chaleur spécifique (Cp)	4070j/kg.K

III.1.2. Les conditions aux limites :

- Aux parois de l'outil de forage : La température est considérée isotherme ambiante ($T_p = 303$ K).
- A l'entrée de l'outil :
 - ✓ La vitesse du fluide de forage ($V_0 = 5.13$ m/s) est calculée à partir d'un débit d'injection ($q = 2500$ l/min) pris d'une opération de forage réel.
 - ✓ La température du fluide au niveau de la tête d'injection égale à 333 K. A l'entrée de l'outil de forage, $T_0 = 332$ K [16]

- ✓ Le régime d'écoulement est prouvé sur la base du nombre de Reynolds [17], de l'équation (II.7) pour le fluide non newtonien obéit par la loi de puissance (Voir le tableau III.2)

Tableau III.2: Les régimes d'écoulement des fluides de forage à travers l'outil

Type de fluide de forage	Non-Newtonien
Nombre de Reynolds	25894
Régime d'écoulement	Turbulent

III.2. Résultats et discussions :

Les profils des températures et des vitesses sont pris dans la zone de circulation de la boue dans le tricône à jet, au niveau de plusieurs stades sont :

- Le milieu du cylindre : V ; T
- L'Entré (coude, duse) : V_{c-e} et V_{d-e} ; T_{c-e} et T_{d-e}
- Le Centre (coude, duse) : V_{c-c} et V_{d-c} ; T_{c-c} et T_{d-c}
- La Sortie (coude, duse) : V_{c-s} et V_{d-s} ; T_{c-s} et T_{d-s}

III.2.1. Les profils de vitesse :



Figure III.1: Le contour de vitesse de la boue en régime turbulent dans le cylindre

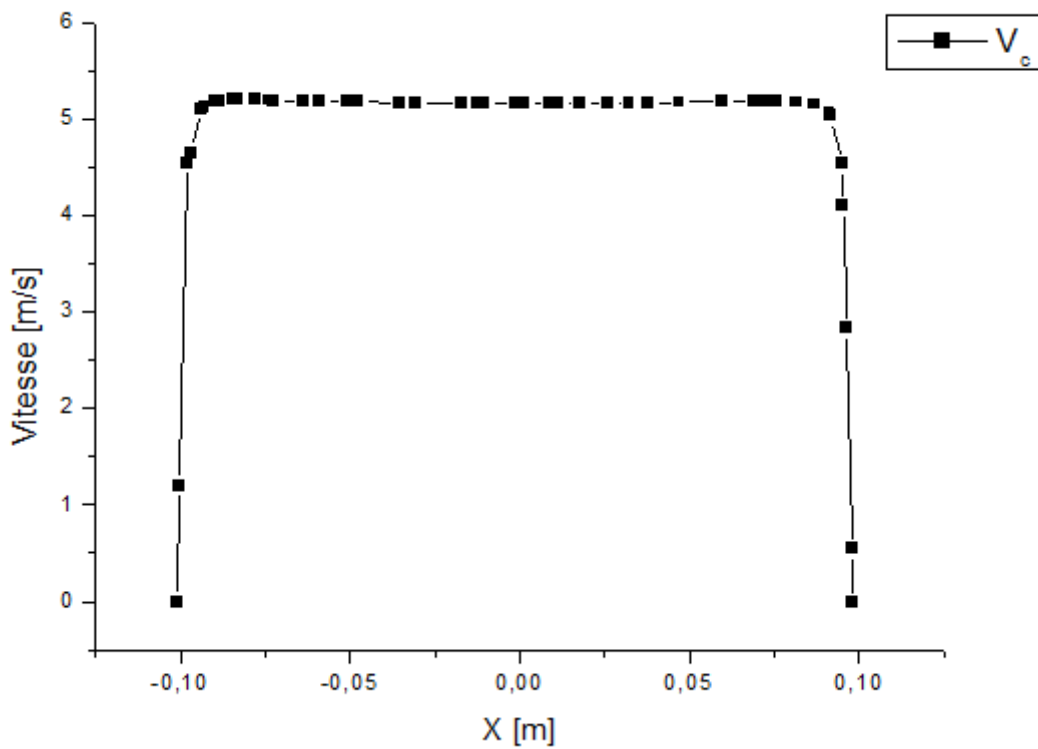


Figure III.2: Le profil de vitesse dans le cylindre

Le long du cylindre principale La vitesse a resté constante (5, 13 m/s). Le gradient de vitesse se limite auprès des parois dans une couche très mince, en le comparant avec la couche du milieu (en rouge foncé), (voir fig.III.1). La courbe de la figure III.2, montre que le profil de vitesse est aplati au milieu avec un gradient accentué auprès des parois, où la vitesse s'annule [18]. Ce gradient accroît (devient plus épais) contre la paroi de la partie inférieure de cylindre, qui constitue un obstacle devant l'écoulement où la vitesse s'annule brusquement et fatalement, [19].

Conformément à la littérature [20], il est possible de diviser le profil de vitesses des fluides non newtoniens obéit par la loi de puissance, en régime turbulent, en trois zones :

- Une zone proche des parois qui représente une couche mince dans laquelle les effets de la turbulence sont supposés être négligeables. En supposant la condition aux limites de non-glissement à la paroi, le fluide est au repos. De plus, tout le fluide proche de la surface se déplace à très faible vitesse et par conséquent, tout changement de sa quantité de mouvement lorsqu'il s'écoule vers le bas du cylindre, doit être extrêmement faible. En conséquence, la contrainte de cisaillement, agissant sur tout élément de fluide dans cette zone, doit être négligeable. Le ralentissement du fluide à sa limite inférieure étant équilibrée par son accélération à sa limite supérieure. Elle est représentée par les couches dégradés en bleu, vert et jaune dans la figure III.1.

- La zone de transition : c'est la région qui sépare la sous-couche visqueuse ou laminaire du noyau totalement turbulent.

- La 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. Elle domine dans la partie médiane du cylindre (en rouge foncé dans la figure III.1) et (le palier d'aplatissement dans la figure III.2)

Dans la sous-couche limite laminaire, le transfert d'impulsion se produit par des moyens moléculaires, tandis que dans la région turbulente, le transport turbulent domine.

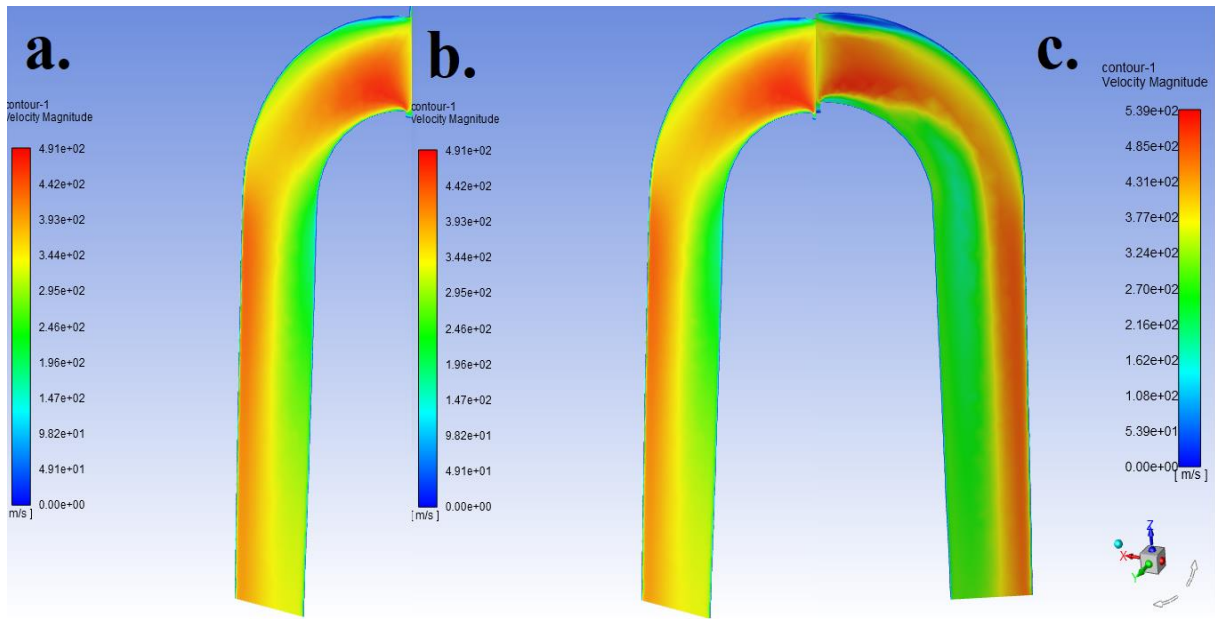


Figure III.3: Le contour de vitesse dans les duses, a. à 0°, b. à 120°, c. à 240°

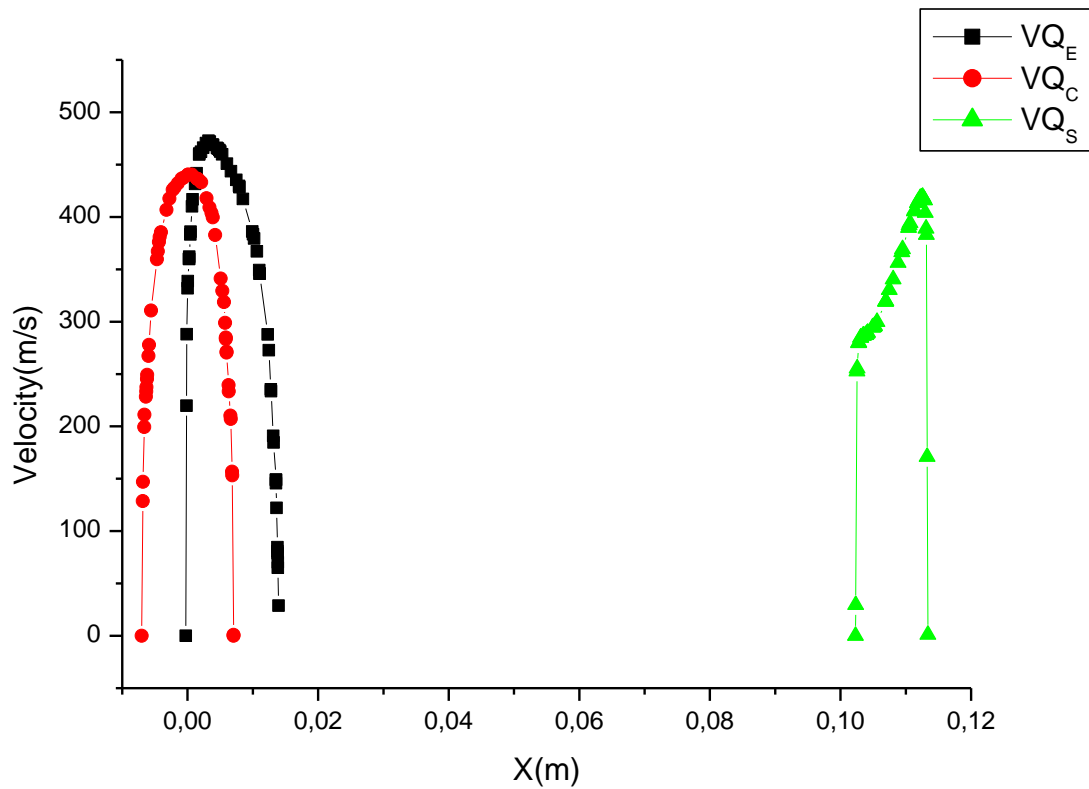


Figure III.4 : Les profils des vitesses dans le coude

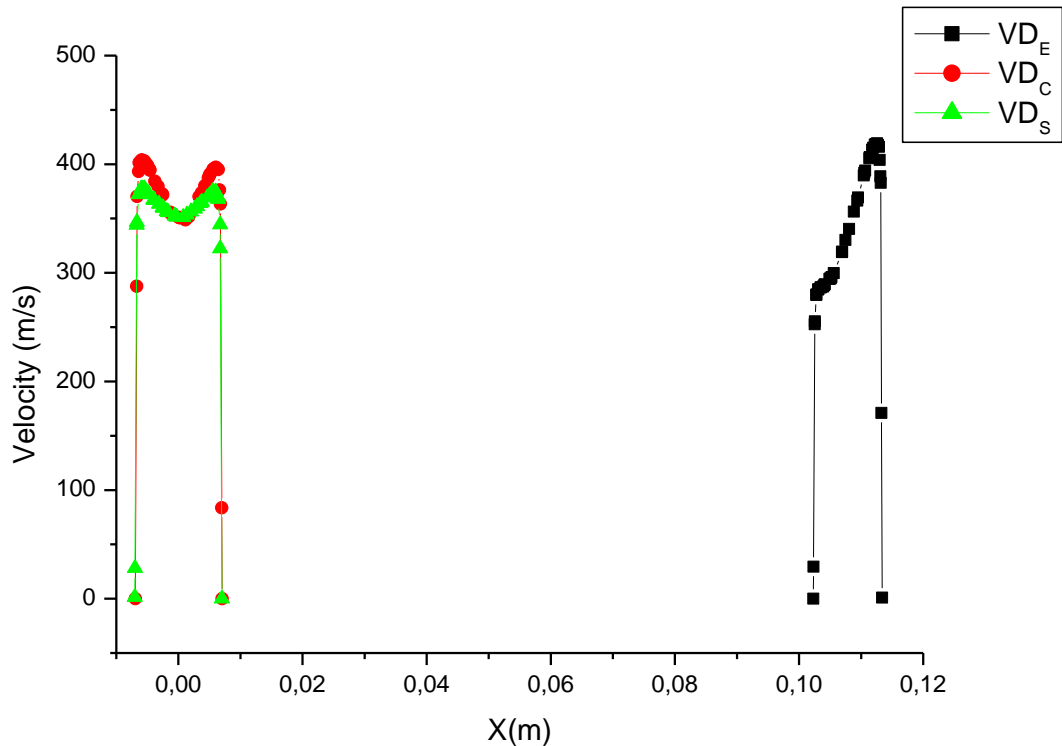


Figure III.5: Les profils des vitesses dans la duse 3

Le fluide lorsqu'il rentre dans le coude, il se dirige vers le mur extérieur au niveau du coude, ce qui produit des régions de recirculation dans les coins supérieur et inférieur. La région de recirculation était plus importante en aval à la paroi interne, avec la vitesse maximale réalisée à la paroi externe de cette région (voir fig. III.3). Pleinement développé un écoulement turbulent a été observé en amont du coude, voir la courbe V_{c-e} en noir dans la figure III.4.

Le flux est devenu asymétrique plus en aval, formant une couche de cisaillement au coude, qui a dirigé l'écoulement vers la paroi extérieure. En se déplaçant plus en aval, le flux se rattache. Cependant, la vitesse maximale est toujours biaisée vers la paroi extérieure [21]. La recirculation en aval sur la paroi interne était plus importante, provoquant la vitesse maximale à se produire près de la paroi externe de cette région [22] ce qui est illustré dans la courbe V_{c-s} en vert dans la figure III.4.

A l'entrée de la duse la vitesse garde son allure, la zone de recirculation est grande auprès de la paroi intérieure. A partir du milieu de la conduite la zone de recirculation se retire vers le centre. Vers la fin de la duse cette zone devient moins accentué et plus centré (voir fig. III.5).

La vitesse maximale (470m/s) s'accroît plus que 90 fois par rapport à la vitesse maximale enregistrée dans le cylindre principal (voir figure III.2). Cette dernière décroît par rapport à la vitesse précédente dans le coude. À sa sortie, elle se rétablit jusqu'à une valeur égale à 450m/s avec une diminution de vitesse vers la paroi intérieure, dans la zone de recirculation, qui produit une résistance à l'écoulement. La vitesse, à la sortie de duse, atteint 370m/s.

III.2.2. Les profils de température :

Un transfert de chaleur a eu lieu auprès des parois dans une très mince couche, dans le cylindre principal ainsi que la duse (voir fig. III.6). La superficie est maintenue à une température constante, égale à sa température d'entrée. Le gradient de température est plus élevé au voisinage des parois, en postulant une couche limite thermique qui couvre cette région. [20]

La convection forcée en turbulence ne donne pas l'occasion au fluide pour élargir le taux de transfert de chaleur, en limitant cette opération auprès des parois. Ce qui traduit l'allure des courbes de températures, le long de la zone de circulation du fluide non newtonien, parabolique et aplatis au centre, avec des gradients accentués vers les parois (voir fig. III.7-9)

Les propriétés physiques autres que la viscosité apparente peuvent être considérées comme constantes pour les fluides non newtoniens couramment rencontrés. En général, les couches limites thermique et de quantité de mouvement ne correspondront pas. De ce fait les propriétés physiques du fluide ne varient pas de manière significative sur l'intervalle de température concerné, où il y a peu d'interaction entre les deux couches limites et on peut supposer qu'elles se développent toutes deux indépendamment l'une de l'autre [20].

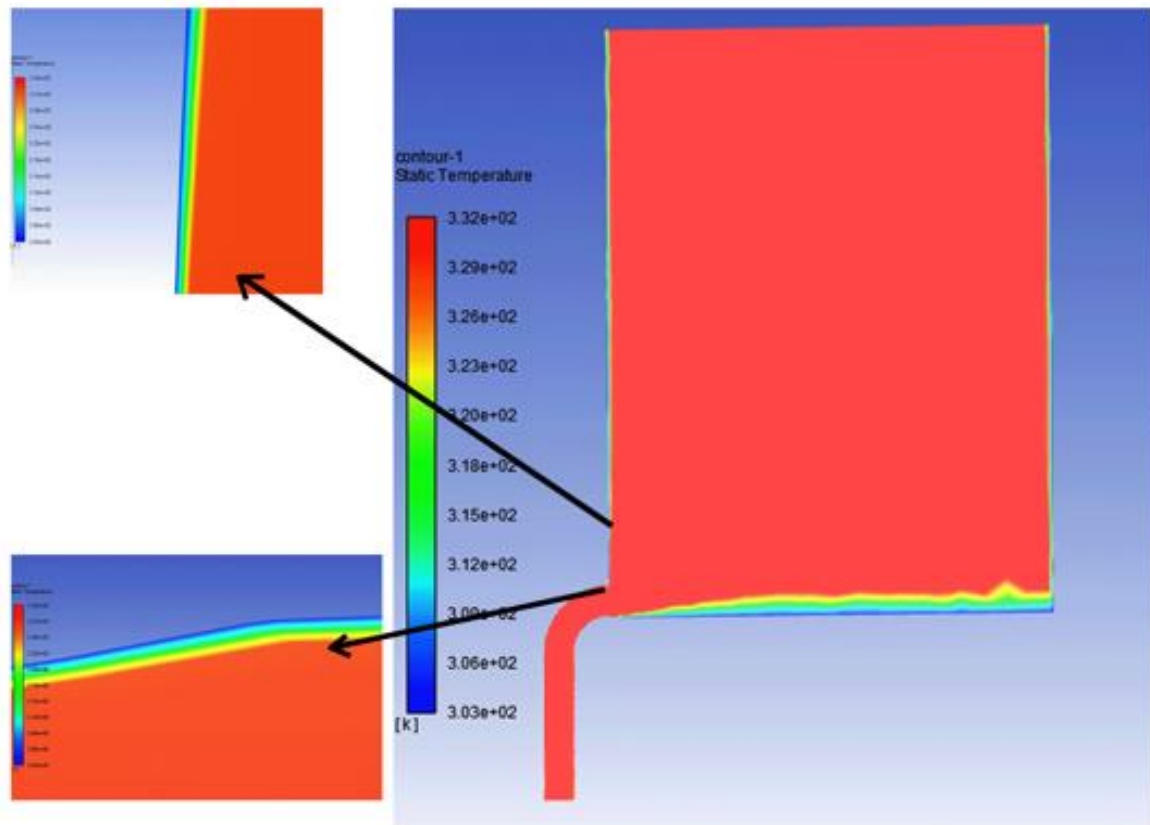


Figure III.6: Le contour de température d'un écoulement turbulent de la boue dans l'outil

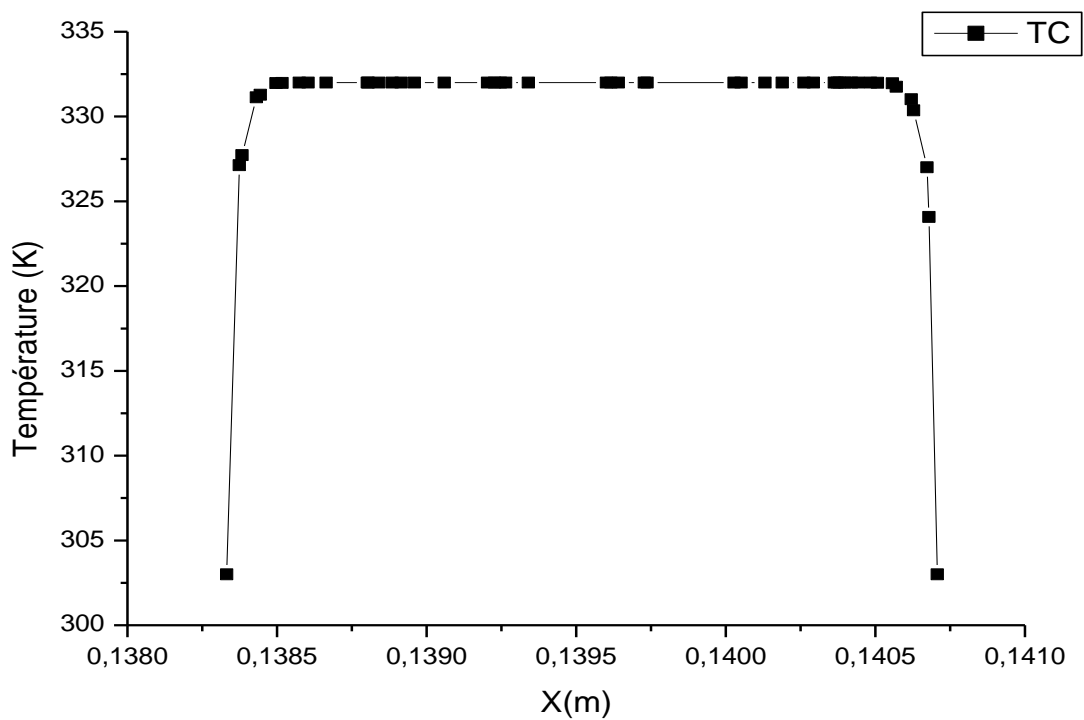


Figure III.7: Le profil de température d'un écoulement turbulent de la boue dans cylindre

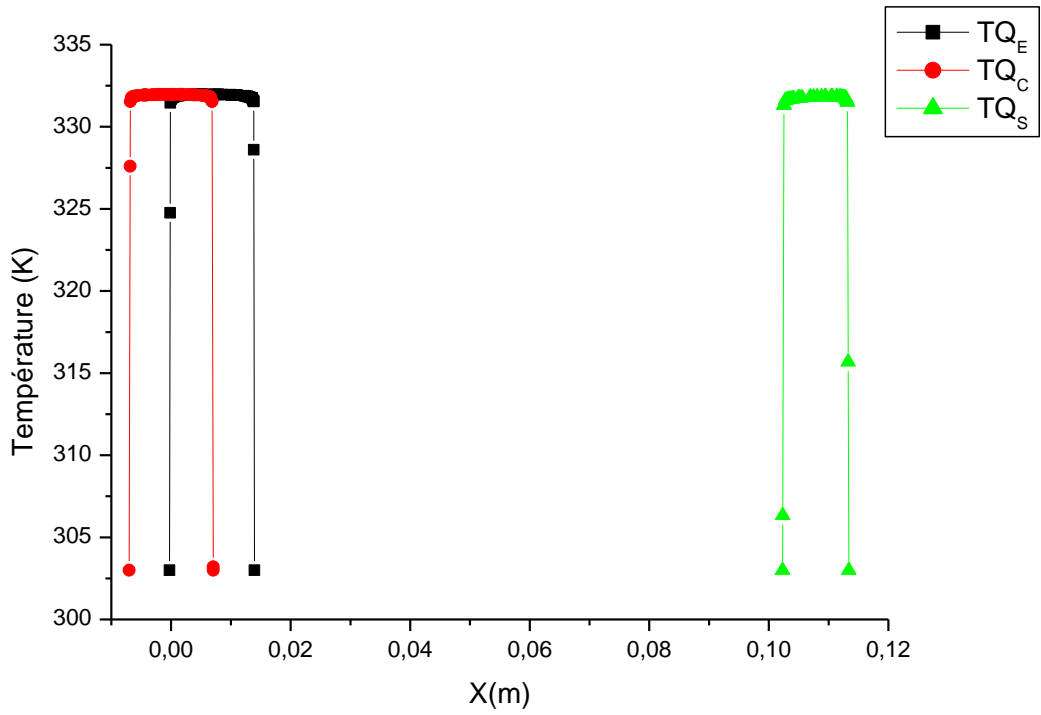


Figure III.8: Les profils des températures dans le coude 3

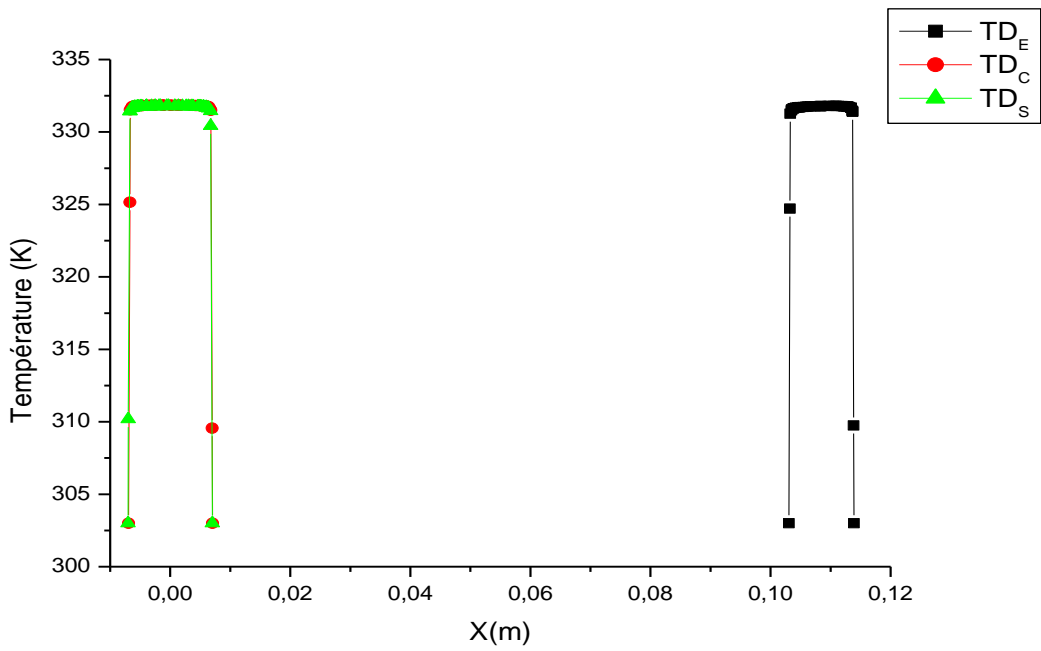


Figure III.9: Les profils des températures dans la duse 3

III.2.3. Les profils des pressions :

Une chute de la pression statique au niveau de l'orifice (l'entrée de la duse), en amont du coude indique la présence d'un flux développé. Sa courbure cause une baisse importante de la pression [21], notamment sur sa paroi inférieure. La différence de pression est flagrante entre les deux parois du coude (la paroi supérieure et la paroi inférieure). Au fur et à mesure que le débit se déplaçait plus en aval, il s'approchait de zéro en raison de la condition limite de sortie de pression [22], (voir fig. III.10)

La figure III.11, indique un gradient de pression dynamique entre le cylindre principal et le coude. A la sortie de la duse cette pression devient relativement homogène, vu que l'écoulement commence son rétablissement, (voir § 2.1 précédent). Tandis que la répartition au niveau du coude est très inégale, et la pression à la paroi extérieure de la section coudée est nettement supérieure à la paroi intérieure, dans la zone de recirculation [23].

A l'orifice qui sépare le cylindre principal et le coude, à l'intérieur du coude, les chute de pression sont beaucoup plus singulières dues au changement géométrique brutaux. Ces gradients de pression s'étalent vers l'aval du coude, comme le flux du fluide ne se rétablit que lorsqu'il dépasse une certaine distance. Les pertes de charge linéaires qui dépendent du frottement dans cette étude peuvent être localisé auprès des parois, excepte des zones où le flux se rattache à la paroi, sous l'action de la courbure

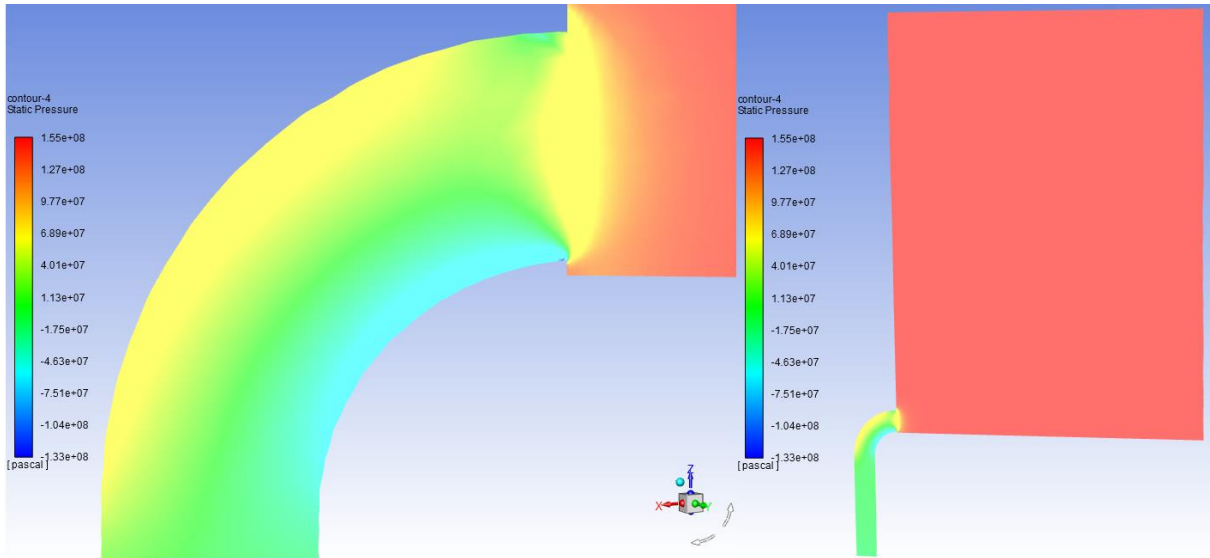


Figure III.10: Le contour de pression statique dans l'outil

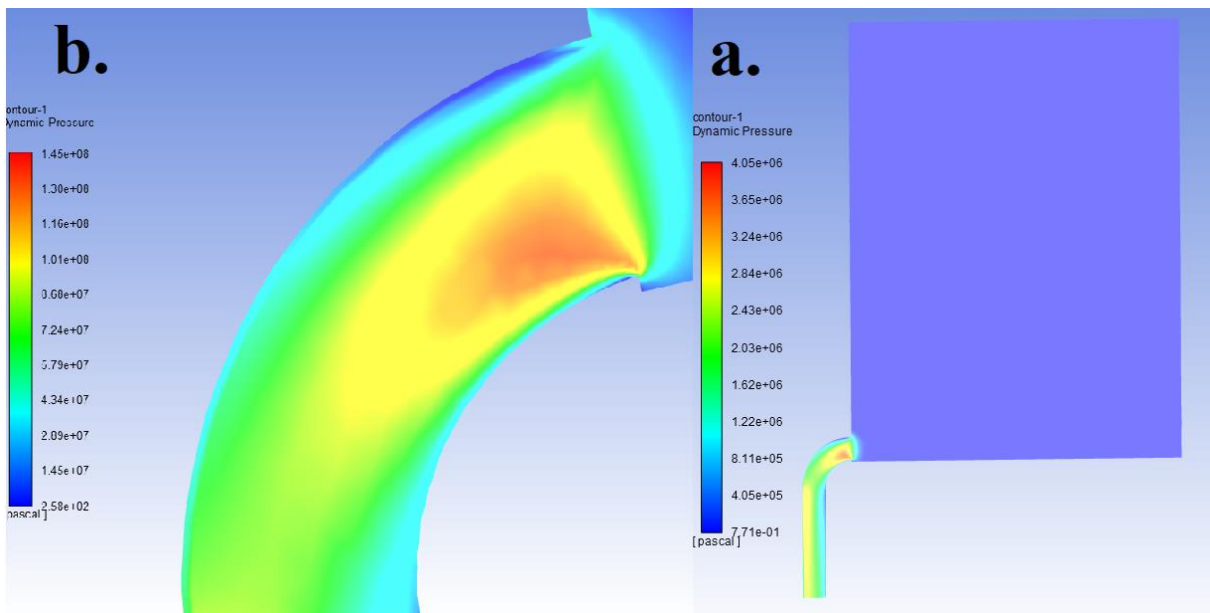


Figure III.11: Le contour de pression dynamique dans l'outil, a. en projection verticale, b. à l'orifice et la courbure du coude

La chute de pression à travers les duses est proportionnelle à la densité du fluide et au carré du débit. La plus grande partie de la chute de pression au niveau des duses se produit lorsque le fluide sort, ce qui fournit de l'énergie mécanique pour nettoyer le fond du trou et le trépan. Les duses de mèche sont conçues avec des sorties pointues pour maximiser cette énergie. Contrairement à certaines théories publiées, la chute de pression dans les tuyères dépend très peu du frottement ou des propriétés visqueuses du fluide. Dans un système de circulation typique, la chute de pression à travers les duses du trépan représente environ 60 % de la pression totale de la pompe [24]

CONCLUSION :

Ce travail comporte une simulation tridimensionnelle de l'écoulement turbulent, forcée et incompressible de la boue de forage en traversant un tricône à jet, dotés par trois duses, en utilisant le code de calcul Ansys Fluent.

L'écoulement dans les duses en présence d'un coude montre l'apparition des zones de recirculation dues à la courbure, ce qui influe sur l'allure de ce dernier, même lorsqu'il quitte le coude, où le fluide doit traverser une certaine distance pour se rétablir.

Le fluide n'a pas eu une dissipation de chaleur, comme l'écoulement est turbulent et le mode de transfert thermique est forcé.

Les singularités géométriques des duses sont le premier responsable des chutes de pression dans l'outil de forage.

Ce travail nécessite encore plus de développement, en ce qui concerne :

- Les pertes de charge linéaires y compris l'influence de coefficient de frottement.
- Les dissipations d'énergie dues à la turbulence
- Les formes, les natures et l'activité des tourbillons
- L'influence des autres lois de comportement obéissant le fluide non newtonien

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual Publication de la Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel by R. Monicard, 1st edition, 1982
- [2] J. P. NGUYEN, techniques d'exploitation pétrolière : le forage, TECHNIP, 1993
- [3] F. GRONDIN, Les outils de forage, DIVISION FORAGE Département Formation, SONATRACH, Janvier 2004
- [4] E.N.S.P.M -Techniques du forage- ENSPM Formation industrie IFP Training-2007
- [5] Applied drilling engineering, Adam T, bourgoyne Jr, K. k.Millheim, F.S.Young Jr second edition, 1991
- [6] R. F. Mitchell and S. Z. Miska, FUNDAMENTALS OF DRILLING ENGINEERING, Society of petroleum engineers. v12 , 2011
- [7] A. Whittaker; Theory and Applications of drilling fluid hydraulics, 1985
- [8] E. Slamitz, Digital Engineering, Simulation Numérique et Optimisation, FEUILLE DE ROUTE, Systematic PARIS Region Deep Tech Ecosystem, 2020
- [9] M. O. A. Messali, I. E. Ramdani, H. Bensafia, Simulation d'un écoulement turbulent incompressible et forcé d'un fluide de forage à travers l'outil de forage, 2020/2021.
- [10] datc group, forage en rotation, datc group
- [11] <https://www.youtube.com/watch?v=IjM-VNI530E> Simulating a Tricone Drill Bit with CONNVERGE, [10/03/2022 at 10h](#)
- [12] M. S. Shadloo, Numerical simulation of turbulent flow, Projet de Physique P6 STPI, Institut National des sciences appliquées (INSA) ROUEN NORMANDINE, 2020
- [13] F. R. Mitchell, S. Z. Miska, Fundamentals of drilling engineering. Society of petroleum engineers. v12, 2011

- [14] J. M. Zanga, Modélisation et simulation des écoulements dans les centrales hydroélectriques, université du Québec en Abitibi Témiscaminque, 2018
- [15] <https://simutechgroup.com, 25/03/2022 at 15h>
- [16] H. S. E. Mebarek, H. Bentaika, Simulation d'un nettoyage de fond du trou lors d'un forage pétrolier, 2018/2019
- [17] Jr. Adam, T.bourgoyne, K. k.Millheim, Applied drilling engineering, 2nd edition, SPE, 1991
- [18] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, Heat and mass Transfer Fundamentals and applications, 5th edition, McGraw-Hill, 2015
- [19] J.J. Azar and G. Robello Samuel, Drilling engineering, Technology & Engineering, 2007.
- [20] Non-Newtonian flow and applied rheology engineering application by R.P.CHHABRA and J.F.RICHARDSON, second edition, Mars 2008.
- [21] R. Venters, B. Helenbrook, A. Goodarz, Numerical simulations of turbulent flow through a 90° elbow, Proceedings of the ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, 2019.
- [22] P.L. Spedding, E. Benard, G.M. McNally, Fluid Flow through 90 Degree Bends, Asia Pacific Chemical Engineering Journal, Mineral Process. I2(1/2), pp. 107- 128, 2004.
- [23] D. Liu, K. Du, S. Qin, X. Zhou, Numerical simulation of flow characteristics in vertical elbows of pneumatic conveying, Vibroengineering procedia. volume 39, december 2021.
- [24] C. H. Gao, Q. Wan, Petroleum Drilling Technology, Science Press, 2017