

N° Ordre..... /Faculté/UMBB/2020.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département Gisements Miniers et Pétroliers
Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :
AFTISSE Kamel
OUSLIMANI Adnane

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie pétrolier : Forage des puits des hydrocarbures.

Thème

**Caractérisation Rhéologique d'une boue OBM dans la phase
12^{1/4} et simulation du transport des déblais. Cas du puits El
Gassi GS-62, HMD**

Devant le jury :

MELLAK Abderamane	Professeur	UMBB	Président
AZRIL Nadjat	MAA	UMBB	Encadreur
BOUBEKEUR Z.El Abidine	MAB	UMBB	Examineur
BOUDOUR Rafik	Chef Département	IAP	Examineur
MADI Youcef	MCA	IAP	Examineur

Année Universitaire: 2019-2020

Remerciement

Tout d'abord, « Louange à Allah qui nous a guidés à ceci. Nous n'aurions pas été guidés, si Allah ne nous avait pas guidés »

[Sourate 7. Al Araf verset 43]

Ensuite nous tenons tout d'abord à remercier tous ceux qui ont contribué de loin ou de près, à ce que ce cursus se tienne dans les meilleures conditions.

Aussi, nous remercions Mr. OUSLIMANI Abdennbi (Superintendant forage a l'ENTP) et Mr. LACEB Mabrouk (Superviseur boue de forage) pour les efforts accomplis à ce que ce cursus se déroule dans les meilleures conditions.

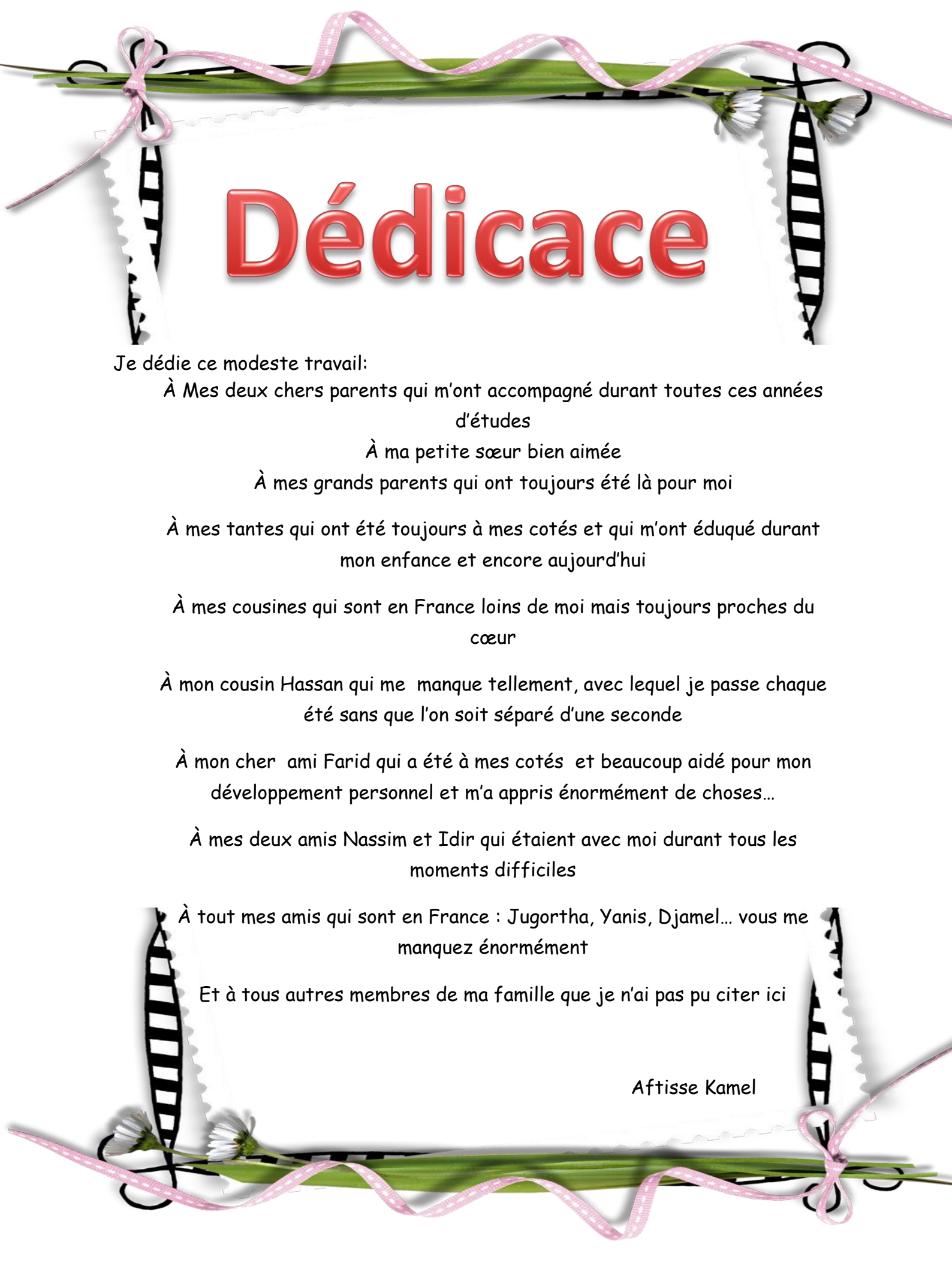
Sans oublier, tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant cette formation et dont nous avons profité pleinement de leurs connaissances.

A notre encadreur, Mlle AZRIL Nadjat pour son engagement pendant toute la durée de ce travail, et pour nous avoir dirigés tout au long de la réalisation de ce travail. Ses orientations et ses encouragements nous ont été d'une précieuse aide nous lui exprimons toute notre reconnaissance.

Nous voudrions aussi remercier Mr. NAIT AMAR Menad qui à cause de son amour pour ce qu'il fait, avait trouvé du temps pour nous aider. Ses conseils ont été très précieux. Encore merci Mr. NAIT AMAR Menad

Je voudrais à cette occasion, remercier les membres du jury pour le temps qu'ils vont consacrer quant à l'examen de ce manuscrit.

A tout nos chers camarades que nous avons côtoyé pendant ces cinq années à Boumerdes; nous tenons à leurs présenter toute notre sympathie et notre hommage, pour tous les moments que nous avons passé ensemble.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

À Mes deux chers parents qui m'ont accompagné durant toutes ces années
d'études

À ma petite sœur bien aimée

À mes grands parents qui ont toujours été là pour moi

À mes tantes qui ont été toujours à mes cotés et qui m'ont éduqué durant
mon enfance et encore aujourd'hui

À mes cousines qui sont en France loins de moi mais toujours proches du
cœur

À mon cousin Hassan qui me manque tellement, avec lequel je passe chaque
été sans que l'on soit séparé d'une seconde

À mon cher ami Farid qui a été à mes cotés et beaucoup aidé pour mon
développement personnel et m'a appris énormément de choses...

À mes deux amis Nassim et Idir qui étaient avec moi durant tous les
moments difficiles

À tout mes amis qui sont en France : Jugortha, Yanis, Djamel... vous me
manquez énormément

Et à tous autres membres de ma famille que je n'ai pas pu citer ici

Aftisse Kamel



Dédicace

Je dédie ce modeste travail:

À Mes deux chers parents qui m'ont accompagné durant toutes ces années d'études.

À Hamou, Belkacem, Zahra, Laetitia et Samy.

À mon grand frère Abdennbi et sœur Djouher qui m'ont accompagnée et soutenue durant toutes ces années d'études.

À mon cousin Lacey Mabrouk qui a été à mes côtés et beaucoup aidé durant mon parcours et m'a appris énormément de choses...

À Monsieur Kecir Mohamed qui a été une source d'inspiration et beaucoup aidé pour mon développement personnel durant mon parcours à l'université.

Et à tous autres membres de ma famille et amis que je n'ai pas pu citer ici.

Ouslimani Adhane



Résumé :

Une étude de caractérisation a été entreprise sur une boue de forage OBM, $d=1.30\text{sg}$ afin de connaître son comportement rhéologique à l'aide du rhéomètre Anton Paar Physica MCR 301. Il a été montré que l'application du modèle classique de Herschel Bulkley, à savoir la détermination des constantes rhéologiques n , k et contrainte seuil ainsi que l'introduction du paramètre température (T) dans ce modèle, est bien adaptée pour la prédiction du comportement rhéologique.

Le fluide de forage joue un rôle important dans la réalisation d'un puits, notamment la remontée des déblais du fond du puits en surface. La prédiction de l'efficacité du fluide sur la remontée des déblais est complexe à cause de divers paramètres, pour cela l'approche basée sur CFD (Computational Fluid Dynamics) est utilisée comme un outil de simulation numérique dans le but de la résolution de ce cas complexe. Ce travail consiste dans le couplage de la résolution numérique de l'écoulement du fluide dans l'espace annulaire avec la présence des déblais en transport, l'option DPM dans le code Fluent ANSYS nous a permis de réaliser ce couplage tout en variant des paramètres tels que la vitesse de rotation des tiges, la vitesse d'entrée du fluide, la densité des déblais ainsi que l'introduction de quelques données expérimentales du forage telles que le débit de pompage, la phase de forage...etc.

Les résultats numériques s'avèrent conséquents suivant d'autres études que ce soit numériques ou expérimentales.

Mots clés : Modélisation d'un fluide complexe, simulation d'écoulement de la boue de forage, Transport des déblais, CFD, DPM.

Abstract:

A characterization study was undertaken on an OBM drilling mud, $d=1.30\text{sg}$ in order to know its rheological behaviour using the rheometer Anton Paar. It was shown that the application of the classical Herschel Bulkley model, namely the determination of rheological constants n , k , Yield Point as well as the introduction of the temperature (T) parameter in this model, is well suited for predicting rheological behaviour.

The drilling fluid plays an important role in the construction of a well, including the transportation of the cuttings from the bottom of the well to the surface. The prediction of the efficiency of the fluid on the transportation of the cuttings is complex because of various parameters; therefore, an approach based on CFD is used as a numerical simulation tool for the purpose of solving this complex case. This work consists in coupling the numerical resolution of the flow of the fluid in the annulus space with the particle transport; namely, the DPM option in the Fluent ANSYS code allows us to perform this coupling while varying parameters such as the speed of rotation of the drill string, the inlet velocity of the fluid, the density of the cuttings and the introduction of some experimental drilling data such as the pumping rate, the drilling phase...etc.

The numerical results were consistent with other studies, whether numerical or experimental.

Keywords: Complex fluid modeling, drilling mud flow simulation, Cuttings transportation, CFD (Computational Fluid Dynamics), DPM (Discrete Phase Model).

Sommaire :

Liste des Figures.

Liste des Tableaux.

Nomenclature.

Introduction Générale :	1
Chapitre I : Généralités sur les fluides de forage	Erreur ! Signet non défini.
1 Les fluides de forage :	2
1.1 Définition :	2
1.2 Fonctions des fluides de forage :	2
1.2.1 Les fonctions primaires :	3
1.2.1.1 Contrôle de la pression de formation :	3
1.2.1.2 Transport des Déblais :	4
1.2.1.3 Maintenir la stabilité des puits de forage :	5
1.2.2 Fonctions secondaires:	6
1.2.2.1 Support du poids des tubulaires:	6
1.2.2.2 Refroidir et lubrifier l'outil et le train de tiges:	7
1.2.2.3 Transmettre la puissance hydraulique à l'outil :	7
1.2.2.4 Fournir un support pour la diaggraphie :	7
1.3 Composition des différents types :	7
1.4 Types de fluides de forage :	8
1.4.1 Les fluides à base d'eau :	8
1.4.2 Les fluides à base d'huile :	9
1.4.3 Les fluides de forage gazeux :	9
1.4.3.1 Forage à l'air :	10
1.4.3.2 Forage à la mousse :	10
1.4.3.3 Forage à la boue aérée :	10
1.5 Propriétés des fluides de forage :	10
Chapitre II : Rhéologie des fluides complexes et Rhéométrie	Erreur ! Signet non défini.
1 Comportement et Rhéologie :	12
1.1 Ecoulement de cisaillement permanent :	12
1.2 Comportement Newtonien :	13
1.2.1 Viscosité de cisaillement :	13

1.3	Comportement non-newtonien indépendant du temps :	14
1.3.1	Fluide rhéofluidifiant :	14
1.3.2	Fluide rhéoépaississant :	14
1.3.3	Limites du modèle Ostwald :	16
1.3.4	Fluides à contrainte de seuil :	16
1.3.4.1	Fluides de Bingham :	17
1.3.4.2	Fluides de Herschel-Bulkley :	18
1.3.5	Méthodes de détermination de la contrainte de seuil :	19
1.4	Les fluides dont la viscosité dépend du temps :	20
1.4.1	Les fluides thixotropes et anti-thixotropes :	20
1.4.2	Les fluides viscoélastiques :	21
2	Principe des rhéomètres Et techniques de mesures :	22
2.1	Techniques conventionnelles en rhéométrie :	22
2.1.1	Rhéomètre de type Poiseuille :	23
2.1.1.1	Loi d'écoulement de Poiseuille :	23
2.1.1.2	Viscosimètres à capillaire de type Ostwald :	24
2.1.2	Viscosimètres à chute de bille :	24
2.1.2.1	Principe :	24
2.1.2.2	Appareillage :	25
2.1.3	Rhéomètres de type Couette :	25
2.1.3.1	Géométrie de Couette cylindrique :	25
2.1.3.2	Géométrie cône-plan :	27
2.1.3.3	Géométrie plan-plan :	28
2.2	Techniques nouvelles en rhéométrie:	28
Chapitre III : Notions sur la dynamique des fluides		Erreur ! Signet non défini.
1	Ecoulement laminaire et écoulement turbulent :	30
2	Ecoulement laminaire et pertes de charges régulières :	32
3	Coefficient de perte de charge :	36
3.1	Perte de charges linéaires ou régulières :	36
3.1.1	Cas de l'écoulement laminaire : ($Re < 2000$ -la loi de Poiseuille)	37
3.1.2	Cas de l'écoulement turbulent ($Re > 3000$):	38
3.2	Perte de charges singulière :	39
3.3	Pertes de charge totales :	40
4	Écoulement de Poiseuille :	41

5	Écoulement dans un espace annulaire :	44
---	---	----

Chapitre IV : Caractérisation de la boue OBM et Simulation du transport des déblais

..... Erreur ! Signet non défini.

1	Description du puits :	46
1.1	Emplacement du puits :	46
1.2	Localisation des offset well :	47
1.3	Les objectifs du puits:.....	48
1.4	Prévision stratigraphique de forage:.....	48
2	Etude de cas (phase 12 ^{1/4}) :	49
3	Programme de la boue de forage (phase 12 ^{1/4}) :	49
3.1	Composition de la boue de forage :	50
3.2	Objectif d'utilisation de cette boue :	50
4	Introduction au travail pratique :	51
5	Modélisation du comportement du fluide de forage utilisé (OBM) :	51
5.1	Caractérisation rhéologique de la boue (OBM) :	51
5.1.1	Mesures Rhéologiques :	51
5.1.2	Protocole expérimental:.....	52
5.1.3	Résultats de la caractérisation:	53
	Nous présentant ci-dessous les rheogrammes obtenues à partir des mesures rhéologiques :	53
5.2	Détermination des trois paramètres n , k , Yield Point :	54
6	Simulation de la remontée des Déblais :	58
6.1	Construction de la géométrie sur Gambit :	58
6.2	Maillage de la géométrie :	59
6.3	Test du Maillage :	60
6.4	Introduction des conditions aux limites et parois (Boundary conditions) :	61
6.5	Simulation par fluent :	61
6.6	RPM Variable:.....	62
6.6.1	RPM= 0 tr/min :	62
6.6.2	RPM= 100tr/min :	64
6.6.3	RPM= 140 tr/min :	66
6.6.4	RPM= 600 tr/min :	68
6.6.5	Temps de remontée des déblais sous la variation de RPM :	70
6.7	Vitesse variable :	71
6.7.1	$V_{entr} = 1.55$ m/s :	71

6.7.2	$V_{entr}=1$ m/s :	71
6.7.3	$V_{entr}=2$ m/s :	72
6.7.4	Temps de remontée des déblais sous la variation de la vitesse d'entrée :	74
6.8	Densité des déblais variable :	75
6.8.1	Temps de remontée des déblais sous la variation de la densité des déblais :	75
Conclusion Générale :		77

Références Bibliographiques.

Annexes.

Liste des Figures :

Figure I.1 : Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997)	2
Figure I.2 : Contraintes exercées sur le sol.....	6
Figure I.3 : Contraintes exercées sur le sol foré.	6
Figure II.1 : Schéma de l'écoulement de cisaillement simple.....	12
Figure II.2 : Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant.	14
Figure II.3 : Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéoépaississant.....	15
Figure II.4 : Rhéogramme «Log-Log» d'un fluide Rhéofluidifiant	15
Figure II.5 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement d'un fluide un fluide rhéofluidifiant (Modèle d'Oswald).....	16
Figure II.6 : Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil.	17
Figure II.7 : Rhéogramme d'un fluide de type Bingham.	18
Figure II.8 : Rhéogramme d'un fluide de type Herschel-Bulkley.	18
Figure II.9 : Evolution de la viscosité en fonction du temps pour un fluide thixotrope.	20
Figure II.10 : Expérience du bouncing-putty (gel de silicone).....	21
Figure II.11 : Schéma d'écoulement de poiseuille.	23
Figure II.12 : Représentation des forces qui agissent sur la bille.	24
Figure II.13 : Appareillage du viscosimètre à chute de bille.....	25
Figure II.14 : Géométrie de Couette cylindrique.....	25
Figure II.15: Géométrie cône-plan (coupe de profil).	27
Figure II.16: Géométrie plan-plan.	28
Figure III.1 : Expérience d'Osborne Reynolds.....	30
Figure III.2 : Différents régime d'un écoulement	31
Figure III.3 : Les régimes d'écoulement.	32
Figure III.4 : Evolution de la pression totale (charge) avec la progression de l'écoulement.....	35
Figure III.5 : Expérience de Nikurazde	37
Figure III.6 : Abaques de Nikurazde	37
Figure III.7 : Diagramme de Moody	39
Figure III.8 : Abaques de pertes de charge.....	40
Figure III.9 : Liste non exhaustive des quelques singularités typiques	40
Figure III.10 : Ecoulement de poiseuille (Ecoulement cylindrique dans une conduite cylindrique)	41
Figure III.11 : Le profil parabolique des vitesses de fluide en écoulement de poiseuille	43
Figure III.12 : Ecoulement dans une canalisation annulaire	44
Figure IV.1 : Emplacement du puits et la route d'accès.	46
Figure IV.2 : Coordonnées de surface récupérées sur le serveur de données de SH OpenWells.	47
Figure IV.3 : Schéma géotechnique du puits GS 62.	48
Figure IV.4 : Rhéomètre MCR 301 utilisé pour la caractérisation Rhéologique.	46
Figure IV.5 : Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour des températures différentes.	46
Figure IV.6 : Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour des températures différentes.....	46

Figure IV.7: Programme de commande à la température 25°C.	54
Figure IV.8: Variation de l'indice de consistance k en fonction de la température.	56
Figure IV.9: Programme de commande pour une illustration graphique.	57
Figure IV.10: Modélisation du comportement rhéologique la boue de forage OBM pour différentes températures	58
Figure IV.11: Maillage de la géométrie (vue de haut).	59
Figure IV.12: Maillage de la géométrie (vue de profile et de face).	59
Figure IV.13: Test du maillage (vue de haut).....	60
Figure IV.14: Test du maillage (vue de profile et de face).....	60
Figure IV.15: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 0 tr/min.	63
Figure IV.16: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 0tr/min.....	63
Figure IV.17: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 0tr/min.....	64
Figure IV.18: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 100tr/min.	65
Figure IV.19: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 100tr/min.....	65
Figure IV.20: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 100tr/min.....	66
Figure IV.21: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 140tr/min.	67
Figure IV.22: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 140 tr/min.....	67
Figure IV.23: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 140tr/min.....	68
Figure IV.24: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 600tr/min.	69
Figure IV.25: Profile de vitesse des déblais à 600tr/min.....	69
Figure IV.26: Temps de remonté des déblais pour RPM variable.	70
Figure IV.27: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à $V=1\text{m/s}$,rpm=100tr/min.....	71
Figure IV.28: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à $V=1\text{m/s}$,100 tr/min.....	72
Figure IV.29: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à $V=2\text{m/s}$, rpm=100tr/min.....	73
Figure IV.30: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à $V=2\text{m/s}$, 100 tr/min.....	74
Figure IV.31: Temps de remonté des déblais pour Ventr variable.....	74
Figure IV.32: Temps de remonté des déblais avec densité des cuttings variable.....	75

Liste des Tableaux :

Tableau I.1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.....	8
Tableau II.1: Les principales lois rhéologiques d'écoulement utilisées pour décrire le comportement de tels fluides à contrainte de seuil.....	19
Tableau IV.1: Offset Well.	47
Tableau IV.2: Le programme de la BHA.	49
Tableau IV.3: Caractéristiques du fluide forage utilisé.	49
Tableau IV.4: Composition du fluide de forage.	50
Tableau IV.5: Caractéristiques de rhéomètre Anton Paar Physica MCR 301.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV.6: Caractéristiques de la géométrie.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV.7: Paramètres rhéologiques et convergence.	55
Tableau IV.8: Modélisation de l'indice de consistance k en fonction de la température.	55
Tableau IV.9: La géométrie utilisée.	59
Tableau IV.10: Les conditions aux limites.....	61
Tableau IV.11: Les paramètres des déblais (cuttings).....	62
Tableau IV.12: Conditions aux limites.....	62
Tableau IV.13: Temps de remonté des déblais sous différentes vitesses de.	70
Tableau IV.14: Temps de remonté des déblais sous différentes vitesses d'entrée.	74
Tableau IV.15: Densité des déblais dont la simulation est faite.....	75
Tableau IV.16: Temps de remonté des déblais sous différentes densité des déblais.....	75

Nomenclature:

BHA: Bottom Hole Assembly.

C: Couple (N/m)

CFD: Computational Fluid Dynamics.

Cte : Constante

D : Diamètre (m)

De : Nombre de Déborah.

DPM: Discrete Phase Model.

e: Entrefer (m)

g: Accélération Gravitationnel (m/s^2)

HSE : Hygiène sécurité environnement.

k: Indice de consistance (Pa.s^n)

K : Coefficient de perte de charge singulière.

L : Longueur (m)

m: Nombre de mesures.

n: Indice d'écoulement.

NPT: Non Productive Time.

OBM: Oil Base Mud.

Q/q_v : Débit volumique (m^3/s)

R/r : Rayon.

R^2 : Coefficient de détermination.

Re : Nombre de Reynolds.

ROP: Rate of penetration.

RPM: Rotation per minute.

S: Terme source dans la conservation du mouvement.

s : Surface.

sg: Specific Gravity.

S_m : Terme source dans la conservation de la masse.

t: Temps(s).
T: Température (°C).
TVD: True Vertical Depth.
V: Vitesse (m/s)
WBM: Water Base Mud.

Lettres grecques :

Ω : Vitesse angulaire de rotation (rad/s).
 μ : Viscosité dynamique (Pa.s)
 η_B : Viscosité plastique de Bingham (Pa.s)
 $\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement (s^{-1})
 ΔP : Différence de pression (Pa)
 Δp_t : Pertes de charge
 Δx : Longueur (m)
 ∇ : Nabla.
 ρ : Masse Volumique du fluide (kg/m^3)
 ρ_s : Masse volumique de la Bille (kg/m^3)
 τ : Contrainte de cisaillement (Pa)
 τ_i : Contrainte seuil (Yield Point)
 λ : Coefficient de perte de charge linéaire.
 ε/D : Rugosité relative.
 ε : Rugosité de la surface interne de la conduite (mm)

Introduction Générale:

La boue de forage joue un rôle primordial dans la réalisation d'un puits dans les bonnes conditions économique et sécuritaire (équipements et humaines), parmi ces fonctions principales on peut citer la remontée des déblais qui implique le bon nettoyage du puits.

Le nettoyage du puits s'avère un point important dans le forage d'un puits vertical ou horizontale tel qu'il nous évite les instrumentations (les coincements de la garniture de forage...etc.), et favoriser un avancement optimale tout en faisant un bon nettoyage au niveau de l'outil de forage ...etc.

Pour assurer un bon nettoyage du puits, divers paramètres sous contraintes, que ça soit dépendant ou indépendants, contribuent pour réussir une remontée des déblais optimale tel qu'ils sont devisés en deux groupes :

- Paramètres reliés à la rhéologie du fluide (la Viscosité, la Contrainte Seuil, la Thixotropie)
- Paramètres reliés à la cinématique du fluide (l'intensité de la vitesse du fluide, le profile de vitesse du fluide, la rotation du train de tige qui influe la circulation du fluide et des déblais)
- Paramètres reliés à la nature des déblais (forme, densité, diamètre...etc.)

Dans ce travail, notre étude s'est portée sur la simulation du transport des déblais par le code ANSYS Fluent sous l'influence des paramètres cinématique (vitesse d'entrée du fluide, vitesse de rotation de la garniture RPM) et paramètres reliés à la nature des déblais (densité)

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

Le premier Chapitre est dédié à la description et types des fluides de forages et leurs fonctionnalités primaires et secondaires.

Le deuxième Chapitre sera consacré à la rhéologie des fluides ainsi que les principes de rhéomètre et techniques de mesures qui représente un point essentiel dans la modélisation d'un fluide.

Le troisième Chapitre sera consacré à la dynamique des fluides dont les types des régimes d'écoulements (Laminaire, Turbulent lisse et rugueux) ainsi que l'illustration de l'écoulement de poiseuille et écoulement dans l'espace annulaire.

Le quatrième Chapitre sera consacré à la modélisation du fluide de forage étudié ainsi que la simulation par le code ANSYS Fluent le profile de vitesse du fluide et celle des déblais ainsi que leurs trajectoires sous l'influence des paramètres cités ci- dessus.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale dans laquelle une synthèse du travail réalisé sera présentée.

Chapitre I
***Généralités sur les fluides de
forage***

1 Les fluides de forage :**1.1 Définition :**

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...etc.). Le fluide de forage était déjà présenté en 1933 lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications [1]. Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par **Evans et Reid**. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille. A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Il est ensuite réutilisé [2].

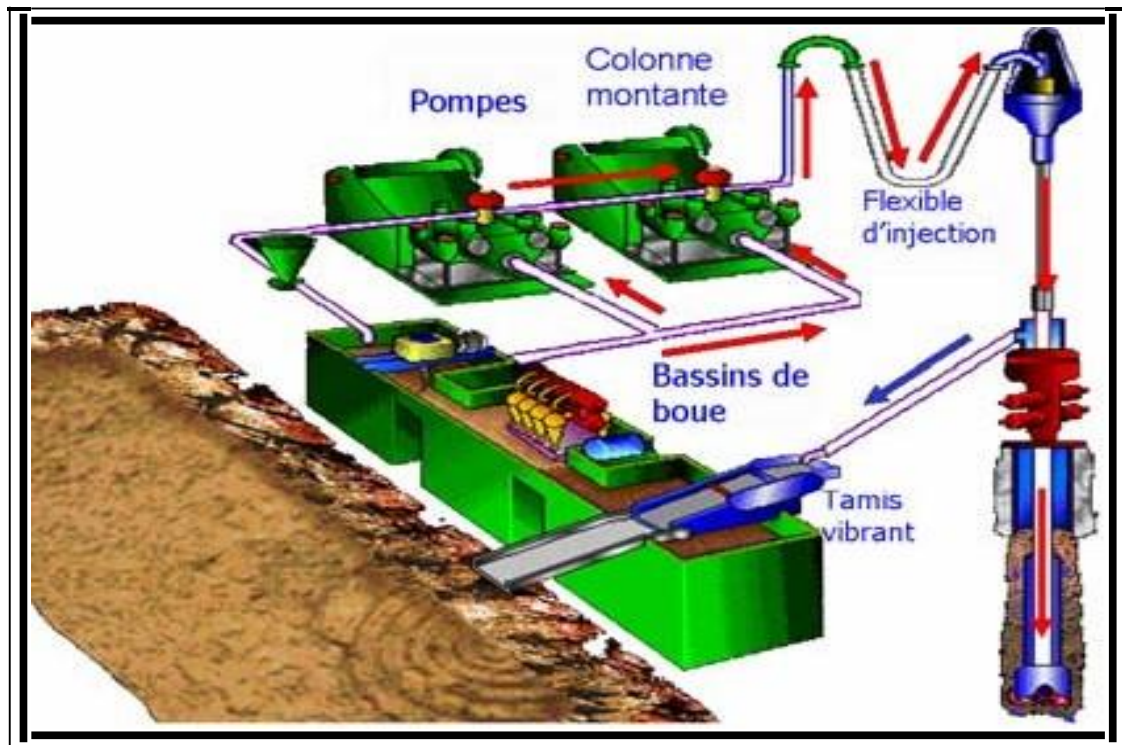


Figure I.1 : Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997)

1.2 Fonctions des fluides de forage :

L'objectif d'une opération de forage est de forer, d'évaluer et de compléter un puits qui produira du pétrole et/ou du gaz en toute efficacité et minimiser les endommagements. Les fluides de forage remplissent de nombreuses fonctions essentielles qui permettent d'atteindre cet objectif.

Un fluide de forage bien conçu permettra à un opérateur d'atteindre l'objectif géologique souhaité au coût global le plus bas. Un fluide de forage devrait améliorer les taux de pénétration, réduire les problèmes du puits et minimiser les dommages à la formation.

L'enlèvement des déblais de forage, le maintien de la stabilité du puits et le contrôle des pressions de formation sont d'une importance primordiale pour chaque puits [3]. Bien que l'ordre d'importance soit déterminé par la conception du puits, les conditions et les opérations en cours, les fonctions les plus courantes d'un fluide de forage sont :

- Transporter les déblais du puits.
- Contrôle des Pressions de formation.
- Maintenir la stabilité des puits de forage.
- Sceller les formations perméables.
- Suspendre les déblais au fond du trou et les ramener en surface.
- Minimiser les dommages aux réservoirs.
- Refroidir, lubrifier et soutenir l'outil de forage et l'ensemble du train de tige.
- Transmettre l'énergie hydraulique aux équipements de fonds (moteur de fond ...etc.) et l'outil.
- Assurer une bonne récupération des données.
- Contrôler la corrosion.
- Faciliter la cimentation et la complétion.
- Minimiser le risque d'HSE.

1.2.1 Les fonctions primaires :

Les fluides de forage sont conçus et formulés pour remplir trois fonctions principales :

- Contrôler la pression de formation.
- Transport de déblais.
- Maintenir la stabilité du puits de forage.

1.2.1.1 Contrôle de la pression de formation :

Un fluide de forage contrôle la pression souterraine par sa pression hydrostatique. La pression hydrostatique est la force exercée par une colonne de fluide et dépend de la densité de la boue et de la profondeur verticale réelle (TVD).

L'instabilité d'un forage est le résultat naturel des contraintes mécaniques inégales et des interactions et pressions physico-chimiques créées lorsque les surfaces sont exposées au cours du forage d'un puits. Le fluide de forage doit surmonter à la fois la tendance du trou à s'effondrer en raison d'une défaillance mécanique et/ou d'une interaction chimique de la formation avec le fluide de forage.

Les pressions normales de la formation varient d'un gradient de pression de 0,433 psi/ft (équivalent à 8,33 lb/gal d'eau douce) dans les zones terrestres à 0,465 psi/ft (équivalent à 8,95 lb/gal) dans les bassins marins. L'altitude, l'emplacement et les divers processus et histoires géologiques créent des conditions dans lesquelles les pressions de formation

s'écarternt considérablement de ces valeurs normales. La densité du fluide de forage peut aller de celle de l'air (essentiellement 0 psi/ft), à plus de 20,0 lb/gal (1,04 psi/ft).

Dans la plupart des zones de forage, un fluide en eau douce qui comprend les solides incorporés dans l'eau provenant des formations souterraines de forage est suffisant pour équilibrer les pressions de la formation. Cependant, des formations anormalement pressurisées peuvent être rencontrées, ce qui nécessite un forage à plus haute densité du fluide de forage pour contrôler les pressions de formation. L'incapacité à contrôler les pressions de fond du puits peut aboutir à une intrusion des fluides de formation traversées, entraînant une venue, ou une éruption.

La pression hydrostatique contrôle également les contraintes adjacentes au puits de forage autres que celles exercées par le fluide de formation. Dans les régions géologiquement actives, les forces tectoniques imposent des contraintes dans les formations et peuvent rendre les puits de forage instables même lorsque la pression du fluide de formation est équilibrée. Les puits de forage des formations soumises à des contraintes tectoniques peuvent être stabilisés en équilibrant ces contraintes avec la pression hydrostatique. De même, l'orientation du puits de forage dans des intervalles à angle élevé et à l'horizontale peut entraîner une diminution de la stabilité du puits de forage, qui peut également être contrôlée par la pression hydrostatique [3].

1.2.1.2 Transport des Déblais :

Comme les déblais de forage sont générés par l'outil de forage, ils doivent être retirés du puits de forage. Pour ce faire, on fait circuler un fluide le long du train de tiges et à travers l'outil de forage, en transportant les déblais de l'annulaire vers la surface. L'enlèvement des déblais est fonction de la taille, de la forme et de la densité des déblais, combinées à la vitesse de pénétration (ROP), à la rotation du train de tiges, ainsi qu'à la viscosité, à la densité et à la vitesse du fluide de forage dans l'annulaire.

Le nettoyage du trou est une fonction essentielle de la boue. Cette fonction est également la plus mal utilisée et la plus mal interprétée. Les solides de forage en général ont une densité de 2,3 - 3,0 sg ; une moyenne de 2,5 sera normalement supposée. Lorsque ces solides sont plus lourds que la boue utilisée pour forer le trou, ils glissent vers le bas à travers la boue.

La vitesse à laquelle un déblai se dépose dans un fluide est appelée vitesse de glissement. La vitesse de glissement d'un déblai est fonction de sa densité, de sa taille et de sa forme, ainsi que de la viscosité, de la densité et de la vitesse du fluide de forage. Si la vitesse du fluide de forage é l'annulaire est supérieure à la vitesse de glissement de la coupe, la coupe sera transportée à la surface.

Quand le fluide est en régime laminaire, la vitesse de glissement des déblais est directement affectée par la viscosité ou les caractéristiques de cisaillement de la boue. Ainsi, lorsque la vitesse à l'annulaire de la boue est limitée par le volume de la pompe ou par l'agrandissement des sections du trou, il est souvent nécessaire de viscosifier la boue pour réduire la vitesse de glissement des déblais de la formation afin de garder le trou propre.

Parfois, la décision d'augmenter la capacité de levage de la boue est compliquée par le fait que toute viscosification de la boue peut avoir un effet négatif sur les autres conditions de forage. Par exemple, si la boue est viscosifiée, les pertes de pression de circulation augmentent et le risque de perte de circulation augmente. De petits lots de boue visqueuse peuvent être utilisés pour soulever les déblais et minimiser la nécessité de viscosifier toute la boue.

L'écoulement du fluide provenant des duses de l'outil exerce une action de jet pour dégager les déblais du fond du puits et de l'outil, et transporte ces déblais vers la surface [3].

Plusieurs facteurs influent sur le transport des déblais:

Si les déblais générés à la face de l'outil ne sont pas immédiatement enlevés et transportés vers la surface, ils seront broyés très fines, collés à l'outil et retarderont la pénétration effective [3].

- Vitesse : L'augmentation de la vitesse annulaire améliore généralement le transport des déblais. Les variables comprennent le débit de la pompe, la taille du trou de forage et la taille du train de tiges.
- Densité : L'augmentation de la densité de la boue augmente la capacité de transport grâce à l'effet de flottabilité sur les déblais.
- Viscosité: L'augmentation de la viscosité améliore souvent l'évacuation des déblais.
- Rotation du train de tiges: La rotation tend à projeter les déblais dans les zones de haute vitesse du fluide à partir des zones de basse vitesse à côté de la paroi du trou de forage et du train de tiges.
- Angle du puits: L'augmentation de l'angle du trou rend généralement le transport des déblais plus difficile.

1.2.1.3 Maintenir la stabilité des puits de forage :

L'instabilité des puits pendant le forage cause :

- Les Eboulements.
- Manoeuvre et temps d'alésage excessifs.
- Pertes de boue.
- coincement des tiges de forage et BHA.
- Perte d'équipement.
- Side Tracks.
- Problème de la pose du casing.

Il y a 3 contraintes qui agissent sur la formation :

- σ_v : Stress vertical - Poids de la roche et de l'eau au-dessus.
- σ_h : Stress horizontal maximum - Stress régional.
- σ_h : Stress horizontal minimum - Stress régional.

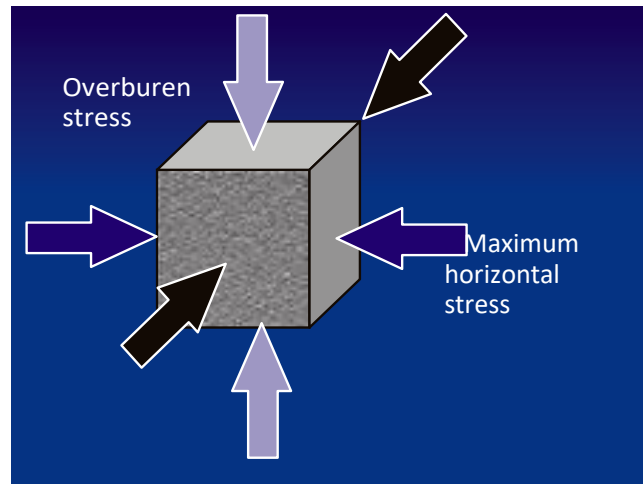


Figure I.2 : Contraintes exercées sur le sol.

Le schéma suivant illustre comment les contraintes du sol s'adaptent au puits de forage comme la pression de la boue se substituant à la capacité de charge de la roche forée [3].

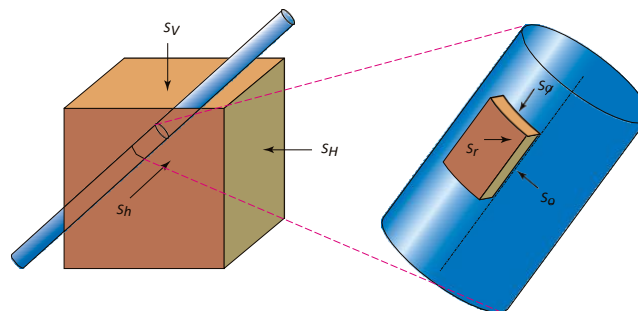


Figure I.3 : Contraintes exercées sur le sol foré.

1.2.2 Fonctions secondaires:

- Support du poids des tubulaires.
- Refroidir et lubrifier l'outil et le train de tiges.
- Transmettre la puissance hydraulique à l'outil.
- Fournir un support pour la diagraphie Wireline.
- Aider à la collecte de données géologiques souterraines et à l'évaluation des formations.

1.2.2.1 Support du poids des tubulaires:

La flottabilité supporte une partie du poids du train de tiges ou du tubage. Le facteur de flottabilité est utilisé pour relier la densité de la boue déplacée à la densité du matériau dans les tubulaires ; par conséquent, toute augmentation de la densité de la boue entraîne une augmentation de la flottabilité [3].

1.2.2.2 Refroidir et lubrifier l'outil et le train de tiges:

Pendant les opérations de forage, une chaleur et une friction considérables sont générées au niveau de l'outil et entre le train de tiges de forage et le puits. Le contact entre le train de tiges de forage et le puits peut également créer un couple considérable lors de la rotation, et une traînée lors des manoeuvres. La circulation du fluide de forage transporte la chaleur loin de ces sites de friction, ce qui réduit le risque de défaillance prématurée de l'outil et d'endommagement du train de tiges. La boue lubrifie également la pénétration des dents de l'outil dans la roche.

Une source de chaleur supplémentaire est dérivée de l'énergie thermique croissante stockée dans les formations à gradient géothermique en profondeur. La boue circulant sert non seulement de lubrifiant aidant à réduire la friction entre les éléments de forage en contact avec la formation, mais il aide également à évacuer la chaleur des points de friction et de la formation [3].

1.2.2.3 Transmettre la puissance hydraulique à l'outil :

La puissance hydraulique générée à l'outil est le résultat de la circulation d'un volume de boue et la chute de pression à travers les duses de l'outil. Cette énergie est convertie en énergie mécanique qui arrache les déblais au fond du trou et améliore le taux de pénétration [3].

1.2.2.4 Fournir un support pour la diagraphie :

Les boues à base d'air/gaz, à base d'eau et à base d'huile ont des caractéristiques physiques différentes qui influent sur la sélection de la diagraphie. La réponse des logs peut être améliorée par la sélection d'une boue adéquate et inversement, l'utilisation d'un fluide donné peut éliminer un log de l'utilisation. La boue doit être évaluée pour assurer la compatibilité avec le programme de diagraphie [3].

Remarque :

La boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie.

A la fin des années 1950, l'utilisation sur chantier d'une grande variété de produits soumis à des spécifications rigoureuses réglementant les propriétés des fluides, a permis de développer la chimie des fluides de forage.

Depuis les années 1990, les contraintes environnementales et les restrictions gouvernementales limitant l'utilisation des produits toxiques et non biodégradables, un intérêt particulier a été apporté à de nouveaux types de fluides.

1.3 Composition des différents types :

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue" vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés. Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile [4].

Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires.

Les boues doivent par exemple être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont donc ajoutés à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Il est possible de classer grossièrement ces composants en 20 catégories [5].

Tableau I.1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.

1	Contrôleurs d'alcalinité	11	Lubrifiants
2	Bactéricides	12	Décoincants (ou dégrippants)
3	Anti-calcium	13	Inhibiteurs de gonflement des argiles
4	Inhibiteurs de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousses	15	Stabilisants haute température
6	Agents moussants	16	Défloculants
7	Emulsifiants	17	Viscosifiants
8	Réducteurs de filtrate	18	Alourdissants
9	Floculants	19	Saumure
10	Colmatants	20	Huile minérale ou organique

1.4 Types de fluides de forage :

1.4.1 Les fluides à base d'eau :

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Base Muds" ou **WBM**. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation (activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines).

Parmi les additifs on peut trouver i) des **viscosifiants**: argiles naturelles (souvent des bentonites), polymères synthétiques ou biopolymères; ii) des **réducteurs de filtrat** servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide: amidons, carboxyméthylcelluloses ou CMC, celluloses polyanioniques (PAC), ou résines; iii) des **inhibiteurs de gonflement** et de dispersion des argiles: KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), les polyalkylèneglycols (PAG); iv) des agents **alourdissants** comme la barytine ("barite" ou sulfate de baryum BaSO_4) et la calcite (carbonate de calcium CaCO_3) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite (Fe_2O_3) ou de la galène (PbS). La calcite est souvent recommandée pour le forage de la phase réservoir à cause de sa solubilité dans l'acide et de son utilisation selon une granulométrie variable pour réduire les problèmes de pertes et d'endommagement; et enfin v) des **colmatants**, additifs plutôt exotiques comme des granuleux (coquilles de noix), des fibreux (fibres de bois, canne à sucre), et des lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales) [6] [7].

1.4.2 Les fluides à base d'huile :

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute.

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau [8].

Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile [9]. Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Muds" ou **OBM**.

La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazoile, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazole [8].

1.4.3 Les fluides de forage gazeux :

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

Citons brièvement les fluides gazeux utilisés:

1.4.3.1 Forage à l'air :

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua, Djebel Onk suite aux pertes importantes rencontrées dans la région [10].

D'autres forages ont été réalisés en 1970 à Djebel Lazreg. D'une façon générale, le forage à l'air a réduit le coût du forage de 50 à 60% par rapport au forage à la boue dans le bassin [11].

1.4.3.2 Forage à la mousse :

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

Des problèmes de sécurité au sujet de l'utilisation de la mousse en réservoir sont à signaler, notamment des explosions dans le cas où le volume d'hydrocarbures gazeux est compris entre 3 et 10% par rapport à l'air. C'est le cas en 1992, du puits RB-13 en Algérie, où lors d'une opération de reprise de puits (de "work-over") avec une boue à la mousse pour éviter les pertes de circulation, une explosion s'est produite suite à une contamination de la boue par une venue d'huile ou de gaz [12].

1.4.3.3 Forage à la boue aérée :

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides.

1.5 Propriétés des fluides de forage :

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises édictées par l'API. Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres: **densité, viscosité, filtrat et réactivité.**

Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres en fonction des besoins (taux de gaz, alcalinité). A partir des mesures réalisées et des connaissances acquises, on ajuste si nécessaire la composition de la boue en "temps réel" en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue.

Historiquement, face aux problèmes majeurs rencontrés dans les premiers forages, la densité est le premier paramètre fondamental pour la caractérisation des fluides de forage [13].

Chapitre II
***Rhéologie des fluides
complexes et Rhéométrie***

1 Comportement et Rhéologie :

1.1 Écoulement de cisaillement permanent :

Dans un écoulement de cisaillement simple, le fluide est placé entre deux plans parallèles distants de "e", dont l'un est en translation par rapport à l'autre (Figure II.1).

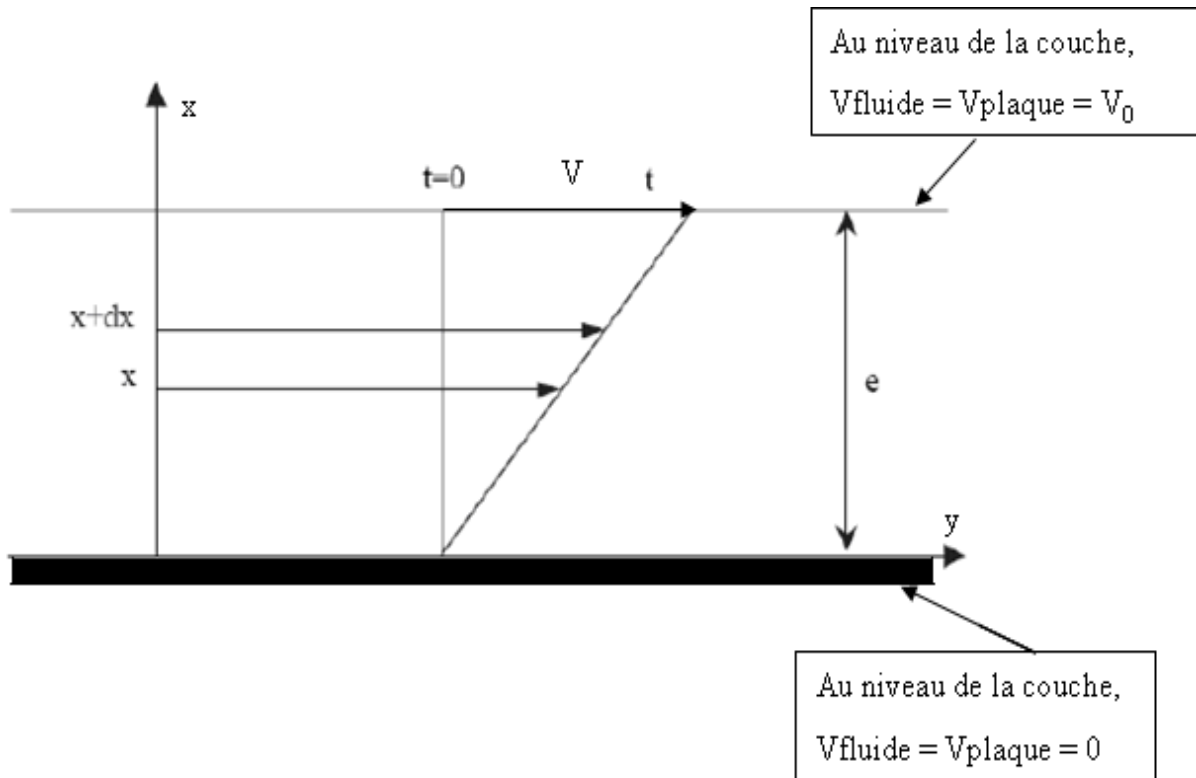


Figure II.1 : Schéma de l'écoulement de cisaillement simple.

Pour schématiser l'écoulement, on pose les hypothèses suivantes:

- L'écoulement est laminaire ; les couches de fluide glissent les unes sur les autres.
- Le matériau est assimilé à une superposition de couches adjacentes, d'une très faible épaisseur.

Considérons un élément de volume infinitésimal situé à l'instant $t = 0$ à une distance x du plan fixe. A un instant t , cet élément de volume aura parcouru la distance $u(x,t)$. On définit V la vitesse (m/s)

$$V = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.1)$$

La vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) est définie par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.2)$$

Elle dépend de la vitesse de déplacement du plan mobile et de l'épaisseur "e " cisailée. Si e est faible, il est possible d'atteindre des vitesses de cisaillement élevées, même avec V faible. D'autre part, la couche de matériau immédiatement en contact avec le plan fixe a une vitesse nulle, et la couche en contact avec le plan mobile a une vitesse V : c'est l'hypothèse de non-glissement à la paroi.

1.2 Comportement Newtonien :

Le comportement rhéologique des solutions et suspensions dépend largement de leur concentration et de la nature de la matière qui les constitue. Il peut varier d'un comportement Newtonien à un comportement plus complexe.

Une solution ou une suspension est dite diluée si les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour qu'on puisse négliger les interactions entre elles. Ces particules suivent un mouvement indépendant décrit expérimentalement par Perrin [14]. et théoriquement par Einstein [15].

1.2.1 Viscosité de cisaillement :

La viscosité est la grandeur la plus couramment utilisée pour décrire le comportement d'un fluide. C'est une propriété intrinsèque du matériau [16]. Le fluide est placé entre deux plans parallèles d'aire S. Une force F est exercée sur le plan supérieur.

La contrainte tangentielle de cisaillement est : $\tau = F/S$ (2.3)

Le gradient de vitesse est donné par la relation (2.2) : $\dot{\gamma} = \frac{\partial V}{\partial x}$

Ces paramètres sont reliés par la relation suivante :

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Où η (pa.s) est la viscosité de cisaillement (loi de Newton).

Un fluide est dit Newtonien si sa viscosité dynamique « η » est indépendante de la contrainte appliquée et de la durée de cisaillement.

Quand le fluide est non-Newtonien, la viscosité n'est plus indépendante du taux de cisaillement.

Il existe un grand nombre de fluides très couramment utilisés qui ont un comportement sous écoulement plus complexe. Dans le cas des suspensions d'argile, lorsque la concentration en particules augmente, l'interaction particule – particule augmente. Les particules s'organisent en agrégats, susceptibles de se déformer ou de s'orienter sous l'effet des forces hydrodynamiques. La rhéologie permet de caractériser ces fluides et d'en déduire des hypothèses de structuration.

1.3 Comportement non-newtonien indépendant du temps :

1.3.1 Fluide rhéofluidifiant :

Le fluide rhéofluidifiant est caractérisé par une diminution de la viscosité apparente lorsque le gradient de vitesse augmente. La figure 2.2. Montre l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement [17].

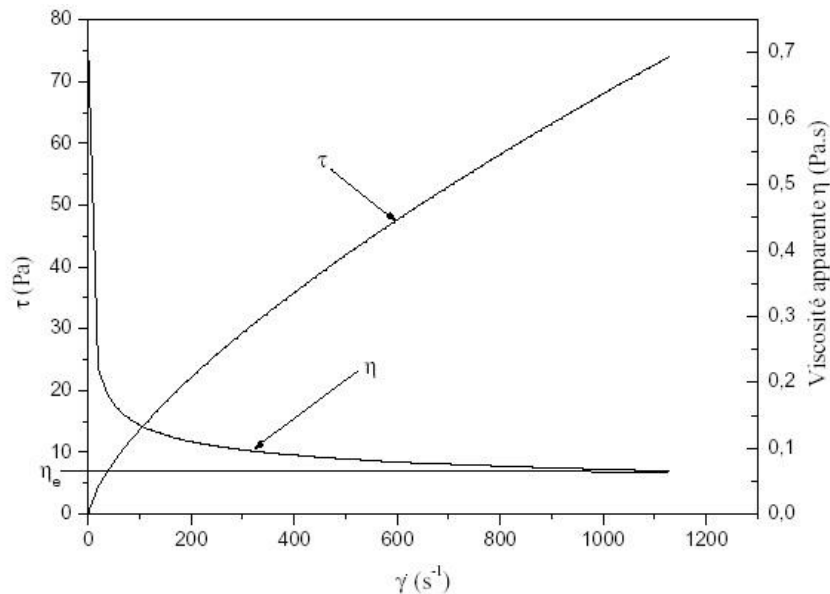


Figure II.2 : Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéofluidifiant.

Les fluides sont représentés, en général, par une loi de puissance ou encore loi d'**Ostwald Waele** représentée par :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

Avec :

τ : contrainte de cisaillement (Pa).

K : indice de consistance.

n : indice d'écoulement sans dimension avec $0 < n < 1$.

Ou « n » est compris entre 0 et 1 pour un fluide rhéofluidifiant.

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement (s^{-1})

1.3.2 Fluide rhéoépaississant :

Les fluides rhéoépaississant sont des fluides dont la viscosité apparente augmente en fonction de la vitesse de cisaillement (Figure II.3)

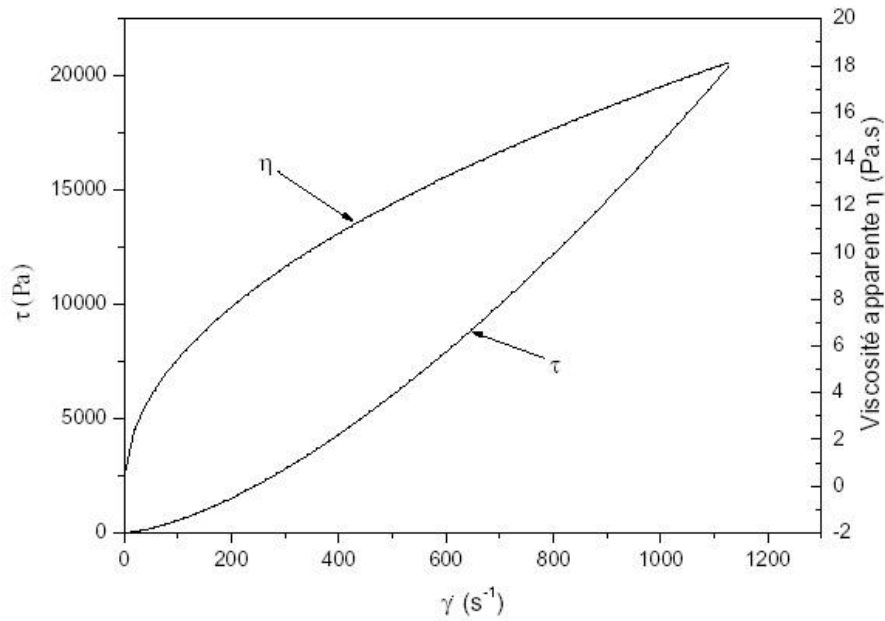


Figure II.3 : Variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour un fluide rhéoépaississant.

De préférence et pour une bonne observation des paramètres de l'équation rhéologique d'état, on trace les rhéogrammes expérimentaux dans les coordonnées «Log-Log», c'est-à-dire la régression linéaire, afin de transformer la courbe en droite (voir Figure II.4). Lorsqu'on fait le logarithme de l'équation (2.5), on aura :

$$\log(\tau) = \log(K) + n \cdot \log(\dot{\gamma}) \quad (2.6)$$

L'indice rhéologique (n) représente donc la pente de la droite et l'indice de consistance (K) est donné par le point de rencontre de la courbe avec l'axe correspondant à $\dot{\gamma} = 1$.

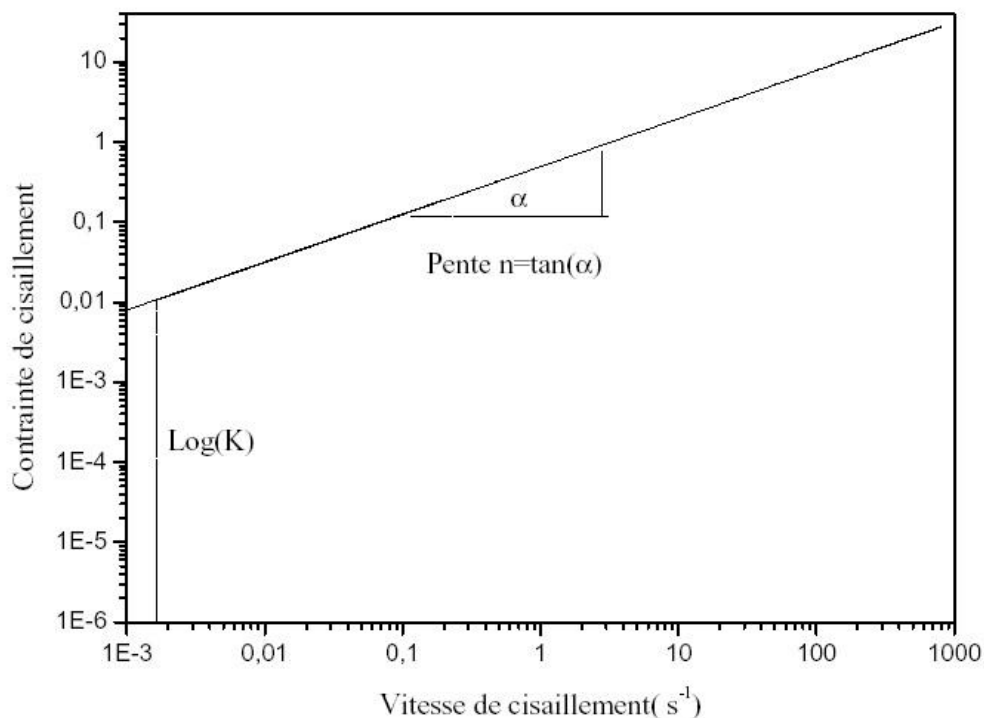


Figure II.4 : Rhéogramme «Log-Log» d'un fluide Rhéofluidifiant

1.3.3 Limites du modèle Ostwald :

Le modèle d'Ostwald a des limites. On considère par exemple un fluide rhéofluidifiant. D'après le modèle, la viscosité devrait diminuer indéfiniment lorsque le taux de cisaillement augmente ; et vice versa, elle devrait augmenter indéfiniment lorsque le taux de cisaillement diminue [17]. On devrait donc obtenir une hyperbole de ce type :

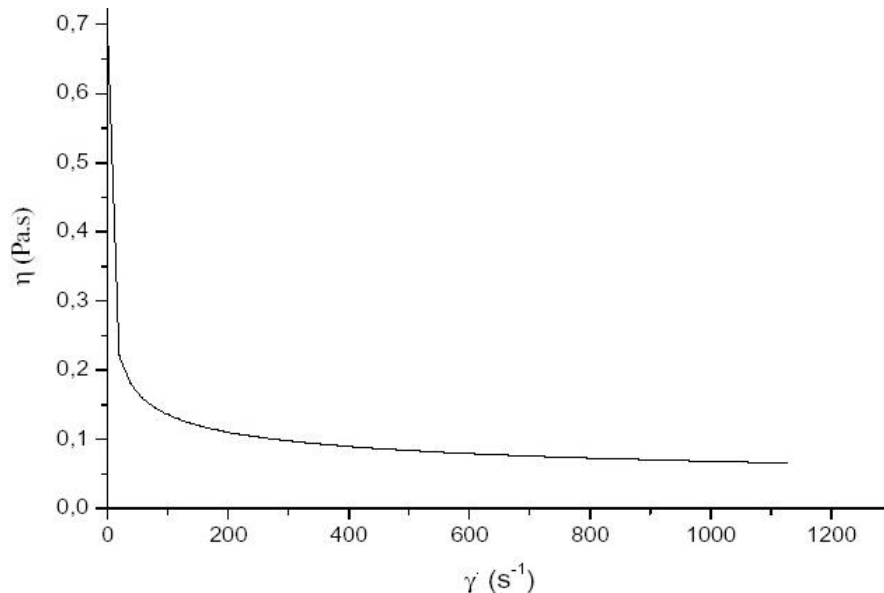


Figure II.5 : Variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement d'un fluide un fluide rhéofluidifiant (Modèle d'Ostwald).

1.3.4 Fluides à contrainte de seuil :

Certains produits comme les boues de forage, les encres d'imprimerie, le dentifrice...etc. ont expérimentalement un comportement de fluide visqueux en écoulement de cisaillement mais ont une fonction de cisaillement τ ($\dot{\gamma}$) non nulle à l'origine: il y a donc une discontinuité de la fonction de cisaillement à l'origine. On dit qu'ils présentent un seuil de contrainte: il faut exercer une contrainte de cisaillement minimale avant de démarrer l'écoulement (Figure II.6). Ces matériaux ne sont donc pas des fluides simples mais des matériaux plus complexes. Ce sont en général des suspensions concentrées de particules solides dans un solvant. Ces particules s'organisent, au repos, en une microstructure qui confère à la suspension un comportement de solide, puis, quand la microstructure est suffisamment désorganisée, la suspension à un comportement fluide [17].

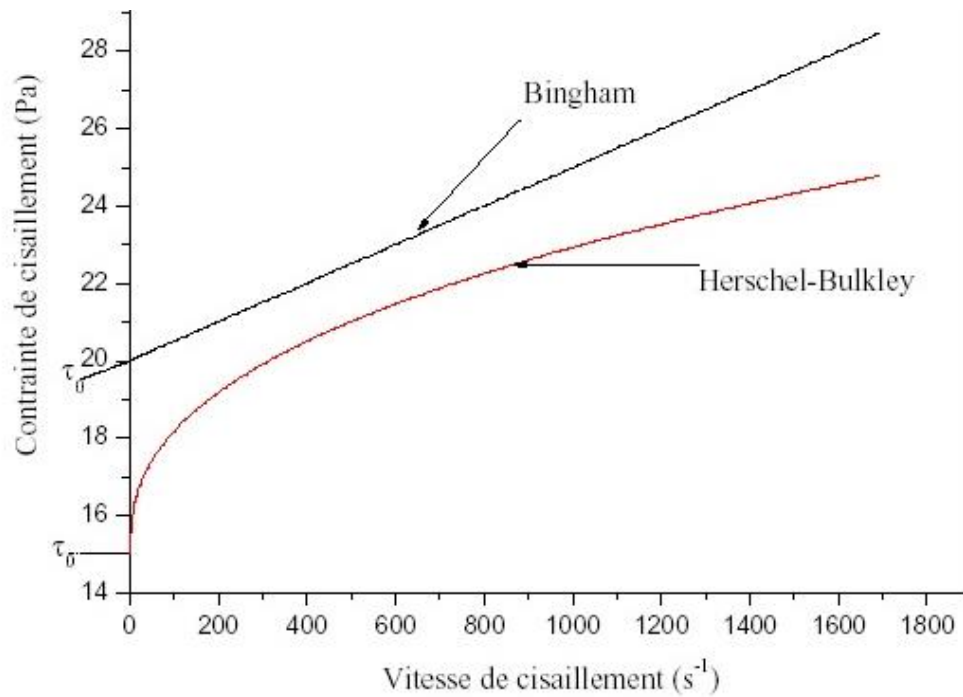


Figure II.6 : Courbe d'écoulement d'un fluide à seuil.

1.3.4.1 Fluides de Bingham :

Pour les liquides binghamiens, autrement dit ; liquides plastiques idéal, la tension de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de cisaillement mais, à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire d'appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement [17]. Cette force correspond à la tension limite (critique) de cisaillement τ_0 . L'équation rhéologique d'état de ce modèle est caractérisée par deux constantes (τ_0 , η_B) :

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

Avec :

τ_0 : le seuil d'écoulement (Contrainte de seuil) en Pa

η_B : Viscosité plastique (de Bingham) déduite à partir de la pente de la courbe représentant $\tau = f(\dot{\gamma})$ en Pa.s

Remarque :

Si $\tau < \tau_0 \Rightarrow \dot{\gamma} = 0$

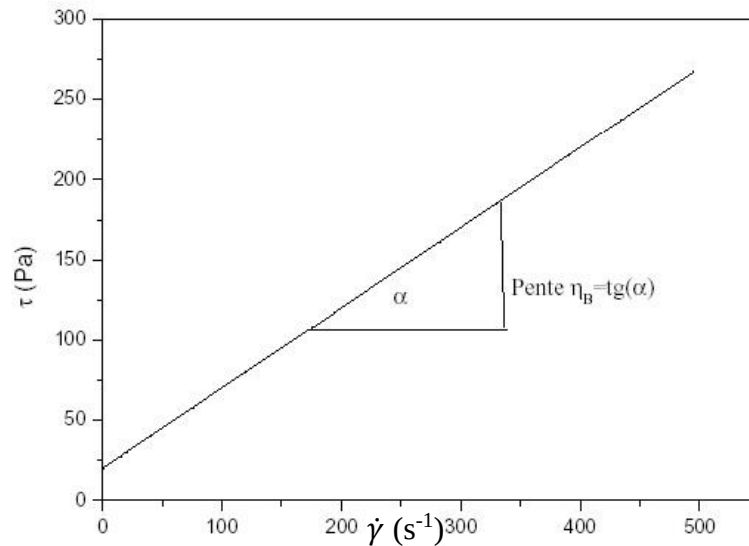
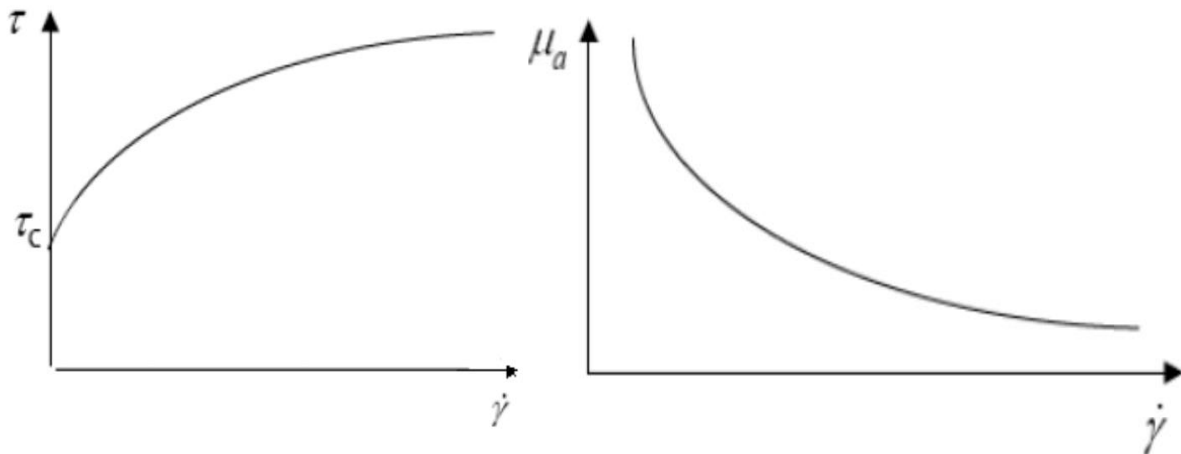


Figure II.7 : Rhéogramme d'un fluide de type Bingham.

1.3.4.2 Fluides de Herschel-Bulkley :

Le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques, la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée (Voir Figure II.8) [17]. L'équation rhéologique de ce modèle est donnée par la formule suivante :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$



a : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

b : viscosité en fonction du taux de cisaillement.

Figure II.8 : Rhéogramme d'un fluide de type Herschel-Bulkley.

Le tableau suivant regroupe quelques lois rhéologiques utilisées pour décrire le comportement plastique de tels fluides.

Tableau II.1: Les principales lois rhéologiques d'écoulement utilisées pour décrire le comportement de tels fluides à contrainte de seuil.

Modèle	Loi rhéologique	paramètres
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_B : Viscosité plastique (Bingham) (Pa.s)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) K : Indice de consistance (Pa.s ⁿ) n : Indice d'écoulement (-)
Casson générale	$\tau^n = \tau_0^n + (\eta_c \dot{\gamma})^n$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_c : Viscosité plastique (Pa.s) n : Indice d'écoulement (-)
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta_c \dot{\gamma})^{1/2}$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_c : Viscosité plastique (Pa.s)

1.3.5 Méthodes de détermination de la contrainte de seuil :

La méthode classique la plus simple pour la détermination du seuil de contrainte consiste à extrapoler la courbe $\tau = f(\dot{\gamma})$ en régime permanent vers les faibles gradients. Dans ce cas la valeur du seuil de contrainte dépend des niveaux de gradients de vitesse les plus faibles qui peuvent être obtenus.

On peut utiliser la régression non linéaire à l'aide d'un logiciel (tel que RGui...Etc.) tout en choisissant le modèle rhéologique adéquat.

La valeur du seuil de contrainte peut être déterminée par mesures en oscillations. Cette méthode est basée sur l'application d'un balayage en contrainte à une fréquence constante. On étudie la réponse du matériau en observant l'évolution du module élastique en fonction de la contrainte appliquée, puis on trace la variation du module élastique (G') en fonction de la contrainte appliquée en échelle logarithmique. Le seuil de contrainte correspond à l'abscisse du point d'intersection entre la tangente au palataux et la tangente au point d'inflexion de la courbe $G' = f(\tau)$.

Une autre méthode consiste à tracer la déformation en fonction de la contrainte en échelle logarithmiques, le seuil de contrainte correspond à l'abscisse du point d'intersection entre la tangente linéaire et la tangente au point d'inflexion de la courbe $\gamma = f(\tau)$ [17].

1.4 Les fluides dont la viscosité dépend du temps :

Au cours du cisaillement, la structure interne du fluide, et par conséquent sa viscosité, peut évoluer. Nous étudions ici différentes caractéristiques d'un fluide dont la viscosité dépend du temps de cisaillement.

1.4.1 Les fluides thixotropes et anti-thixotropes :

Les fluides thixotropes voient leur viscosité diminuer avec le temps lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement constant ou à une contrainte constante. À l'arrêt du cisaillement, la viscosité augmente avec le temps, ce qui indique une réversibilité (au moins partielle) du phénomène. Une évolution typique de la viscosité en fonction du temps pour un fluide thixotrope sous cisaillement est représentée sur la figure II.9.

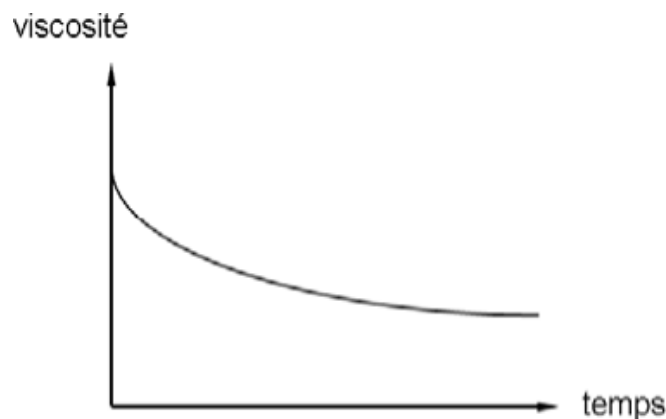


Figure II.9 : Evolution de la viscosité en fonction du temps pour un fluide thixotrope.

De très nombreux fluides sont thixotropes : peintures, encres, suspensions d'argile, boues de forage, crèmes cosmétiques ou pharmaceutiques, produits alimentaires (yahourts, sauce tomate concentrée par exemple), sang, solutions concentrées de polymères, etc. Une interprétation est que la thixotropie reflète la destruction progressive, en fonction du temps et sous cisaillement, d'une microstructure interne du fluide. La microstructure peut signifier par exemple, suivant le fluide étudié, des enchevêtrements d'amas de macromolécules pour les polymères, ou des configurations spatiales de particules pour les suspensions ou de gouttelettes pour des émulsions. La modification de cette microstructure résulte de la compétition entre les contraintes dues à l'écoulement qui détruisent la microstructure, et les collisions et le mouvement brownien qui amènent les éléments composant le fluide à se rencontrer et à reformer la microstructure. Lorsque la microstructure est détruite, la viscosité du fluide diminue; on parle alors de «rajeunissement». Lorsque la microstructure se reforme, la viscosité augmente; on parle alors de «vieillissement »

Si le rajeunissement l'emporte sur le vieillissement, il y a thixotropie. La compétition entre rajeunissement et vieillissement est ainsi le mécanisme à l'origine de la bifurcation de viscosité.

Les fluides anti thixotropes sont plus rarement rencontrés que les fluides thixotropes. Ce sont des fluides pour lesquels la viscosité augmente sous cisaillement et diminue à l'arrêt du

cisaillement. Ceci arrive lorsque, le fluide étant au repos, le mouvement brownien détruit les regroupements des éléments du fluide qui se sont faiblement liés et éventuellement étendus spatialement sous cisaillement. Ainsi, pour un fluide anti thixotrope, l'écoulement favorise la microstructure, alors que le repos la détruit. Une suspension d'oxyde ferrique dans de l'huile minérale ou une suspension de billes de verre de $4\text{ }\mu\text{m}$ dans du sirop de maïs sont des exemples de fluides anti thixotropes [18].

1.4.2 Les fluides viscoélastiques :

Un solide ou un fluide viscoélastique présente des caractéristiques tantôt d'un solide, tantôt d'un liquide, selon le temps de sollicitation auquel le matériau est soumis. Les premières expériences quantitatives sur la viscoélasticité remontent à la fin du XIX siècle et ont porté sur des matériaux tels que le caoutchouc ou la fibre de verre. Sous cisaillement ou élongation, ces matériaux subissent une première déformation instantanée comme un solide élastique, puis continuent à se déformer de manière continue comme un liquide visqueux. A l'arrêt du cisaillement ou de l'élongation, le matériau reprend en partie sa forme initiale. Dans certains cas, le matériau trop sollicité peut se déformer jusqu'à la rupture.

Le Silly Putty (nom en anglais qu'on pourrait traduire par le « mastic fou ») est un exemple de matériau viscoélastique. Il s'agit d'un polymère à base de silicone qui s'étale comme un liquide au repos, et qui rebondit lorsqu'il est projeté sur le sol. Le Silly Putty peut également être brisé en plusieurs fragments en le frappant suffisamment fort avec un marteau ou sur une surface dure. Lorsqu'un matériau viscoélastique est soumis à des sollicitations brèves (par exemple une variation rapide de contraintes, comme lors de l'impact du Silly Putty sur le sol), la configuration moléculaire ou structure interne du matériau n'a pas le temps de se réarranger et de s'adapter à ces changements. Le temps de relaxation du matériau (qui correspond à un réarrangement, à un retour à l'équilibre) est alors trop long par rapport à son temps de sollicitation, et le matériau se comporte plutôt comme un solide. Lorsque le réarrangement de la structure interne est plus rapide que le temps de sollicitation, le matériau se comporte comme un liquide [18].

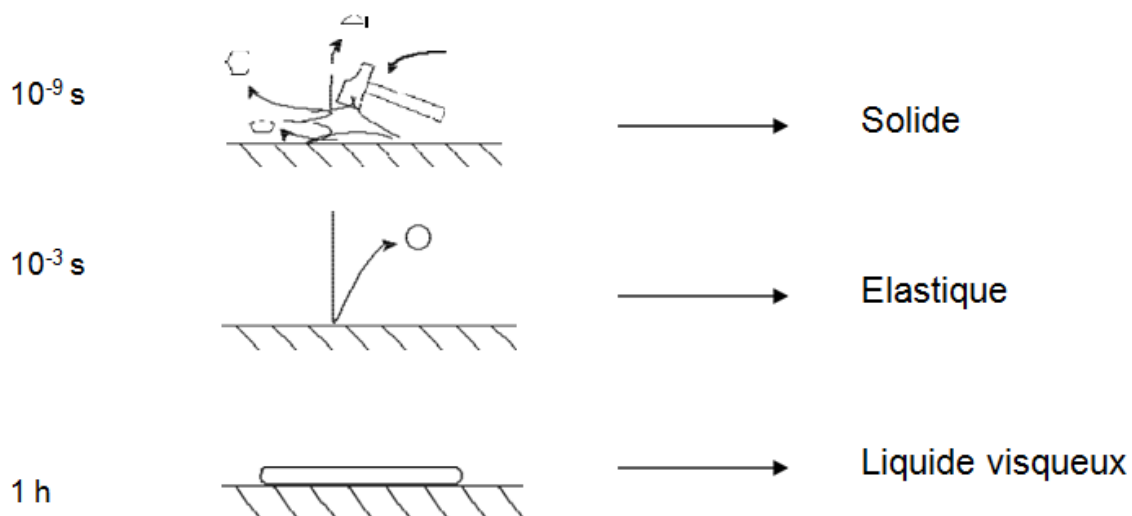


Figure II.10 : Expérience du bouncing-putty (gel de silicone)

Le modèle mécanique équivalent pour représenter le caractère élastique est le ressort, pour le caractère visqueux est l'amortisseur et enfin pour le caractère plastique est le patin.

Le rapport entre le temps de relaxation du matériau et le temps de sollicitation donne un nombre adimensionnel appelé nombre de Déborah

$$De = \frac{t_{relaxation}}{t_{sollicitation}} \quad (2.9)$$

Pour $De \ll 1$, le matériau se comporte comme un liquide; pour $De \gg 1$, le matériau se comporte comme un solide. Pour de l'eau, le temps de relaxation est de l'ordre de 10^{-12} s. Pour de l'huile lubrifiante, ce temps est de l'ordre de 10^{-6} s, et pour certains polymères ce temps peut atteindre plusieurs secondes.

Pour des écoulements stationnaires de liquide présentant des contraintes normales, le nombre de Déborah De est défini comme étant :

$$De = \tau \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

où τ est homogène à un temps: il s'agit d'un temps de relaxation caractéristique du liquide viscoélastique et lié aux contraintes normales. $\dot{\gamma}$ est l'inverse d'un temps de sollicitation du matériau [18].

2 Principe des rhéomètres Et techniques de mesures :

Nous décrivons essentiellement les techniques de rhéométrie classiques permettant de mesurer la viscosité de cisaillement, les contraintes et éventuellement les modules viscoélastiques à l'aide de géométries différentes : couette cylindrique, cône-plan et plan-plan. Nous terminons notre étude par un aperçu sur quelques techniques nouvelles utilisées en rhéométrie : la méthode PIV (Particle Image Velocymetry), la vélocimétrie IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) et enfin la technique PAV (Pièzo Axiale Vibratoire) [19].

2.1 Techniques conventionnelles en rhéométrie :

Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide (viscosité, contraintes normales, etc.), on utilise un appareil de mesure appelé rhéomètre. Un rhéomètre mesure à la fois la contrainte et la déformation d'un fluide en fonction du temps.

Pour mesurer la viscosité de cisaillement $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ un rhéomètre peut appliquer la contrainte τ et mesurer le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (fonctionnement à contrainte imposée), ou vice versa (fonctionnement à taux de cisaillement imposé).

En réalité, le rhéomètre impose soit un couple, soit une vitesse de rotation. Le couple est proportionnel à la contrainte, et la vitesse de rotation est proportionnelle au taux de cisaillement; les deux coefficients de proportionnalité sont des caractéristiques de la géométrie utilisée (Couette cylindrique, cône-plan, plan-plan, etc.) [19].

2.1.1 Rhéomètre de type Poiseuille :

2.1.1.1 Loi d'écoulement de Poiseuille :

Soit un capillaire de rayon R , de longueur L . Le liquide peut s'écouler grâce à une pression motrice $(P_1 - P_2) = \Delta P$. On supposera que le régime d'écoulement est laminaire (vrai si l'écoulement est suffisamment lent, nombre de Reynolds < 2000).

Dès qu'il se met en mouvement, des forces de frottement apparaissent et augmentent jusqu'à ce qu'on atteigne le régime permanent pour lequel les forces de frottement compensent exactement les forces de pression, la vitesse d'écoulement est alors constante [19].

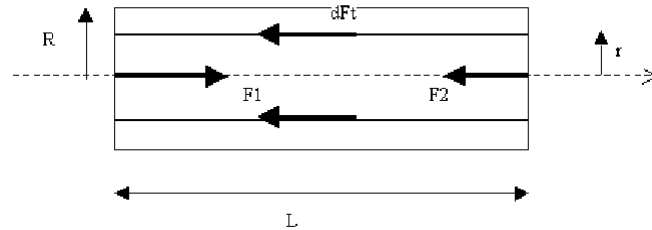


Figure II.11 : Schéma d'écoulement de Poiseuille.

La portion cylindrique de liquide de rayon r est soumise aux forces :

- de pression : $F_1 = P_1.S = P_1 \pi r^2$ et $F_2 = P_2 \pi r^2$
- de frottement visqueux : $F_t = \sum dF_t = \tau .S' = \tau 2 \pi r L$

En régime permanent : $F_1 = F_2 + F_t$

- $\Delta P . \pi . r^2 = \tau . 2 \pi . L$ or $\tau = \eta . \gamma$ et $\gamma = - dv/dr$ ici (v augmente si r diminue)
- $dv/dr = - \Delta P r / 2L\eta$

Cherchons la vitesse à la distance r :

$$v(r) = \int_0^r dv = \int_0^r \frac{\Delta P r}{2\eta L} = \frac{\Delta P}{4\eta L} (R^2 - r^2) \quad (2.11)$$

Calcul du débit du capillaire :

La vitesse du fluide est la même à une distance r du centre du capillaire.

Considérons un volume de fluide infinitésimal distant de r du centre d'épaisseur dr de forme cylindrique : $dV = 2\pi r L dr$

Il s'écoule du capillaire en un instant t , tel que $v = L/t$ donc $dV = 2\pi r v t dr$

Le débit volumique total du capillaire est la somme de tous ces volumes élémentaires divisée par t soit :

$$Q = \int_0^R 2\pi r v(r) dr = \frac{\Delta P \pi}{8\eta L} R^4 \quad (2.12)$$

Dans le cas où la pression motrice est la pesanteur (capillaire vertical et ouvert à l'atmosphère en haut et en bas) alors :

$$Q = \frac{\rho g \pi}{8\eta} R^4 \quad (2.13)$$

Avec :

Q : Débit volumique.

ρ : Masse volumique.

η : Viscosité dynamique.

g : Accélération gravitationnelle.

2.1.1.2 Viscosimètres à capillaire de type Ostwald :

Les rhéomètres de type Poiseuille sont utilisés surtout comme viscosimètres pour les liquides newtoniens de faible viscosité. On mesure le temps d'écoulement d'un volume déterminé de fluide.

$$Q = V / t = \pi R^4 \rho g / (8\eta) \quad \text{et} \quad \text{comme } \eta / \rho = \nu \quad \text{est la viscosité cinématique}$$

$$\nu = K t \quad \text{où } K = \pi R^4 g / (8 V) \text{ est une constante déterminée.}$$

C'est donc la viscosité cinématique que l'on mesure à condition toutefois que le régime d'écoulement soit laminaire, c'est à dire lent [19].

2.1.2 Viscosimètres à chute de bille :

2.1.2.1 Principe :

On lâche une bille (masse volumique ρ_s , rayon R) dans un liquide visqueux (viscosité η , masse volumique ρ): elle chute sous l'effet combiné :

- de la force de pesanteur : $\rho_s V g = \rho_s (4/3 \pi R^3) g$
- de la Poussée d'Archimède : $\rho V g = \rho (4/3 \pi R^3) g$
- de la force de frottement (loi de Stokes): $6\pi R \eta v$

La force de frottement apparaît lorsqu'il y a mouvement et augmente jusqu'à ce qu'on atteigne une vitesse limite v_{lim} pour laquelle la force de frottement et la Poussée d'Archimède compensent exactement la force de pesanteur :

$$\eta = 2/9 g_{lim}^{-1} R^2 (\rho_s - \rho) \quad (2.14)$$

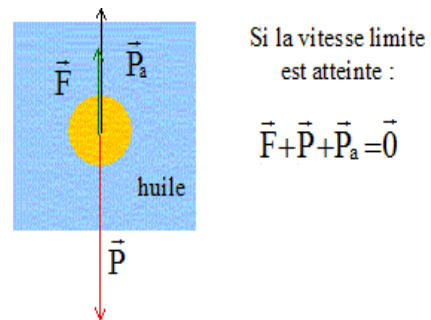


Figure II.13 : Représentation des forces qui agissent sur la bille.

On mesure donc v_{lim} et ρ pour déterminer la viscosité dynamique.

2.1.2.2 Appareillage :

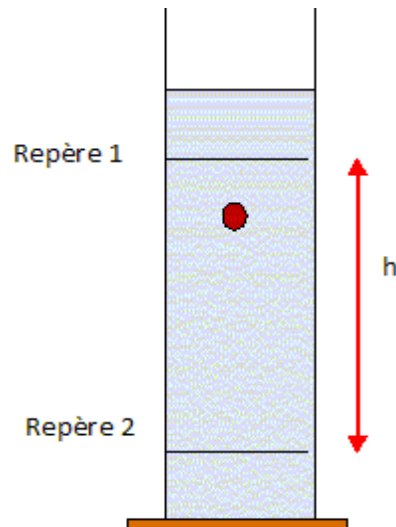


Figure II.13 : Appareillage du viscosimètre à chute de bille.

2.1.3 Rhéomètres de type Couette :

2.1.3.1 Géométrie de Couette cylindrique :

La géométrie de Couette est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative. Le rayon intérieur est noté R_i et le rayon extérieur R_e (et on a donc $R_e > R_i$). L'entrefer e est l'espace entre les deux cylindres ($e = R_e - R_i$). La hauteur du cylindre intérieur est notée h . Les géométries de Couette utilisées ont un cylindre extérieur fixe avec un fond (« cup » en anglais; il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide) et un cylindre intérieur tournant (« bob » en anglais; le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup »). La figure (3.1) représente une coupe de profil d'une géométrie de Couette cylindrique. Le rhéomètre impose un couple au cylindre tournant et mesure la vitesse de rotation de ce cylindre [19].

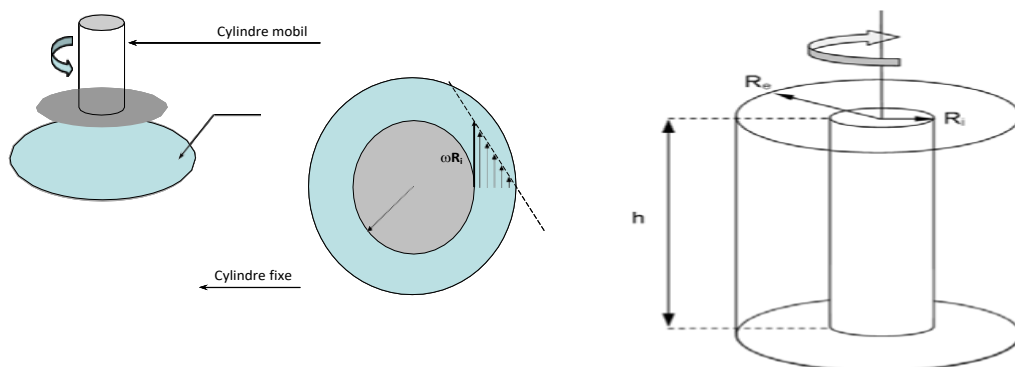


Figure II.14 : Géométrie de Couette cylindrique.

Pour les suspensions, le problème du glissement aux parois peut survenir lors de l'écoulement. Ce problème résulte de la diminution (appelée déplétion) « naturelle » du nombre de particules proches de la paroi (déplétion pouvant être accentuée par la migration des particules). La conséquence du glissement est la mesure d'une viscosité du fluide plus faible que la viscosité réelle et une discontinuité du champ des vitesses (discontinuité située à la frontière entre le fluide et la couche de fluide proche de la paroi et moins concentrée en particules).

Le couple C imposé par le rhéomètre sur le cylindre tournant vaut, en notant la contrainte moyenne sur le cylindre intérieur τ ($r = R_i$) = τ_i

$$C = (\text{distance}) \times (\text{force}) = R_i 2 \pi R_i h \tau_i \quad (2.15)$$

Soit :

$$\tau_i = \frac{C}{2 \pi h R_i^2} \quad (2.16)$$

Pour un entrefer faible ($e = R_e - R_i \ll 1$), le système équivaut à un cisaillement entre deux plaques, et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, fonction de la vitesse angulaire de rotation Ω , s'écrit :

$$\dot{\gamma} = \frac{v_\theta}{e} \quad (2.17)$$

Soit :

$$\dot{\gamma} = \frac{R_i}{R_e - R_i} * \Omega \quad (2.18)$$

Les expressions ci-dessus sont utilisées pour étalonner le rhéomètre, dans une géométrie de Couette classique à entrefer faible: on détermine les constantes de proportionnalité entre contrainte et couple d'une part, taux de cisaillement et vitesse de rotation d'autre part, avec des ajustements pour tenir compte des effets de bord et des imperfections mécaniques du rhéomètre et/ou de la géométrie. En pratique, le constructeur du rhéomètre détermine les constantes de proportionnalité pour les géométries livrées avec l'appareil.

La viscosité $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ mesurée par le rhéomètre est donc une viscosité mesurée en supposant que l'entrefer est faible. En particulier, en faisant cette approximation, on a supposé un profil de vitesse linéaire dans l'expression du taux de cisaillement.

De manière plus générale, pour un entrefer quelconque, il faut distinguer les fluides newtoniens et non newtoniens.

Notons d'abord que, dans le cas général de la géométrie de Couette cylindrique, la contrainte τ dépend de r : la contrainte τ est donc hétérogène dans l'entrefer. Établissons cette dépendance. Par conservation du moment, on a (en notant τ ($r = R_i$) = τ_i) :

$$\tau(r) = \frac{\tau_i R_i^2}{r^2} \quad (2.19)$$

La contrainte τ décroît en $1/r^2$ dans l'entrefer. Le gradient de vitesse varie donc également dans l'entrefer, et le profil de vitesse n'est plus linéaire. Connaissant la variation de la contrainte dans l'entrefer dans un Couette cylindrique, il reste, pour calculer la viscosité du fluide, à déterminer le gradient de vitesse. Il faut pour cela connaître le profil de vitesse du fluide dans l'entrefer [19].

2.1.3.2 Géométrie cône-plan :

La géométrie cône-plan est composée d'un plan fixe et d'un cône de symétrie cylindrique tronquée à sa base (pour éviter en pratique les frottements du cône sur le plan fixe, car le sommet fictif du cône est en contact avec ce plan). Le plan fixe est dans la pratique un disque coaxial avec le cône. Le fluide étudié est compris entre le cône et le plan (voir figure II.15)

La contrainte τ (α_c) sur le cône s'écrit :

$$\tau(\alpha_c) = 3C / (2\pi R^3 \cos \alpha_c) \quad (2.20)$$

α_c étant l'angle entre le cône et le plan horizontal. τ est constante pour un angle α_c donné, et donc en particulier sur la surface du cône (située à l'angle α_c). La variation de la contrainte dans l'entrefer vaut :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \quad (2.21)$$

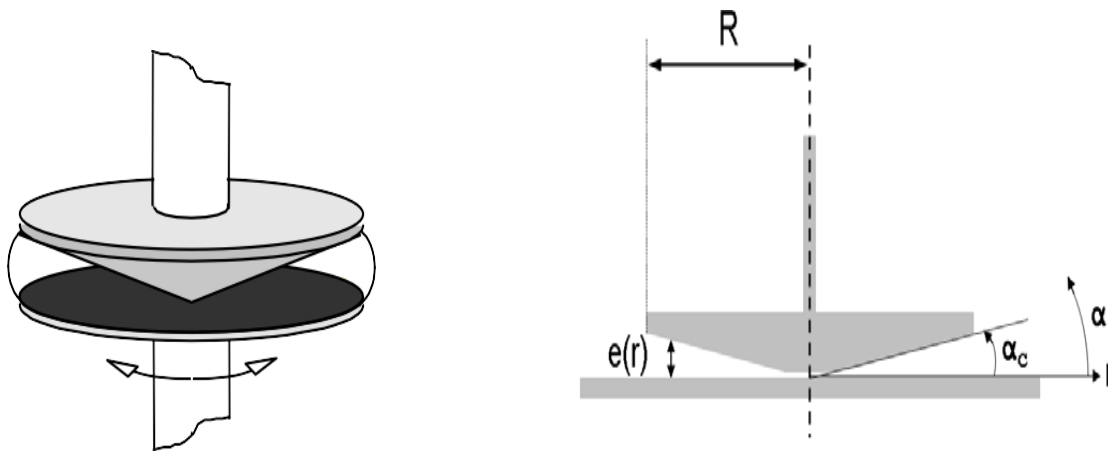


Figure II.15: Géométrie cône-plan (coupe de profil).

La géométrie cône-plan avec un angle α_c petit est donc une géométrie pour laquelle la contrainte est quasi-constante dans l'entrefer. On peut donc s'attendre à des profils de vitesse quasi-linéaires. De plus, le taux de cisaillement global (ici entre le cône et le plan) étant constant radialement, les profils de vitesse ont la même pente pour tout r . Près de la troncature toutefois, l'écoulement ne suit pas les équations établies précédemment. Il faut aussi apporter le plus grand soin à l'alignement horizontal du cône et du plan afin d'avoir un α effectivement constant autour de l'axe de rotation, et faire attention aux effets de bords (sur la surface libre en contact avec l'air). En effet, sur cette surface libre et en particulier pour les fluides non-newtoniens, une grande quantité de matière peut engendrer des contraintes supplémentaires

dans le fluide, et au contraire un manque de matière (qui cause un «creusement», c'est-à-dire une zone incurvée vers l'échantillon) fait artificiellement baisser la viscosité mesurée [19].

2.1.3.3 Géométrie plan-plan :

La géométrie plan-plan est constituée de deux plaques horizontales espacées par un entrefer donné (réglable par l'utilisateur). En pratique, les plaques sont des disques coaxiaux

Cette géométrie est privilégiée pour des pâtes granulaires car l'entrefer, constant, est ajustable. On peut donc choisir un entrefer supérieur à la taille d'une particule, ce qui évite qu'une particule ne se coince entre les deux plaques [19].

Le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (et la contrainte τ) dépend de la distance r à l'axe de rotation, et c'est l'inconvénient par rapport au cône-plan. L'entrefer h , lui, ne dépend pas de r . On a, avec Ω la vitesse de rotation:

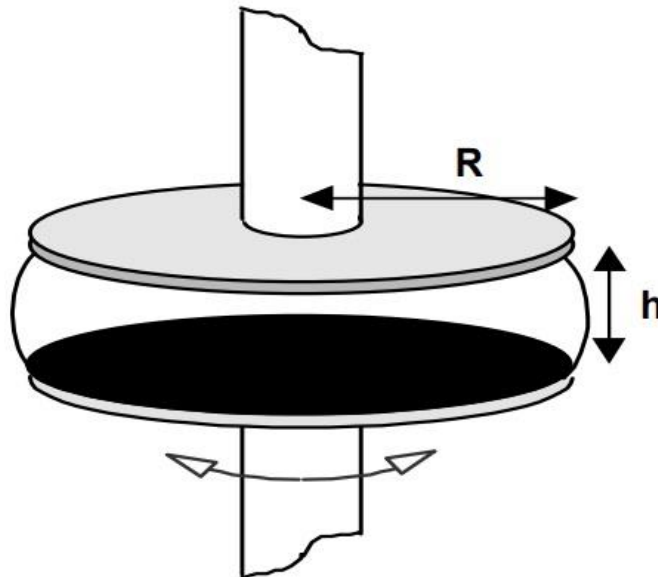


Figure II.16: Géométrie plan-plan.

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{r}{h} \Omega \quad \dot{\gamma}(r=R) = \frac{R}{h} \Omega \quad (2.22)$$

$\dot{\gamma}$ varie de zéro lorsque $r = 0$ à $R\Omega/h$ lorsque $r = R$.

$\dot{\gamma}(r)$ peut être aisément varié en modifiant l'entrefer h .

La contrainte τ est constante verticalement dans le fluide, mais varie en fonction de r .

2.2 Techniques nouvelles en rhéométrie:

Ce sont des techniques de visualisation non destructives de l'écoulement du matériau entre un plan en mouvement et un plan fixe. Par celles-ci on va pouvoir réaliser des mesures de vitesse de glissement, d'effets migratoires, de sédimentation sous écoulement, où encore, de champs de vitesses créés par la rotation du mobile. Dans ces techniques, nous retrouvons tous

l'appareillage rhéoptique qui permet une visualisation directe de l'écoulement dans l'entrefer et donnent accès à des mesures de profil de vitesse par le biais de l'utilisation de traceur et d'une méthode PIV (particle Image de Velocymetry). Nous pouvons citer, la mesure par biréfringence ou dichroïsme permet de mesurer par exemple la structure créée par des feuillets d'argile ou encore l'orientation de chaînes de molécules sous écoulement [19].

On peut citer aussi les mesures ultrasons qui permettent une résolution spatiale et temporelle suffisante pour avoir accès aux vitesses proches du rotor ou à un suivi de l'écoulement sur plusieurs heures. De plus, la vélocimétrie IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) qu'on rencontre souvent dans la littérature récente. Cette technique est en pleine expansion. En effet, elle permet d'obtenir des informations locales sans perturbations de l'écoulement et aucun traceur n'est nécessaire : mesurer directement des profils de vitesse au sein de l'entrefer de géométries conventionnelles en suivant la relaxation du spin d'un noyau d'atome (par exemple le proton du noyau d'hydrogène) préalablement excité et donc sorti de son orientation préférentielle. Elle a pour avantage de traiter les matériaux complexes comme les boues de forage.

Chapitre III
Notions sur la dynamique des
Fluides

1 Ecoulement laminaire et écoulement turbulent :

Etudier l'écoulement d'un fluide réel revient à résoudre l'équation fondamentale de la dynamique (équation de Navier-Stokes):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \mu\Delta\vec{v} + \rho\vec{g} \quad (3.1)$$

Mais en pratique, cette équation ne peut se résoudre analytiquement qu'en introduisant des hypothèses de travail qui permettront de résoudre cette équation dans le cadre de régimes d'écoulement particuliers le régime laminaire et le régime turbulent.

- On dit qu'un écoulement est laminaire lorsque le mouvement des particules fluides se fait de façon régulière et ordonnée.
- L'écoulement est turbulent lorsque le déplacement est irrégulier et que des fluctuations aléatoires de vitesse se superposent au mouvement moyen du fluide. En régime turbulent, on devra utiliser des relations empiriques généralement déterminées expérimentalement.

L'une des premières analyses de la transition d'un régime laminaire vers la turbulence est basée sur des observations d'écoulements dans une conduite cylindrique effectuées par Reynolds en 1883.

Le montage expérimental schématisé sur la figure III.1 comporte un réservoir de liquide sous pression débouchant sur un conduit cylindrique. Un tube mince permet l'injection de colorant. Lorsque l'écoulement est laminaire, le filet décolorant reste mince, régulier et parallèle à la paroi du cylindre. En écoulement turbulent, le colorant est rapidement dispersé dans cette situation, une mesure de la composante de vitesse axiale montre que celle-ci fluctue de façon aléatoire dans l'espace et dans le temps [20].

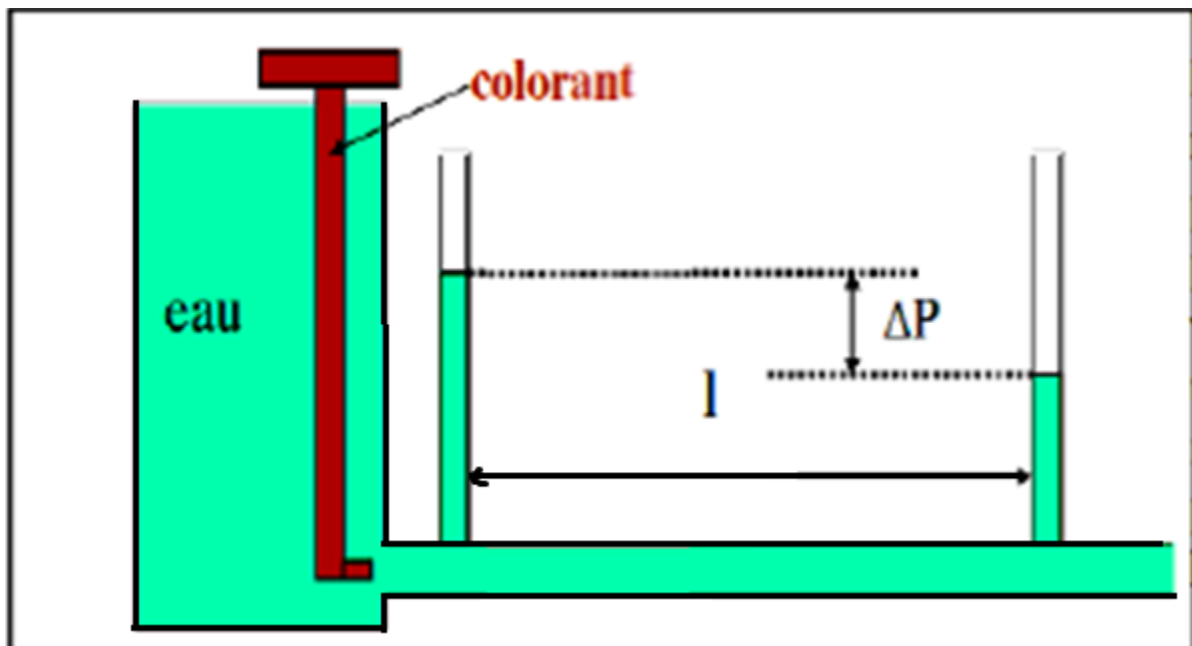


Figure III.1 : Expérience d'Osborne Reynolds

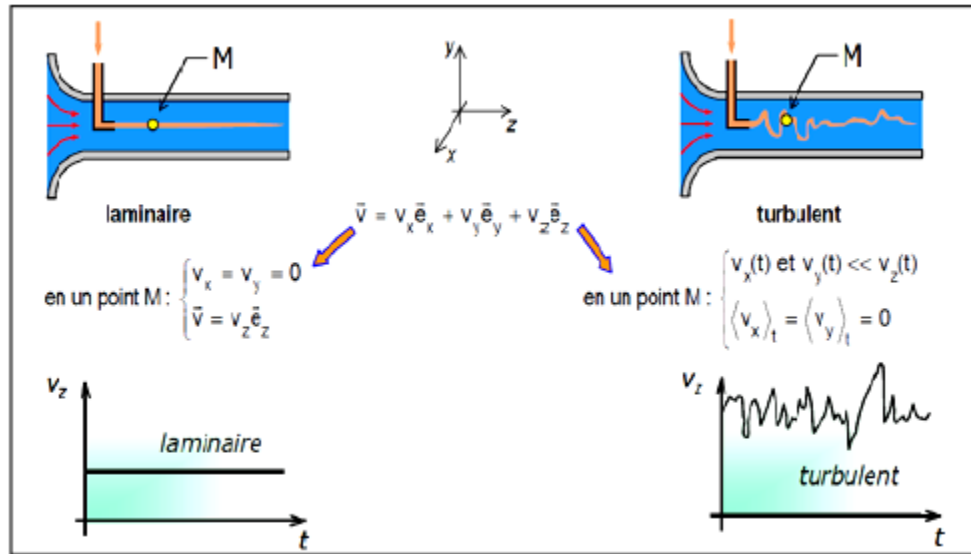


Figure III.2 : Différents régime d'un écoulement

À partir de ces observations, les travaux de Reynolds ont alors permis de montrer que la transition du régime laminaire au régime turbulent (Figure III-2) n'est pas seulement conditionnée par le débit mais dépend d'un ensemble de paramètres qu'il convient de regrouper pour former une quantité sans dimension qu'on appellera « nombre de Reynolds » Eq. (3.2). Ce nombre prend en compte la vitesse moyenne de l'écoulement V , le diamètre D de la conduite (ou tout autre paramètre de longueur caractérisant l'écoulement), ainsi que les propriétés intrinsèques du fluide (masse volumique ρ et viscosité μ) [20]:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3.2)$$

Où :

ρ : masse volumique $[\rho] = \text{ML}^{-3}$

μ : viscosité $[\mu] = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$: viscosité cinématique $[\nu] = \text{L}^2\text{T}^{-1}$

V : vitesse $[V] = \text{LT}^{-1}$

D : diamètre $[D] = \text{L}$

Remarque: Compte tenu des dimensions de chacun des paramètres, on vérifiera facilement que le nombre de Reynolds est bien sans dimension.

On constate généralement que la transition d'un régime laminaire à un régime turbulent (Figure II-3) s'effectue lorsque $Re = 2000 = Re_c$: nombre de Reynolds critique.

- Pour $Re < 2000$, l'écoulement reste laminaire et une perturbation localisée introduite dans l'écoulement est progressivement dissipée.

- Dans un intervalle de Re de 2000 à 3000, des « paquets » turbulents sont convectés dans le conduit de façon intermittente.
- Aux nombres de Reynolds plus élevés $Re > 3000$, l'écoulement devient turbulent dans son ensemble ; c'est-à-dire que les forces de viscosité ne sont plus suffisantes pour empêcher les inévitables perturbations d'engendrer des tourbillons qui se superposent à l'écoulement global.

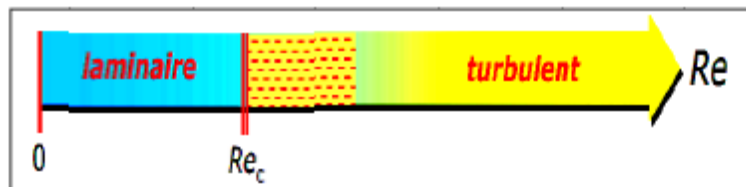


Figure III.3 : Les régimes d'écoulement.

Remarque : En prenant certaines précautions pour éviter au maximum les perturbations (vibrations, aspérités de la conduite...) l'écoulement peut rester laminaire au-delà de Re_c jusqu'à une certaine limite imprécise) qui dépendra essentiellement du niveau de précautions prises pour repousser l'apparition des turbulences

2. Écoulement laminaire et pertes de charges régulières :

Que l'écoulement soit laminaire ou turbulent, la résolution de l'équation de Navier-Stokes passe par l'introduction de la notion de pertes de charge. Ainsi, pour rendre compte de la dissipation d'énergie due aux frottements visqueux, ces pertes de charges prendront place dans la formulation d'une équation de Bernoulli généralisée. Partons de l'équation de Navier-Stokes établie pour l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible [20] :

Si l'écoulement est stationnaire $\frac{\delta \vec{v}}{\delta t} = \mathbf{0}$, la dérivée particulaire se résume à la dérivée convective et peut se développer comme :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \xrightarrow{0} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \frac{1}{2} \nabla v^2 - \vec{v} \wedge (\nabla \wedge \vec{v}) \quad (3.3)$$

On peut alors écrire :

$$\frac{1}{2} \rho \nabla v^2 - \rho \vec{v} \wedge (\nabla \wedge \vec{v}) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (3.4)$$

L'accélération de la pesanteur dérivant d'un potentiel et le fluide étant **incompressible** ($\rho = \text{Cte}$), on regroupe sous un même gradient trois des cinq termes de cette équation pour lui donner la forme suivante :

$$\nabla \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) - \rho \vec{v} \wedge (\nabla \wedge \vec{v}) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \nabla \rho g Z \quad (3.5)$$

$$\vec{\nabla} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \mu \Delta \vec{v} + \rho \vec{v} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{v}) \quad (3.6)$$

$$\vec{\nabla} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \mu \Delta \vec{v} + 2\rho \vec{v} \wedge \vec{\Omega} \quad (3.7)$$

On retrouve ainsi une formulation semblable à celle conduisant pour un fluide parfait à l'équation de **Bernoulli**.

De la même manière, le produit vectoriel du vecteur vitesse avec le rotationnel de la vitesse s'annule lorsque l'équation est considérée sur l'ensemble des points constituant une ligne de courant :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) d\vec{s}_s &= (\mu \Delta \vec{v} + 2\rho \vec{v} \wedge \vec{\Omega}) d\vec{s}_s \\ (\vec{v} \wedge \vec{\Omega}) \perp \vec{v} \text{ et } \vec{e}_s \parallel \vec{v} &\Rightarrow (\vec{v} \wedge \vec{\Omega}) \cdot \vec{e}_s = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Il reste donc que le long d'une ligne de courant, l'écoulement stationnaire d'un fluide de viscosité non négligeable obéit à l'équation suivante :

$$\vec{\nabla} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) d\vec{s}_s = \mu \Delta \vec{v} d\vec{s}_s \quad (3.9)$$

Puis la projection sur chacun des axes d'un repère cartésien :

$$d\vec{s}_s = dx \vec{e}_x + dy \vec{e}_y + dz \vec{e}_z \quad (3.10)$$

$$\vec{\nabla}(\bullet) = \frac{\partial(\bullet)}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial(\bullet)}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial(\bullet)}{\partial z} \vec{e}_z \quad (3.11)$$

$$\vec{\nabla} \vec{v} = \nabla \vec{v}_x \vec{e}_x + \nabla \vec{v}_y \vec{e}_y + \nabla \vec{v}_z \vec{e}_z \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) dx = \mu \Delta v_x dx \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) dy = \mu \Delta v_y dy \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) dz = \mu \Delta v_z dz \quad (3.15)$$

Après simplification par dx, dy et dz :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \mu \Delta v_x \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \mu \Delta v_y \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(p + \rho \vec{g} Z + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \mu \Delta v_z \quad (3.18)$$

$p + \rho \vec{g}Z + \frac{1}{2} \rho v^2$ est la pression totale (également appelée « charge »), notée P_t , somme de la pression motrice $p + \rho \vec{g}Z$ et de la pression cinétique $\frac{1}{2} \rho v^2$. C'est donc une quantité scalaire qui doit vérifier l'équation :

$$\vec{\nabla} p_t = \mu \Delta \vec{v} \quad (3.19)$$

On suppose alors qu'un repère cartésien soit choisi de telle sorte qu'en tout point de l'écoulement on ait $\vec{v} = u(x, y, z) \vec{e}_x$ et que l'écoulement est laminaire. Dans ces conditions, la projection dans les trois directions du repère de l'équation (3.19) précédemment établie donne :

$$\begin{cases} v_x = v \\ v_y = 0 \\ v_z = 0 \end{cases} \Rightarrow \vec{v} = v \vec{e}_x$$

$$\begin{cases} \frac{\partial p_t}{\partial x} = \mu \Delta v \\ \frac{\partial p_t}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial p_t}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

On en déduit que la pression totale n'est fonction que de x , et qu'elle varie en obéissant à l'équation :

$$\frac{dp_t}{dx} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.20)$$

Par ailleurs, l'écoulement étant conservatif, l'équation de continuité Eq. (3.21) s'applique dans sa forme la plus simple:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.21)$$

et comme $v = w = 0$, il en découle $\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \Rightarrow u = u(y, z)$. Nous pouvons alors reconsidérer l'équation régissant l'évolution de la pression totale en la formulant Eq. (3.22)

$$\frac{dp_t}{dx} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = Cte \forall (x, y, z) \quad (3.22)$$

Il s'avère alors que le membre de gauche ($\frac{dp_t}{dx}$) ne peut dépendre que de x alors que celui de droite ($\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$) ne peut dépendre que de y et z . La conséquence est donc que les deux membres sont égaux à une même constante $\forall (x, y, z)$.

Ceci permet de montrer que la pression totale Eq. (3.23) varie linéairement avec x :

$$\frac{dp_t}{dx} = Cte < 0 \quad (3.23)$$

Remarque :

➤ Pour un fluide parfait dont la viscosité est négligée, la pression totale ne varie pas. En effet, la constante étant proportionnelle à μ , elle devient nulle, l'équation de Bernoulli Eq. (3.24) s'applique le long d'une ligne de courant :

$$\frac{dp_t}{dx} = 0 \Rightarrow p + \rho \vec{g}Z + \frac{1}{2} \rho v^2 = Cte \quad (3.24)$$

On dit alors que la charge est constante ou bien encore qu'il n'y a pas de perte de charge.

➤ Pour un fluide réel (dont la viscosité n'est pas négligeable), l'écoulement laminaire est caractérisé par une variation linéaire de la charge avec la distance parcourue. En effet, puisque les frottements visqueux sont responsables d'une dissipation d'énergie et que la pression totale n'est autre qu'une énergie volumique, il s'ensuit logiquement que la pression totale doit diminuer avec la progression de l'écoulement.

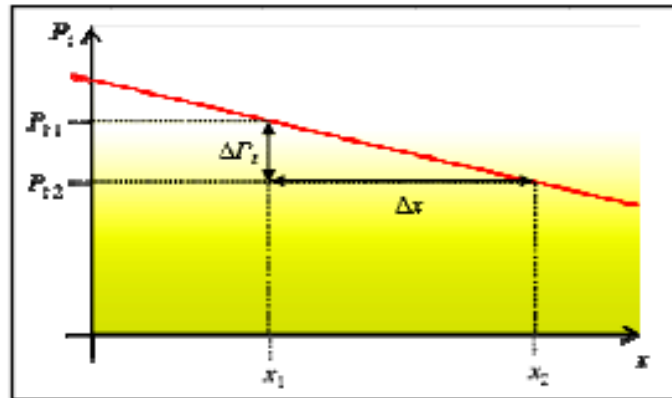


Figure III.4 : Evolution de la pression totale (charge) avec la progression de l'écoulement

Dans l'hypothèse logique d'une pression totale diminuant linéairement avec la progression de l'écoulement, le graphe de la figure III-4 montre que sur une longueur $\Delta x = x_2 - x_1$ la chute de pression totale ΔP_t est proportionnelle à Δx et s'exprime:

$$\begin{aligned} \frac{dp_t}{dx} &= \frac{p_{t2} - p_{t1}}{x_2 - x_1} = -\frac{\Delta p_t}{\Delta x} \\ \Rightarrow \Delta p_t &= -\frac{dp_t}{dx} \Delta x \end{aligned} \quad (3.24)$$

Ainsi, une chute de perte de charge se traduit par $\Delta p_t > 0$ et est la conséquence d'un gradient de pression constant et négatif $\frac{dp_t}{dx} < 0$. C'est pourquoi on parle de pertes de charges régulières :

$$\Rightarrow p_{t1} = p_{t2} - \frac{dp_t}{dx} (x_2 - x_1) = p_{t2} + \Delta p_t > 0 \quad (3.25)$$

On peut généraliser l'équation de Bernoulli en y faisant apparaître les pertes de charges régulières de la manière suivante :

$$p_1 + \rho \vec{g} Z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho \vec{g} Z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p_t \quad (3.26)$$

Où Δp_t représente l'ensemble des pertes de charges entre (1) et (2)

3. Coefficient de perte de charge :

Particulièrement, les pertes de charge entre l'entrée et la sortie d'une canalisation est la somme de deux types de contributions :

- les pertes de charge systématiques (appelées aussi linéaires ou régulières) dues aux frottements visqueux.
- les pertes de charge singularités dues aux changements de direction et de sections (rétrécissements et élargissements) dans la conduite [20].

1.1 Perte de charges linéaires ou régulières :

Les pertes de charge systématiques (linéaires ou régulières) (chute de pression $\Delta P = P_1 - P_2$) résultent du frottement exercé entre le fluide et la surface intérieure de la canalisation. Elles sont proportionnelles à la longueur L de la conduite et au carré de la vitesse moyenne V du fluide, inversement proportionnelle au diamètre d et fonction de la rugosité moyenne ε de la canalisation. Entre deux points séparés par une longueur L , dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de pression Δp [20]. Exprimée sous la forme suivante :

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.27)$$

Avec :

D : diamètre de la conduite considérée (m)

L : longueur de la conduite considérée (m)

V : vitesse moyenne (m/s)

λ (Sans dimension) : coefficient de perte de charge linéaire. Il dépend de la nature de l'écoulement et de l'état de surface de la conduite.

Remarque :

La nature de l'écoulement est caractérisée par le nombre de Reynolds Re

- l'état de surface est défini par l'épaisseur moyenne des rugosités : Alors $f(Re, \varepsilon/d)$

Expérience de Nikuradze :

L'expérience de Nikuradze (Figure III-5) a pour but de déterminer l'influence de la rugosité des parois sur le coefficient de perte de charge linéaire. Les parois d'une conduite sont rendues artificiellement rugueuses en y collant des grains de sable calibrés. En changeant la taille des grains on change la rugosité et on trace $\log(\lambda)$, en fonction de $\log(Re)$. On appelle k_s la taille moyenne des grains collés et **D** le diamètre de la conduite. ε/D est la rugosité relative [20]. On remarque sur les abaques de Nikuradze (Figure III-6) que:

- la rugosité n'a pas d'influence en régime laminaire et le nombre de Reynolds critique Re_c est indépendant de la rugosité.

- quand $Re > Re_c$ la perte de charge dépend fortement de ε/D ou du nombre de Reynolds
- quand $R \gg R_c$ la perte de charge ne dépend pas du nombre de Reynolds, elle ne dépend que de ε/D .

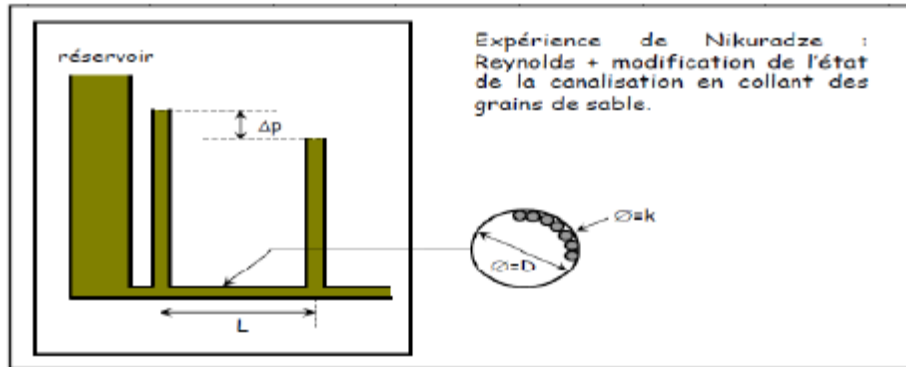


Figure III.5 : Expérience de Nikuradze

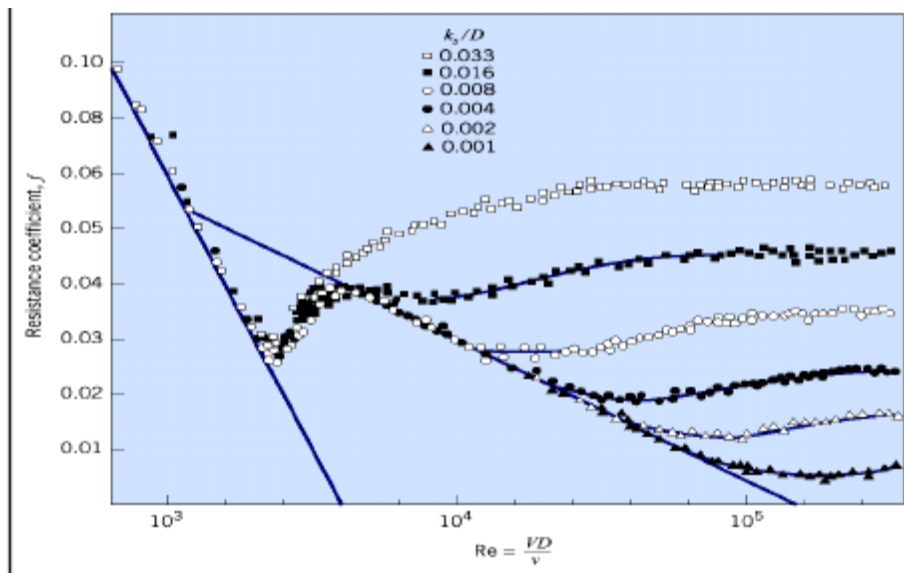


Figure III.6 : Abaques de Nikuradze

Selon le nombre de Reynolds, on distingue différents cas :

1.1.1 Cas de l'écoulement laminaire : ($Re < 2000$ -la loi de Poiseuille)

Dans ce cas on peut montrer que le coefficient λ est uniquement fonction du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc λ ne dépend pas de la rugosité ε (noté aussi k), ni de la nature de la tuyauterie Eq. (3.28).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.28)$$

1.1.2 Cas de l'écoulement turbulent ($Re > 3000$):

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination. En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité.

La formule de Colebrook Eq. (3.29) est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent [20]. Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (3.29)$$

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques (abaques).

Pour simplifier la relation précédente, on peut chercher à savoir si l'écoulement est hydrauliquement lisse ou rugueux pour évaluer la prédominance des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook.

Remarque :

On fait souvent appel à des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds, par exemple :

- **Formule de Blasius :** Décrite par l'équation (3.30) : pour l'écoulement turbulent hydrauliquement lisse et avec un λ qui ne dépend que de Re on a : $3000 < Re < 10^5$, λ ne dépend que de Re :

$$\lambda = (100Re)^{-0.25} = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad (3.30)$$

- **Formule de Blench :** Eq.(3.31) : pour l'écoulement turbulent hydrauliquement rugueux et $Re > 10^5$, λ ne dépend que de ε/d

$$\lambda = 0.79 \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \quad (3.31)$$

où :

ε : Rugosité de la surface interne de la conduite (mm)

d : Diamètre intérieur de la conduite (mm)

➤ Diagramme de Moody :

Cette relation est appelée équation de Darcy-Weisbach. Le facteur adimensionné désigne le coefficient de perte de charge régulière et ne dépend que du nombre de Reynolds pour une canalisation lisse. Dans le cas d'une canalisation rugueuse, un quatrième nombre sans dimension intervient : la rugosité relative ε/D qui mesure le rapport de la hauteur moyenne des aspérités de la paroi interne de la conduite sur son diamètre interne [21]. La valeur λ peut être obtenue à l'aide d'abaque comme le diagramme de Moody (Figure III-7).

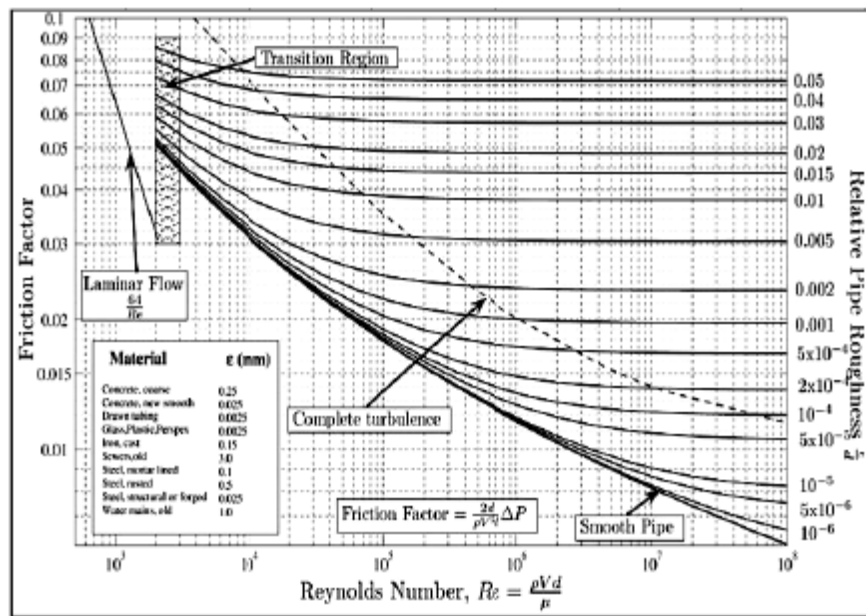


Figure III.7 : Diagramme de Moody.

1.2 Perte de charges singulière :

Les pertes de charges singulières résultent de la présence de coudes, raccords, branchements, robinets, etc. Tous ces éléments (singularités), installés le long des canalisations, constituent des obstacles qui freinent le passage du fluide et amènent des pertes de charge. Les pertes de charge singulières sont proportionnelles au carré de la vitesse [21], elles sont exprimées sous la forme suivante :

$$\Delta p = K \rho \frac{V^2}{2} \quad (3.32)$$

Où

K: Le coefficient de perte de charge singulière (sans dimension). Il dépend de la nature de la singularité.

V: La vitesse moyenne incidente du fluide arrivant sur l'obstacle.

Remarque : La plupart des singularités ne permettent pas une approche analytique simple comme celle qui vient d'être développée concernant l'élargissement brusque. Les coefficients de perte de charge sont donc le plus souvent déduits de mesures ou de calculs numériques, et sont disponibles sous forme d'abaques (Figure III-8).

À titre d'exemple, la (Figure III-9) liste de façon non exhaustive de quelques singularités typiques avec les coefficients de perte de charge associés.

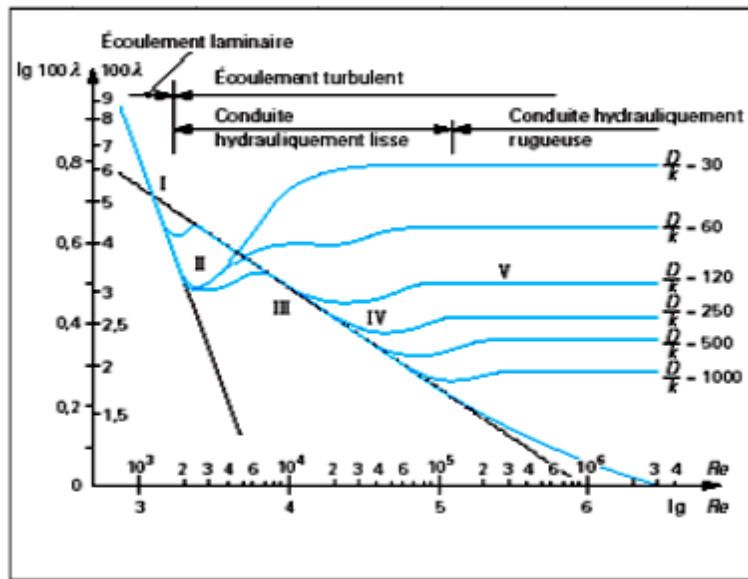


Figure III.8 : Abaques de pertes de charge

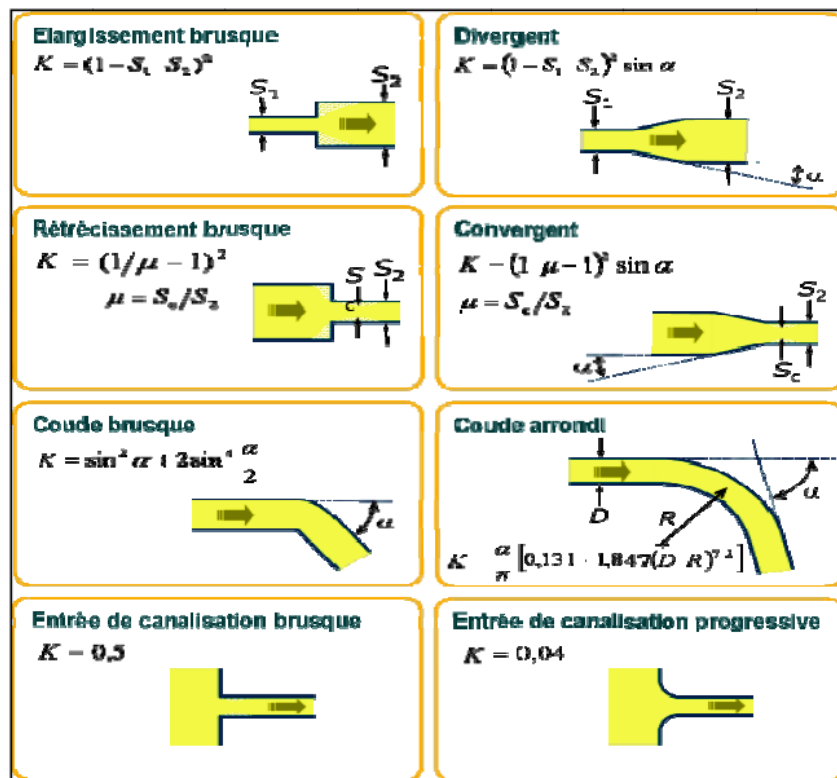


Figure III.9 : Liste non exhaustive de quelques singularités typiques

1.3 Pertes de charge totales :

Pour un réseau hydraulique complet comportant différents tronçons de longueurs et sections différentes et reliés entre eux par des singularités, on peut évaluer les pertes de charge totales entre l'entrée et la sortie du circuit en formulant l'équation de Bernoulli généralisée [21] :

$$\Delta p_t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho V_i^2 \lambda_i \frac{L_i}{D_i} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho V_i^2 K_i \quad (3.33)$$

2 Écoulement de Poiseuille :

On considère un écoulement horizontal, laminaire, incompressible et newtonien d'un fluide de viscosité μ , de masse volumique ρ dans un tube cylindrique de rayon r . L'écoulement est permanent dans la direction x [21] (Figure III-10).

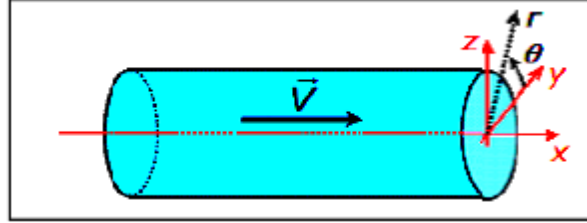


Figure III.10 : Ecoulement de poiseuille (Ecoulement cylindrique dans une conduite cylindrique)

La vitesse de la couche de fluide en contact avec les parois est nulle. Elle augmente lorsque la distance r à l'axe diminue. Le vecteur de vitesse en tout point à l'intérieur de la conduite s'écrit :

$$\vec{V}(r, \theta, x) \vec{e}_x \text{ car } v_r = v_\theta = 0 \quad (3.34)$$

L'écoulement étant conservatif et le fluide incompressible, l'équation de continuité se résume à $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$ se développe en coordonnées cylindriques comme Eq. (3.35):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (3.35)$$

Et puisque $v_r = v_\theta = 0$, il reste : Eq(3.36)

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (3.36)$$

Traduisant le fait que la vitesse reste constante le long de l'axe de la conduite.

Compte tenu de la symétrie de révolution du problème, on en déduit par ailleurs que $\frac{\partial v_x}{\partial \theta} = 0$ ce qui permet d'en conclure que le vecteur vitesse est purement axial et ne dépend que de R :

$$\vec{V}(r) \vec{e}_x \quad (3.37)$$

D'autre part, l'équation régissant l'évolution de la pression totale (charge) P_t le long d'un écoulement laminaire orienté suivant l'axe x (voir section précédente) est sous forme:

$$\frac{dP_t}{dx} = \mu \frac{d^2 v_x}{dr^2} \quad (3.38)$$

En coordonnées cylindriques ça devient

$$\Delta v_x = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_x}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \quad (3.39)$$

Alors on obtient alors l'équation suivante :

$$\frac{dP_t}{dx} = \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \quad (3.40)$$

Où le terme de gauche ne dépend que de x et celui de droite que de r .

Il s'en suit que les membres de cette équation sont égaux à une même constante K. Ainsi, on a : $\frac{dP_t}{dx} = K$ traduisant la perte de charge régulière ;

$$\mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = K \Rightarrow \text{Permettant la détermination du profil de vitesse } u(r)$$

Réolvons cette dernière équation pour établir le profil de vitesse sur une section de la conduite Eq. (3.40)

$$\mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = K \quad \square \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{Kr}{\mu} \Rightarrow r \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{Kr^2}{2\mu} + K' \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{Kr}{2\mu} + \frac{K'}{r}$$

Et donc :

$$u(r) = \frac{Kr^2}{4\mu} + k' \ln(r) + k'' \quad (3.40)$$

Où k' et k'' sont deux constantes d'intégration dont l'indétermination peut être levée en utilisant les conditions aux limites.

Ainsi, on sait que la vitesse des particules fluides est nécessairement nulle au contact avec les parois de la conduite. On a donc l'équation :

$$u(R = r) = 0 \Rightarrow \frac{Kr^2}{4\mu} + k' \ln(r) + k'' = 0 \quad (3.41)$$

Par ailleurs, la vitesse à l'axe de la conduite, en $r=0$, soit finie, il faut que $K'=0$ alors :

$$k'' = -\frac{KR^2}{4\mu} \quad (3.42)$$

Et que le profil de vitesse se formule suivant l'équation :

$$u(r) = -\frac{K}{4\mu} (R^2 - r^2) \quad \text{où} \quad 0 \leq r \leq R \quad (3.42)$$

Cette équation traduisant le profil parabolique de $u(r)$ (**Figure III.11**) et que la vitesse maximale sur l'axe est donnée par :

$$u_{max} = u(0) = -\frac{K}{4\mu} R^2 \quad (3.43)$$

$u(r) > 0$ et $K < 0$ impose $K = \frac{dP_t}{dx} < 0$ Perte de charge

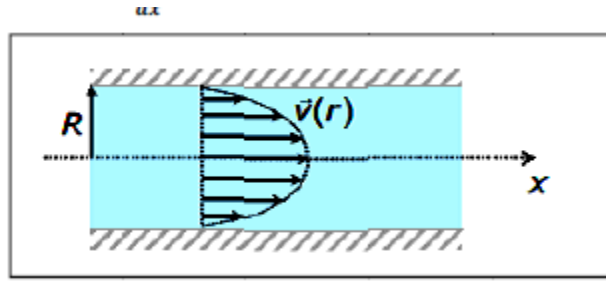


Figure III.11 : Le profil parabolique des vitesses de fluide en écoulement de poiseuille

Pour caractériser les pertes de charges on définit la vitesse moyenne de l'écoulement par :

$$q_v = \int u ds = l \int_0^e u dy \quad (3.44)$$

$$\bar{u} = \frac{q_v}{S} = \frac{1}{\pi R^2} \iint \vec{v} \cdot \vec{n} ds = \frac{1}{\pi R^2} \iint u(r) ds \quad (3.45)$$

Avec $ds = 2\pi r dr$ d'où l'équation

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u(r) 2\pi r dr = \frac{2K}{4\mu R^2} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr \\ \Rightarrow \bar{u} &= -\frac{2K}{4\mu R^2} \frac{R^4}{4} = -\frac{K}{8\mu} R^2 \end{aligned} \quad (3.46)$$

Ce qui donne :

$$\bar{u} = -\frac{K}{8\mu} R^2 = \frac{u_{max}}{2} \quad (3.47)$$

Et comme $q_v = \bar{u}S = \bar{u}\pi R^2$, on a par ailleurs l'équation :

$$q_v = -\frac{K}{8\mu} \pi R^4 \quad (3.48)$$

Cette dernière relation permet ainsi de faire le lien entre le débit volumique et les pertes de charges régulières puisque $K = \frac{dP_t}{dx}$ et que $\Delta P_t = -\frac{dP_t}{dx} \Delta x = -K \Delta x$ où $K = -8\mu \frac{q_v}{\pi R^4}$ on obtient alors **la formule de poiseuille** donnée par :

$$\Delta P_t = 8\mu \frac{q_v}{\pi R^4} \Delta x = 8\mu \frac{\bar{u}}{R^2} \Delta x \quad (3.49)$$

La différence de pression totale (ou perte de charge) engendrée par les frottements visqueux dans une conduite de longueur $L = \Delta x$ est donc proportionnelle à L, mais également au débit et à la viscosité du fluide [21].

$$\Delta P_t = 8\mu \frac{q_v}{\pi R^4} L \quad (3.50)$$

3 Écoulement dans un espace annulaire :

Examinons encore le cas d'un écoulement entre deux tuyaux droits coaxiaux, que l'on rencontre en particulier dans certains échangeurs, et aussi dans les forages pétroliers. On notera R_1 le plus petit rayon et R_2 le plus grand. La (figure III.12) illustre un écoulement de fluide dans une canalisation annulaire [20].

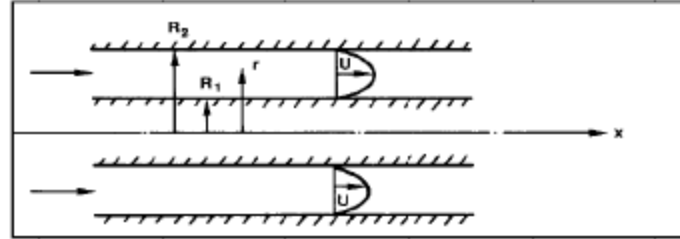


Figure III.12 : Ecoulement dans une canalisation annulaire

La solution générale reste valable, les conditions aux limites étant ici :

$$r=R_1, U=0$$

Et :

$$r=R_2, U=0$$

Soient les équations :

$$\Delta P_t = \frac{q_v}{\pi R^4} L \quad (3.51)$$

$$A \ln R_1 + B = -\frac{R_1^2}{4\mu} \frac{dP_t}{dx} \quad (3.52)$$

$$A \ln R_2 + B = -\frac{R_2^2}{4\mu} \frac{dP_t}{dx} \quad (3.53)$$

On déduit que les constantes A et B sont :

$$A = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP_t}{dx} \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3.54)$$

$$B = +\frac{1}{4\mu} \frac{dP_t}{dx} \left\{ \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \ln R_2 - R_2^2 \right\} \quad (3.55)$$

Ce qui donne pour u après regroupement de certains termes l'équation

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP_t}{dx} \left\{ (R_2^2 - r^2) + \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \ln \frac{r}{R_2} \right\} \quad (3.56)$$

Le maximum de la vitesse obtenu pour un rayon r_m tel que

$$r_m = \sqrt{\frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}} \quad (3.57)$$

En ce qui concerne le débit dû au gradient $\frac{dP_t}{dx}$, les calculs sont un peu plus laborieux.

Posons provisoirement, pour alléger l'écriture :

$$C = \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3.58)$$

Le débit volume s'écrit :

$$q_v = \int_{R_1}^{R_2} U 2\pi r dr = -\frac{\pi}{2\mu} \frac{dP_t}{dx} \int_{R_1}^{R_2} (R_2^2 - r^2 + C \ln r - C \ln R_2) r dr \quad (3.59)$$

Au total, on a donc :

$$q_v = -\frac{\pi}{2\mu} \frac{dP_t}{dx} \left\{ \frac{R_2^4}{2} - \frac{R_1^2 R_2^2}{2} - \frac{R_2^4}{4} + \frac{R_1^4}{2} - \frac{C}{2} (R_2^2 - R_1^2) \ln R_2 + C \int_{R_1}^{R_2} r \ln r dr \right\} \quad (3.60)$$

Au total, après avoir remplacé C par Eq.3.58 puis regroupé et réarrangé un peu les termes, on a donc l'équation suivante :

$$q_v = -\frac{\pi}{8\mu} \frac{dP_t}{dx} (R_2^2 - R_1^2) \left\{ R_2^2 + R_1^2 - \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right\} \quad (3.61)$$

Chapitre IV
Caractérisation de la boue
OBM et Simulation du
transport des déblais

1 Description du puits :

1.1 Emplacement du puits :

Le puits est situé à 100km au sud ouest de Hassi Messaoud ; la figure ci-dessous illustre l'emplacement exacte du puits et la route pour y accéder :

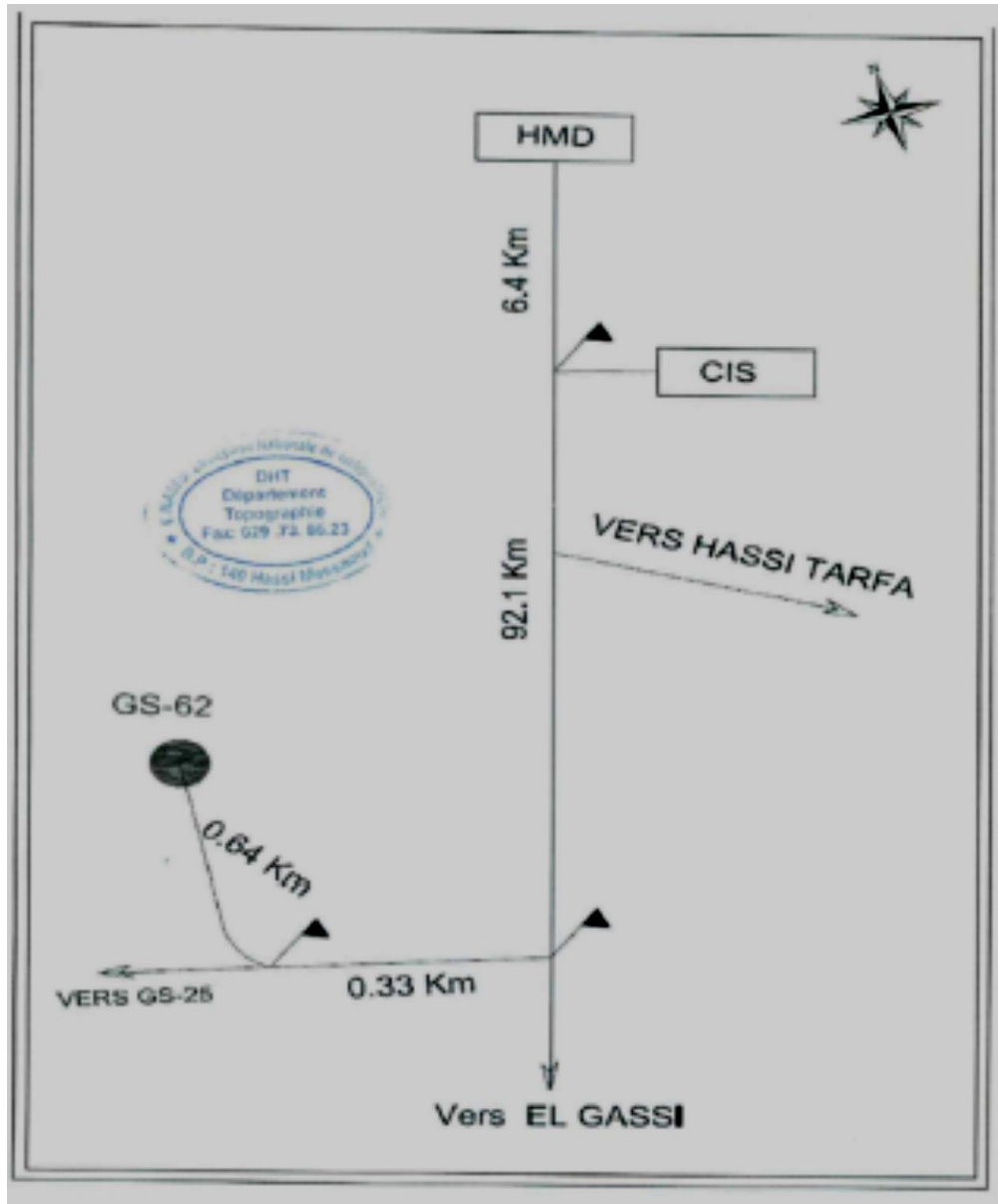


Figure IV.1 : Emplacement du puits et la route d'accès.

1.2 Localisation des offset well :

L'offset well le plus proche se situe a 1.25km de distance, tandis que le plus loin est situé a 2.66 km le tableau ci-dessous montre la localisation exacte et la distance de tout les offset well du puits GS-62 :

Tableau IV.1: Offset Well.

WELL	X coor	Ycoor	Zs	Distance (km)
GS-62	758,850.01	3,436,399.99	187.17	
GS-60	759,988.56	3,435,888.58	188.92	1.25
GS-61	760,006.48	3,435,114.60	187.31	1.73
GS-58	760,476.94	3,435,545.27	186.24	1.84
GS-57	760,771.16	3,435,177.02	187.54	2.28
GS-59	761,271.15	3,435,296.85	187.06	2.66

Voici une figure montrant les coordonnées du puits GS 62 par rapport aux puits voisins :

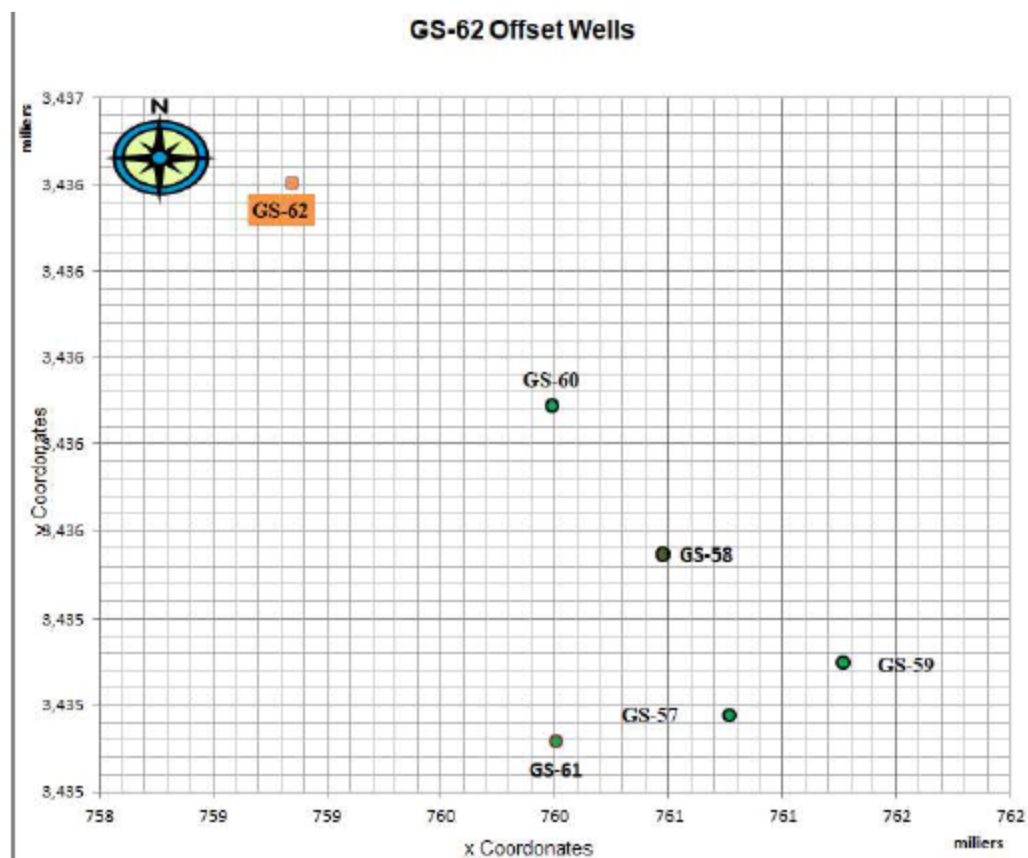


Figure IV.2 : Coordonnées de surface récupérées sur le serveur de données de SH OpenWells.

1.3 Les objectifs du puits:

GS-62 est un puits de développement vertical de producteur de pétrole situé dans le champ EL-GASSI ; l'objectif principal du puits est la production des réservoirs cambro-ordoviciens Ri/Ra.

Les principaux objectifs du puits sont :

- Forer le puits sans accidents, incidents ou dommages environnementaux.
- Forer le puits jusqu'au TD final de 3252 m en 33 jours, dans un NPT global inférieur à 5 %.
- Atteindre les objectifs de diagraphie et d'acquisition de la TD en 28 jours.
- Achèver toutes les opérations en 61 jours conformément aux directives HSE et aux procédures de forage standard de la SONATRACH

1.4 Prévision stratigraphique de forage:

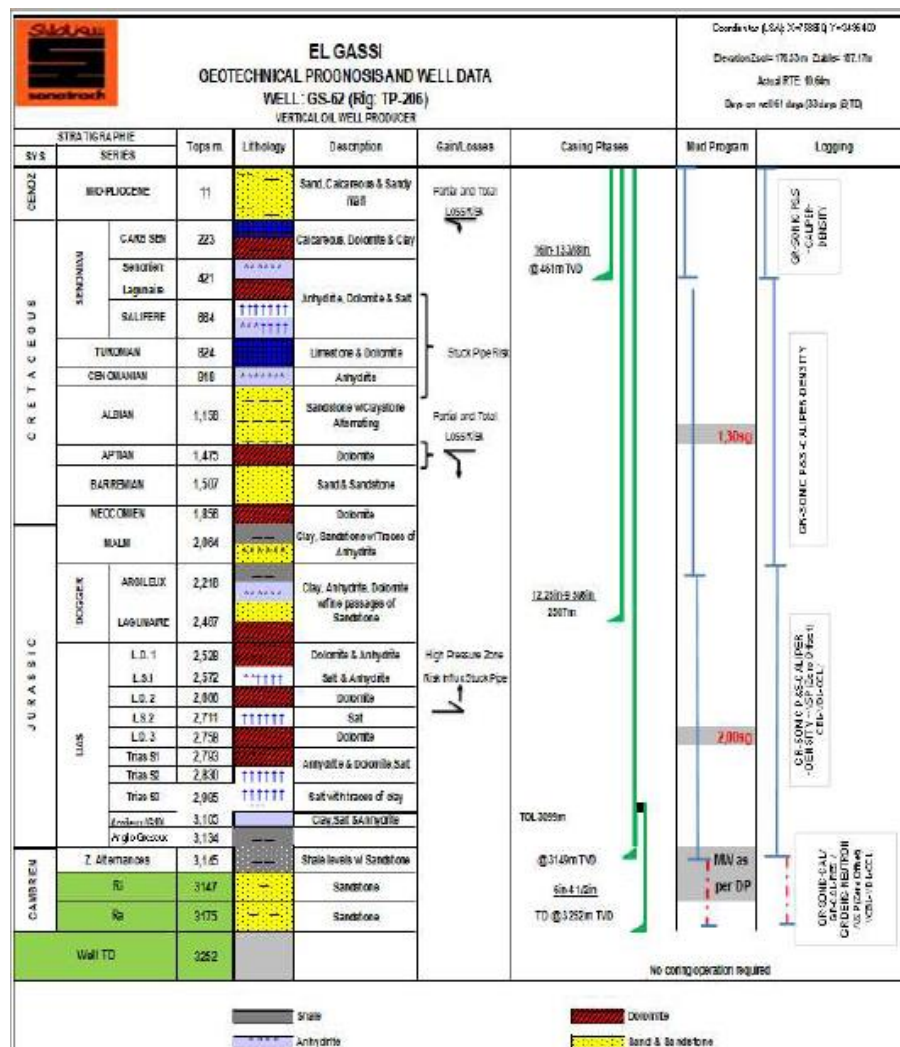


Figure IV.3 : Schéma géotechnique du puits GS 62.

2 Etude de cas (phase 12^{1/4}) :

La 2eme phase s'étend de 461m a 2507m soit 2046m de profondeur, cette phase va être forée avec un outil PDC de référence 'R813DGX' , on se focalise sur les sandstones.

Tableau IV.2: Le programme de la BHA :

12"1/4 hole section
t 12"1/4 PDC bit
NBS 12"3/16
9"1/2 S-DC
Stabilizer 12"3/16
01 x DC 9"1/2
Stabilizer 12"3/16
01 x DC 9"1/2
X-over
15 x DC 8"
8" Drilling jar
02 x DC 8"
X-over
6 x 5" HWDP

3 Programme de la boue de forage (phase 12^{1/4}) :

La boue utilisée est une boue à base d'huile de densité 1.30 sg, dont les caractéristiques sont illustrées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.3: Caractéristiques du fluide de forage utilisé.

Mud type	MD(RKB) M	Density (sg)	HPHT FL (ml)	OWR	ES	Pom
OBM	461-2507	1.30	<10	70/30	>600	3-4

3.1 Composition de la boue de forage :

La composition de la boue est donnée dans le tableau suivant:

Tableau IV.4: Composition du fluide de forage.

Produit	Concentration (kg/m ³)
Diesel	0.562
Eau	0.252
BABAROK 40 NA (réducteur de filtrat)	8.55
Geltone V (viscosifiant)	7
BARAMUL IE-685 (émulsifiant)	11.40
INVERMUL L (émulsifiant)	17.10
Lime (la chaux)	30
Sel	88.34
Baryte	355

3.2 Objectif d'utilisation de cette boue :

- réduire au minimum la densité de circulation équivalente (ECD : equivalent circulation density) en contrôlant la quantité de solides de faible densité (LGS : Low Gravity Solids) qui s'accumulent dans le fluide et en optimisant les débits.
- fournir des caractéristiques efficaces de nettoyage du trou afin de minimiser la charge annulaire des déblais.
- étanchéifier efficacement les zones poreuses, minimiser les pertes de fluide dans la formation et fournir un bon cake.

4 Introduction au travail pratique :

Nous présentons en premier lieu les différentes étapes et équipement utilisés dans cette étude pour effectuer la modélisation du comportement rhéologique du fluide de forage utilisée afin de pouvoir prédire son comportement à des différents taux de cisaillement sous la variation de la température.

Afin de simuler la remontée des déblais dans l'espace annulaire, le code Fluent Ansys ainsi que l'espace de travail Gambit nous y permet de simuler l'écoulement de la boue de forage utilisée dans l'espace annulaire couplé à la simulation de la trajectoire des déblais, leurs vitesses et temps de remontée sous la variations de divers paramètres, à savoir RPM, la vitesse d'entrée du fluide ainsi que la densité des déblais.

5 Modélisation du comportement du fluide de forage utilisé (OBM) :

5.1 Caractérisation rhéologique de la boue (OBM) :

5.1.1 Mesures Rhéologiques :

Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide (viscosité, contraintes normales, etc.), on utilise un appareil de mesure appelé rhéomètre. Un rhéomètre mesure à la fois la contrainte et la déformation d'un fluide en fonction du temps.

Pour mesurer la viscosité de cisaillement, $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ un rhéomètre peut appliquer la contrainte τ et mesurer le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (fonctionnement à contrainte imposée), ou vice versa (fonctionnement à taux de cisaillement imposé). En réalité, le rhéomètre impose soit un couple, soit une vitesse de rotation. Le couple est proportionnel à la contrainte, et la vitesse de rotation est proportionnelle au taux de cisaillement; les deux coefficients de proportionnalité sont des caractéristiques de la géométrie utilisée (Couette cylindrique, cône-plan, plan-plan, etc.). Le rhéomètre utilisé pour nos expériences est: le rhéomètre à déformation imposée (Anton Paar Physica MCR 301). Le tableau suivant résume les caractéristiques de ce rhéomètre.

Tableau IV.5: Caractéristiques de rhéomètre Anton Paar Physica MCR 301.

Sollicitation dynamique	Déformation
Vitesse de cisaillement	10^{-7} ; 3000 [min^{-1}]
Force	0.01 ; 50 [N]
Gamme de couples	$5 \cdot 10^{-6}$; $2 \cdot 10^{-2}$ [Kg.m]
Gamme de fréquences mesurables	$5 \cdot 10^{-3}$; 628 [rad.s^{-1}]
Gamme de températures	-150 ; +1000 [$^{\circ}\text{C}$]
Atmosphère d'analyse	Air
Mesure temporelle	Fonction de relaxation

La figure ci-dessous représente le rhéomètre utilisée pour la caractérisation Rhéologique.

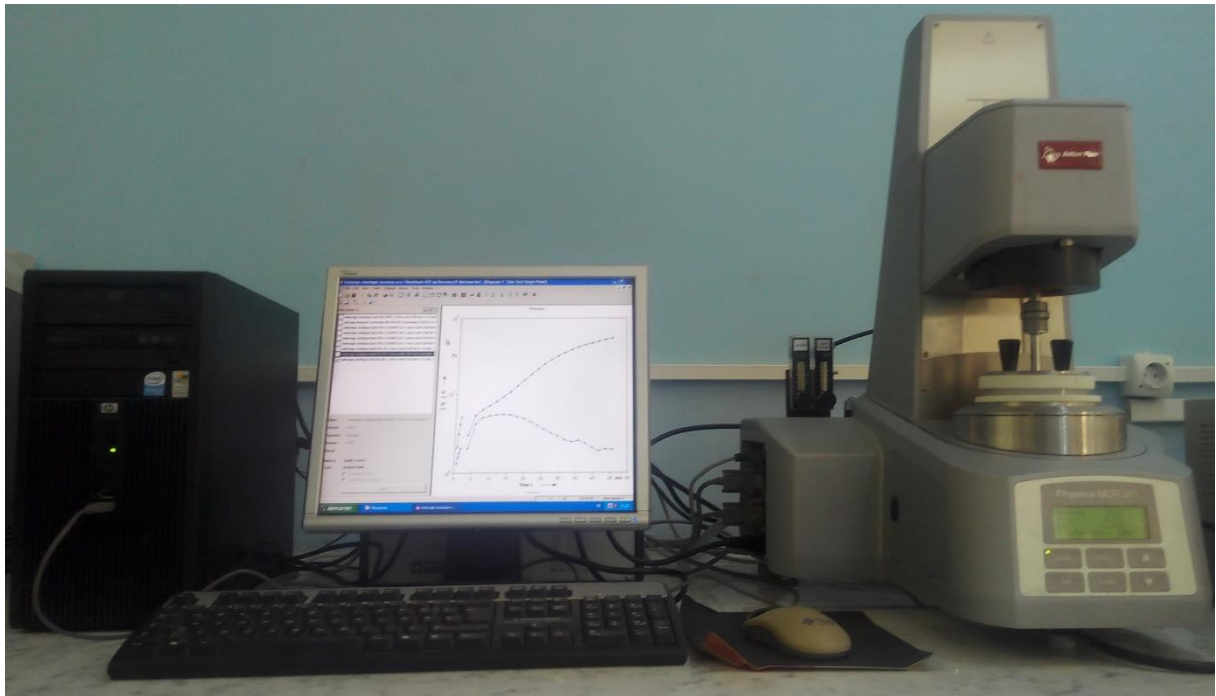


Figure IV.4: Rhéomètre MCR 301 utilisé pour la caractérisation Rhéologique.

➤ **Géométrie de Couette cylindrique :**

La géométrie de Couette est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative. Le rayon intérieur est noté R_i et le rayon extérieur R_e (et on a donc $R_e > R_i$), l'entrefer e est l'espace entre les deux cylindres ($e = R_e - R_i$), la hauteur du cylindre intérieur est notée h . Les géométries de Couette utilisées dans cette thèse ont un cylindre extérieur fixe avec un fond (« cup » en anglais; il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide) et un cylindre intérieur tournant (« bob » en anglais; le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup »). Le tableau suivant résume les caractéristiques de la géométrie.

Tableau IV.6: Caractéristiques de la géométrie.

Rayon intérieur R_i (bob)	13.3250 (mm)
Rayon extérieur R_e (cup)	14.4645 (mm)
Entrefer e	1.1395 (mm)
Longueur h (cup)	39.997 (mm)
Angle du cône α	120°

5.1.2 Protocole expérimental:

Nous avons mesuré les courbes d'écoulement à l'aide de la géométrie couette à cylindre coaxiaux pour la boue à base d'huile utilisée (ANTON PAAR physica MCR 301), Le protocole de mesure est le suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 5 minutes.
- Rampe montante en vitesse de déformation de 0.01 s^{-1} à 600 s^{-1} .
- Rampe descendante en vitesse de déformation de 600 s^{-1} à 0.01 s^{-1} .

5.1.3 Résultats de la caractérisation:

Nous présentons ci-dessous les rhéogrammes obtenus à partir des mesures rhéologiques :

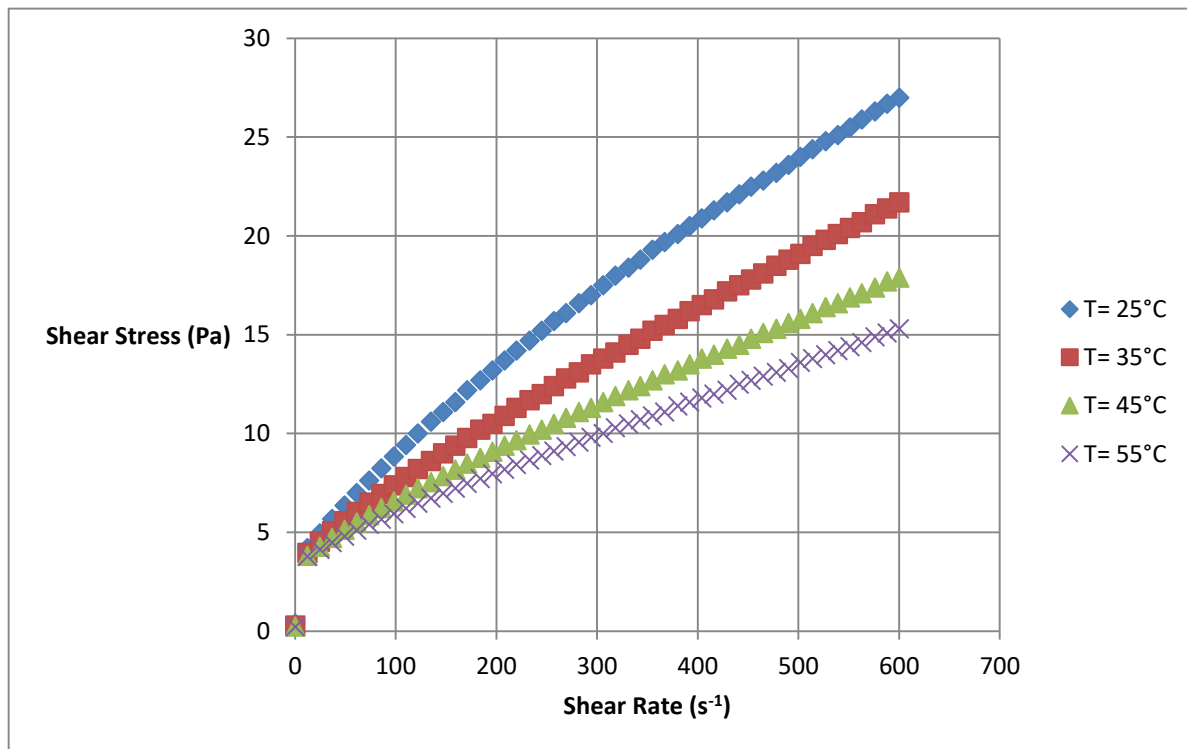


Figure IV.5: Variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour des températures différentes.

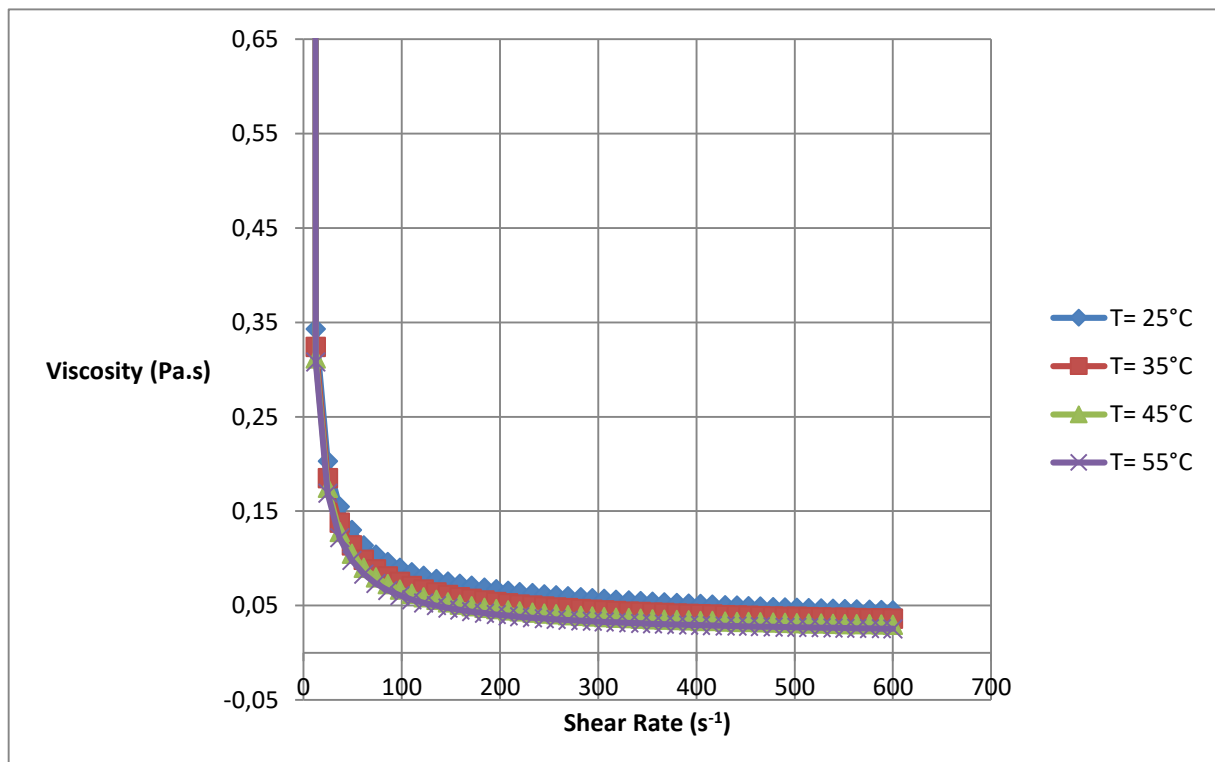


Figure IV.6: Variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement pour des températures différentes.

L'allure des courbes d'écoulement à différentes températures confirme le caractère Non Newtonien de notre boue, on observe toute fois que les paramètres rhéologiques diminuent en fonction de la température (la viscosité diminue lorsque la température augmente Figure IV.6)

5.2 Détermination des trois paramètres n , k , Yield Point :

Le logiciel de statistique RGui a été utilisé pour déterminer les paramètres n , k et Yield Point pour chaque température.

Ci-dessous le programme de commande écrit sur le logiciel RGui pour la détermination des 3 paramètres rhéologique à la température 25°C



```
1 - Bloc-notes
Fichier  Edition  Format  Affichage  ?
> data25=read.table(file.choose(),header=TRUE,sep="\t")
> names(data25)
[1] "Shear.Rate" "Shear.Stress"
> y=data25$Shear.Stress
> x=data25$Shear.Rate
> plot(x,y)
> nlscont=nls.control(maxiter=200,tol=1e-05,minFactor=1/1024,printEval=FALSE,warnOnly=FALSE)
> test=nls(y~a+b*x^d,start=list(a=0.5,b=0.5,d=0.5),
+ algorithm="port",control=nlscont)
> test
Nonlinear regression model
model: y ~ a + b * x^d
data: parent.frame()
a      b      d
1.5403 0.3186 0.6843
residual sum-of-squares: 2.986

Algorithm "port", convergence message: relative convergence (4)
> plot(data25)
> a=1.5403
> b=0.3186
> d=0.6843
> z=a + b * x^d
> plot(data25,col="red")
> lines(x,z,col="green")
```

Figure IV.7: Programme de commande à la température 25°C.

Remarque :

Le même Programme a été utilisé pour les autres températures (35°C, 45°C, 55°C)

Les tableaux ci-dessous illustrent les commandes et sous commandes utilisé dans la formulation du programme d'une régression non linéaire afin de déterminé les paramètres n , k et Yield Point.

Le tableau ci-après regroupe les résultats de la modélisation des paramètres rhéologiques de la boue OBM utilisée ainsi que le critère de convergence

Tableau IV.7: Paramètres rhéologiques et convergence.

Température (°C)	Indice d'écoulement n	Indice de consistance k	Yield Point τ_c (Pa)	Convergence (residual sum of squares)
25	0.6843	0.3186	1.5403	2.986
35	0.6843	0.2483	1.5403	5.531
45	0.6843	0.2034	1.5403	6.487
55	0.6843	0.1714	1.5403	8.303

La détermination de n, k et Yield Point permet d'écrire l'équation de Herschel-Bulkley :

$$\tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n \quad (4.1)$$

Afin d'introduire le terme température dans l'équation de Herschel-Bulkley, nous avons procédé de la manière suivante :

La fonction « Solver Excel » est utilisé dont l'introduction de la température dans le terme k sous forme d'équation exponentiel avec un critère de convergence de 10^{-3} avec un coefficient $R^2 = 0.992$ (voir figure IV.8)

Le tableau suivant résume la modélisation de l'indice de consistance k en fonction de la température.

Tableau IV.8: Modélisation de l'indice de consistance k en fonction de la température.

T	K	Modèle	Résiduel	Résiduel. ^2	SCR
25	0,3186	0,316609	0,001991	3,9641E-06	0,00020668
35	0,2483	0,25921753	-0,01091753	0,00011919	
45	0,2034	0,21222936	-0,00882936	7,7958E-05	
55	0,1714	0,17375871	-0,00235871	5,5635E-06	

La figure suivante illustre la variation de l'indice de consistance k en fonction de la température.

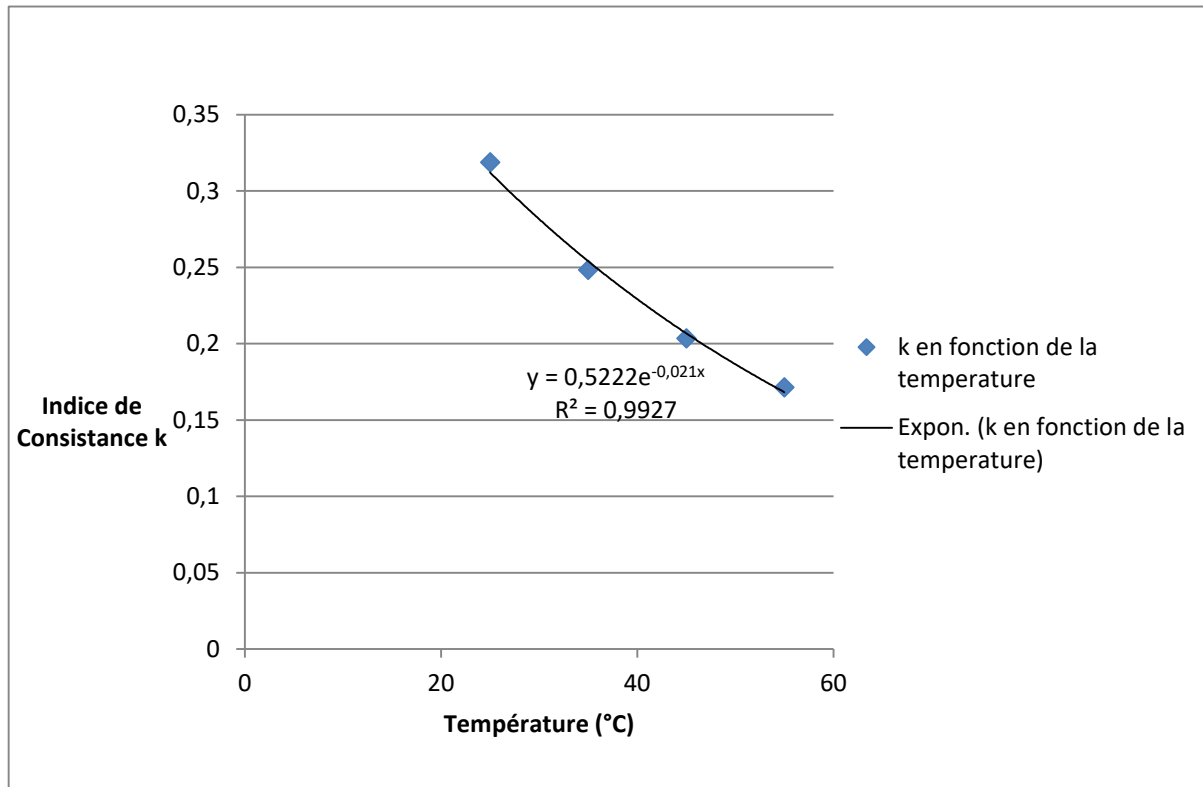


Figure IV.8: Variation de l'indice de consistance k en fonction de la température.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.2)$$

Avec :

R^2 : Coefficient de détermination.

m : Nombre de mesures.

y_i : La valeur de la mesure.

$\hat{y}_i$: La valeur prédite correspondante.

$\bar{y}$: La moyenne de mesures.

Ce paramètre varie entre -1 et 1 et qu'une valeur proche de 1 indique une très bonne corrélation entre les inputs et l'output.

L'indice de consistance k est exprimé en fonction de la température :

$$k = 0.522e^{-0.02T} \quad (4.3)$$

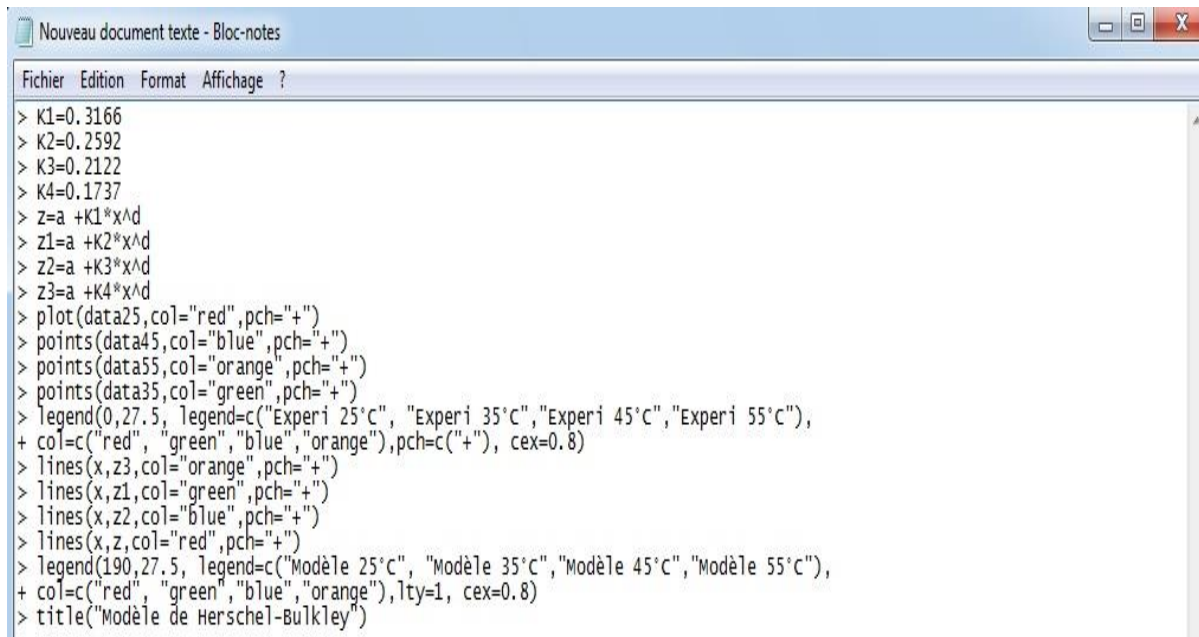
Ce qui implique :

$$\tau = \tau_c + (0.522e^{-0.02T})\gamma^n \quad (4.4)$$

Avec :

T : température (°C)

Après l'introduction du terme température dans le logiciel RGui, un code a été préparé dans le but d'effectuer une représentation graphique de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour les 4 températures.



```
> K1=0.3166
> K2=0.2592
> K3=0.2122
> K4=0.1737
> z=a +K1*x^d
> z1=a +K2*x^d
> z2=a +K3*x^d
> z3=a +K4*x^d
> plot(data25,col="red",pch="+")
> points(data45,col="blue",pch="+")
> points(data55,col="orange",pch="+")
> points(data35,col="green",pch="+")
> legend(0,27.5, legend=c("Experi 25°C", "Experi 35°C", "Experi 45°C", "Experi 55°C"),
+ col=c("red", "green", "blue", "orange"),pch=c("+"), cex=0.8)
> lines(x,z3,col="orange",pch="+")
> lines(x,z1,col="green",pch="+")
> lines(x,z2,col="blue",pch="+")
> lines(x,z,col="red",pch="+")
> legend(190,27.5, legend=c("Modèle 25°C", "Modèle 35°C", "Modèle 45°C", "Modèle 55°C"),
+ col=c("red", "green", "blue", "orange"),lty=1, cex=0.8)
> title("Modèle de Herschel-Bulkley")
```

Figure IV.9: Programme de commande pour une illustration graphique.

La figure ci-après représente les variations de la contrainte de cisaillement en fonctions du taux de cisaillement pour les différentes températures considérées du fluide de forage étudié (OBM, d=1.30 sg), comparées aux valeurs expérimentales.

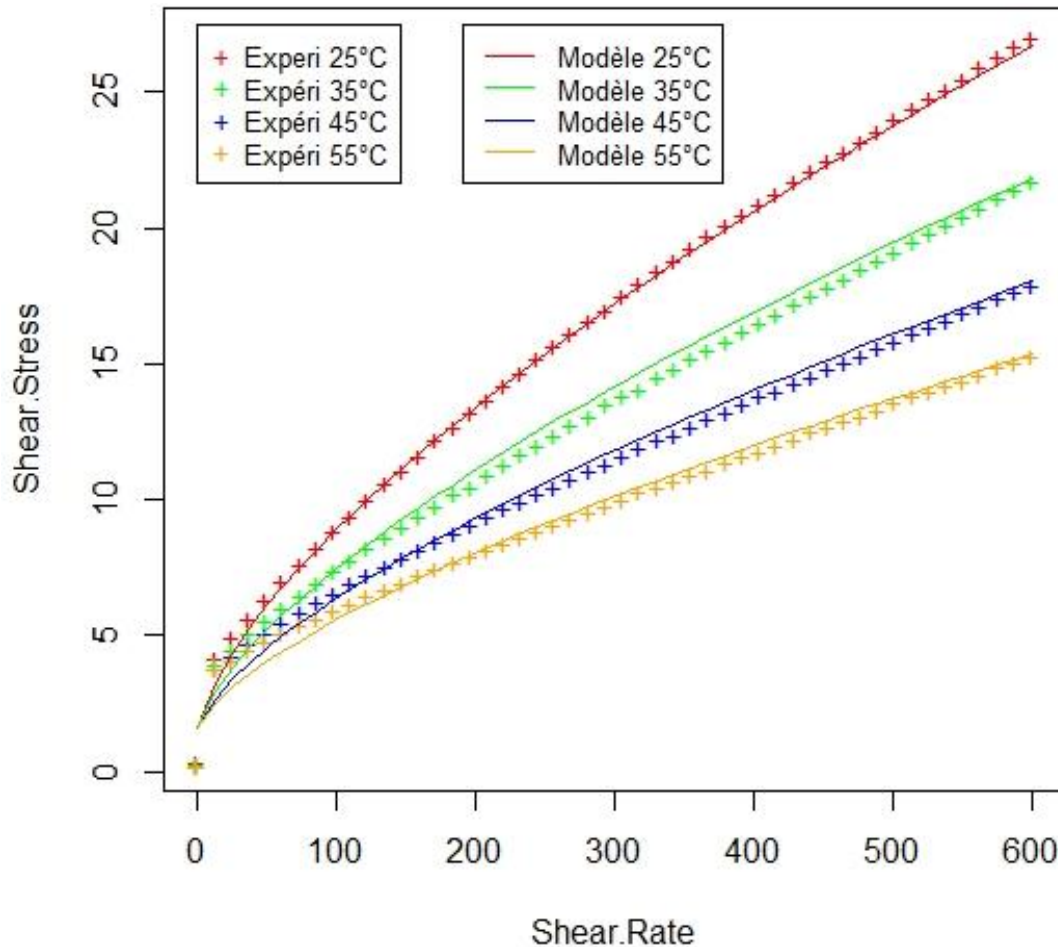


Figure IV.10: Modélisation du comportement rhéologique la boue de forage OBM pour différentes températures.

On observe une correspondance significative surtout dans les haut taux de cisaillement. Donc le modèle choisie est adéquat et approuvé.

6 Simulation de la remontée des Déblais :

Une étude de simulation avec Gambit+Fluent a été entamée dans le but de simuler le processus du fluide de forage. Le simulateur consiste 5 étapes consécutives : Géométrie, Maillage, simulation (setup), Solution et résultats (Post-process)

6.1 Construction de la géométrie sur Gambit :

L'espace de travail de Gambit nous permet de construire une géométrie suivant 3etaes principales : construction du train de tiges à savoir Volume 1, construction du troue de forage à savoir Volume 2, enfin la soustraction de volume 1 du volume 2.

Construction de l'espace annulaire en face d'une partie de la BHA de 1.7 mètres afin de pouvoir faire une simulation quasi-précise

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques de la géométrie utilisée.

Tableau IV.9 : La géométrie utilisée.

		Longueur
Géométrie	Espace annulaire (troue-BHA)	1.7 m
Troue	12 ^{1/4} ''	1.7 m
Masse tige (DC)	9 ^{1/2} ''	1 m
Réduction (XO)	9 ^{1/2} '' - 8''	0.1 m
Masse tige (DC)	8''	0.6 m

6.2 Maillage de la géométrie :

Utilisation du maillage (Meshing) structuré avec un intervalle de 0.07 entre les éléments sur les faces (voir figures IV.11, 12)

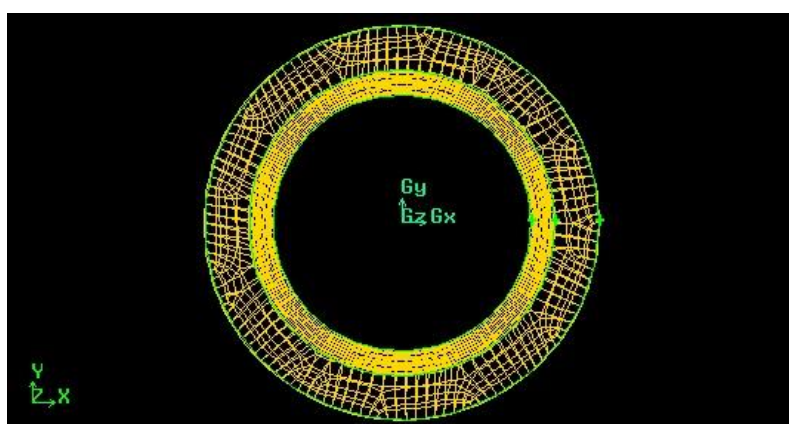


Figure IV.11: Maillage de la géométrie (vue de haut).

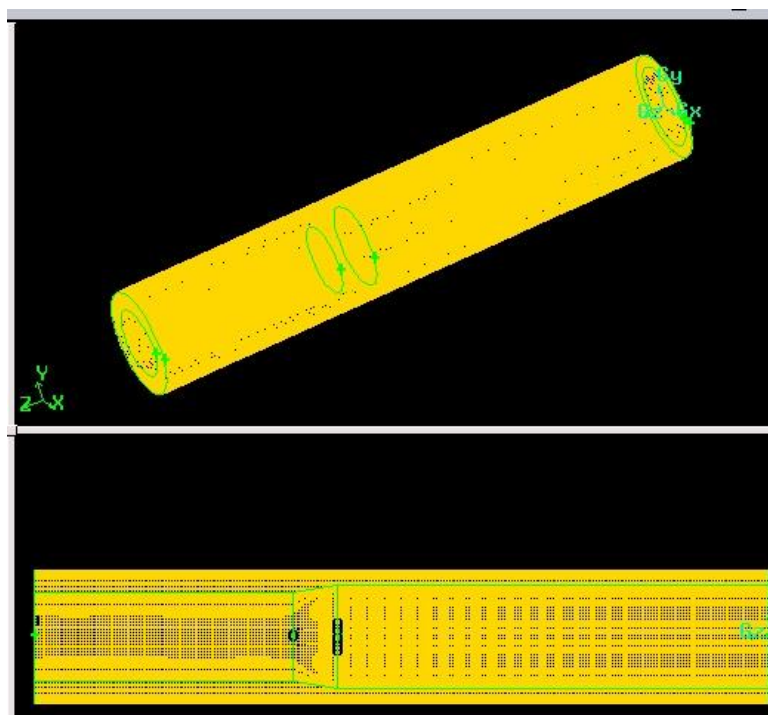


Figure IV.12: Maillage de la géométrie (vue de profile et de face).

6.3 Test du Maillage :

Après le maillage de la géométrie, un test de ce dernier est fait avec sucées (voir figures IV.13, 14)

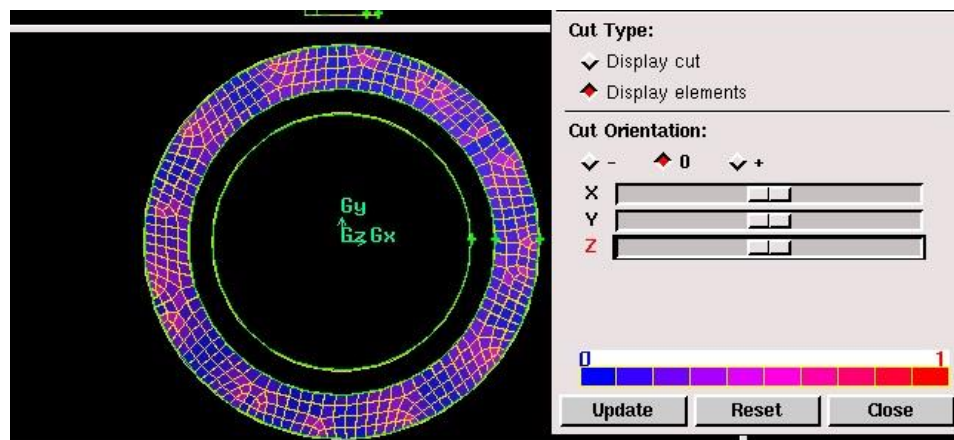


Figure IV.13: Test du maillage (vue de haut).

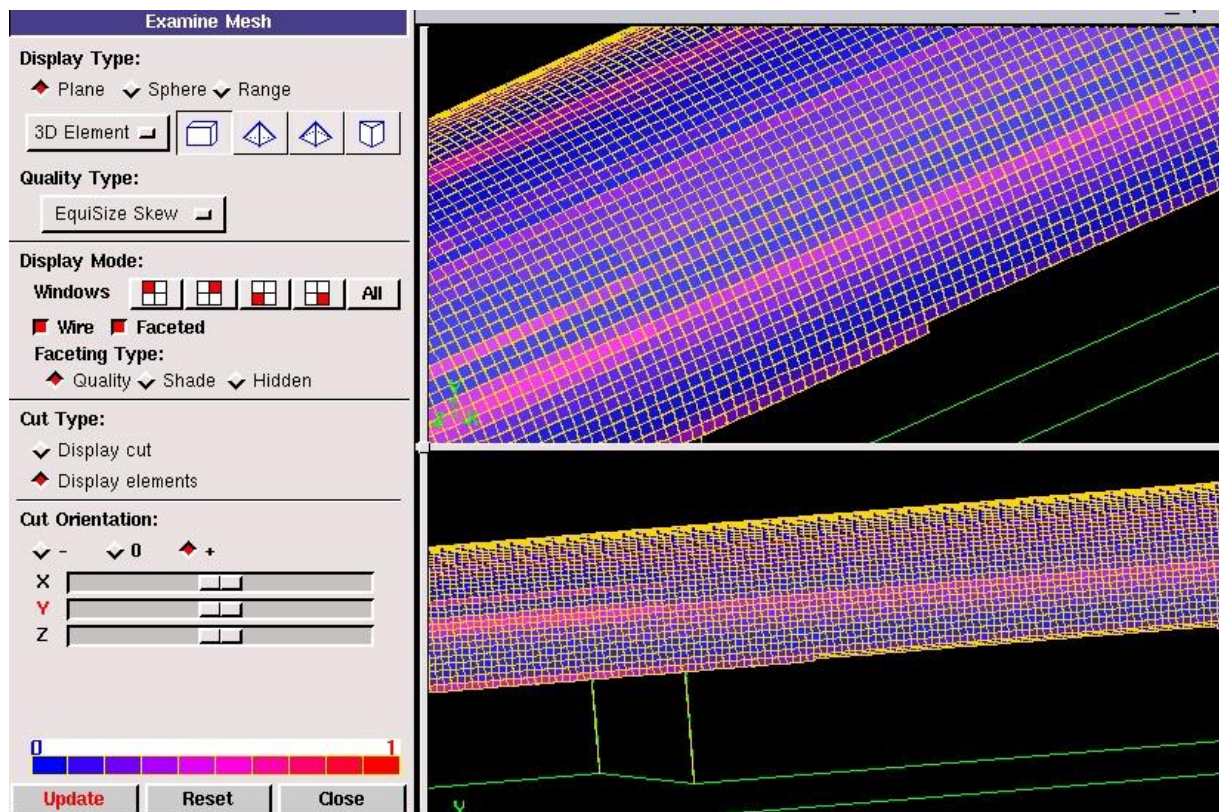


Figure IV.14: Test du maillage (vue de profile et de face).

Les éléments du volume annulaire ont été vérifié avec succès avec un « Equisize Skew » inférieur à 0.5 ce qui définit un très bon maillage.

6.4 Introduction des conditions aux limites et parois (Boundary conditions) :

Tableau IV.10: Les conditions aux limites.

Face 1	Vitesse d'entrée (Velocity Inlet).
Face 2	Pression de sortie (Pressure Outlet)
Face 3	Paroi (Wall).
Face 4	BHA (Wall).

6.5 Simulation par fluent :

L'étape « setup » est utilisée afin de sélectionner le model approprié, matériaux, conditions aux faces et nœuds (limites) et autres spécification.

Le second ordre UPwind est utilisé pour la résolution et contrôle des solutions du comportement du fluide couplé avec le modèle « Discrete Phase Model » (DPM) par Lagrange qui pour but de simuler la trajectoire, vitesse, temps des déblais sous l'influence mutuel avec la phase continue (la boue de forage).

L'équation générale de la conservation de la masse ou connu sous le nom d'équation de continuité est donnée comme suite :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.5)$$

L'équation de conservation du mouvement connu sous le nom de « Momentum » en anglais est donnée comme suite :

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{j}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (4.6)$$

Dans l'approche Lagrangien, Fluent Prédit la trajectoire des particules (cuttings) par l'intégration de l'équation de balance des forces exercées sur les particules. L'équation de balance se constitue des forces gravitationnelle et force de trainé qui égalisent la force d'inertie des particules.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{(\rho_p - \rho)\vec{g}}{\rho_p} + \vec{F} \quad (4.7)$$

Avec :

F : force d'accélération additionnelle (force/unité de masse de particule)

$F_D(u-u_p)$: Force de trainé (force/unité de masse de particule)

Les conditions aux limites ainsi les propriétés du fluide de forage et des déblais sont illustrées

Ci-dessous les cas étudiés.

6.6 RPM Variable:

6.6.1 RPM= 0 tr/min :

Le tableau suivant regroupe les paramètres des déblais.

Tableau IV.11: Les paramètres des déblais (cuttings).

Paramètre	Valeur
Diamètre (m)	$0.375 \cdot 10^{-3}$
Débit massique (Kg/s)	0.02
Vitesse d'entrée en Z (m/s)	0
Densité	2.65
Température (°C)	55

On a utilisé les déblais de la Sandstone à la profondeur plus au moins 1200 mètres (suivant le rapport de forage hebdomadaire).

Les conditions aux limites utilisées sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau IV.12: Conditions aux limites.

Zone	Paramètre	Valeur/Etat
Inlet	Type	Velocity Inlet
	Vitesse	1.55 m/s
	Température	55 °C
	DPM	Escape
Outlet	Type	Pressure outlet
	DPM	Escape
Troue	Type	Wall
	DPM	Reflect
	Wall motion	Stationnaire
BHA	Type	Wall
	DPM	Reflect
	Wall motion	Stationnaire

La vitesse d'entrée est choisie selon le débit de pompage issue du rapport de forage hebdomadaire qui correspond à 2800 l/min.

La vitesse de rotation (RPM) est tirée du rapport de forage hebdomadaire qui correspond à 100-140 tr/min en face des sandstone.

Résultats et Discussions:

Le profile de vitesse du fluide de forage c'est développé en 3 phases, tel que :

- Région d'entrée hydrodynamique.
- Région hydrodynamique pleinement développée.

- Changement de section qui a cause chute de valeur de vitesse (puisque le débit est constant).

La vitesse est nulle au contact avec les parois (BHA et Troue), dans le temps la vitesse ne varie pas en fonction de Z quand la région développée est atteinte, mise appart dans la phase de changement de section (voir figure).

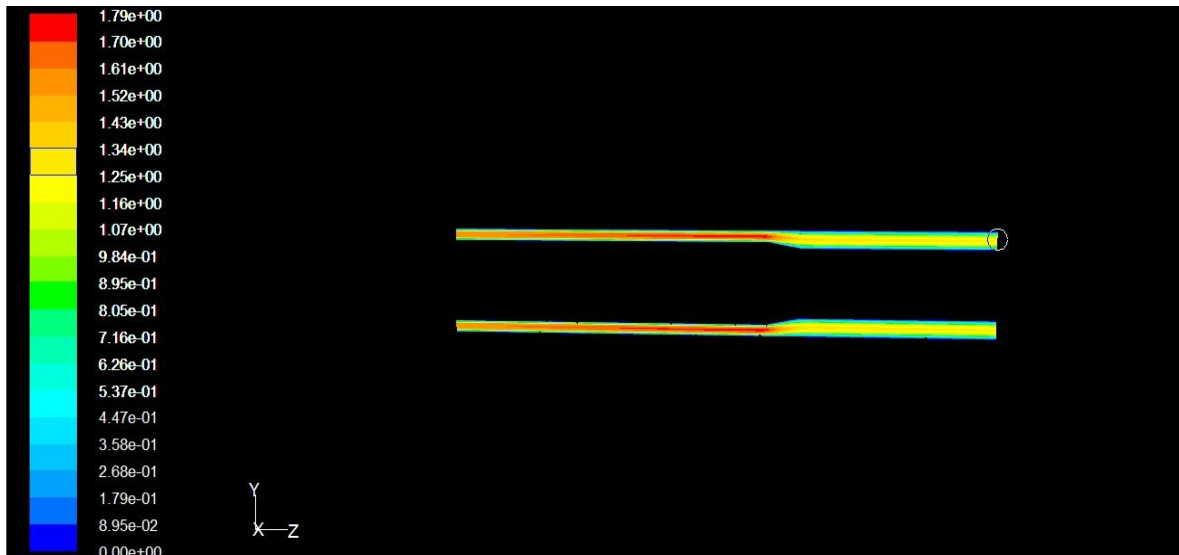


Figure IV.15: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 0 tr/min.

Ci-dessous le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que la trajectoire des déblais suit les lignes de courant qui suivent la verticalité du fluide puisque c'est un écoulement laminaire (faible nombre de Reynolds) sans brassage.

La vitesse des déblais suit les 3 phases d'écoulement du fluide de forage cité au dessus, sauf la vitesse d'entrée des cuttings est nulle qui s'est développé suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman.

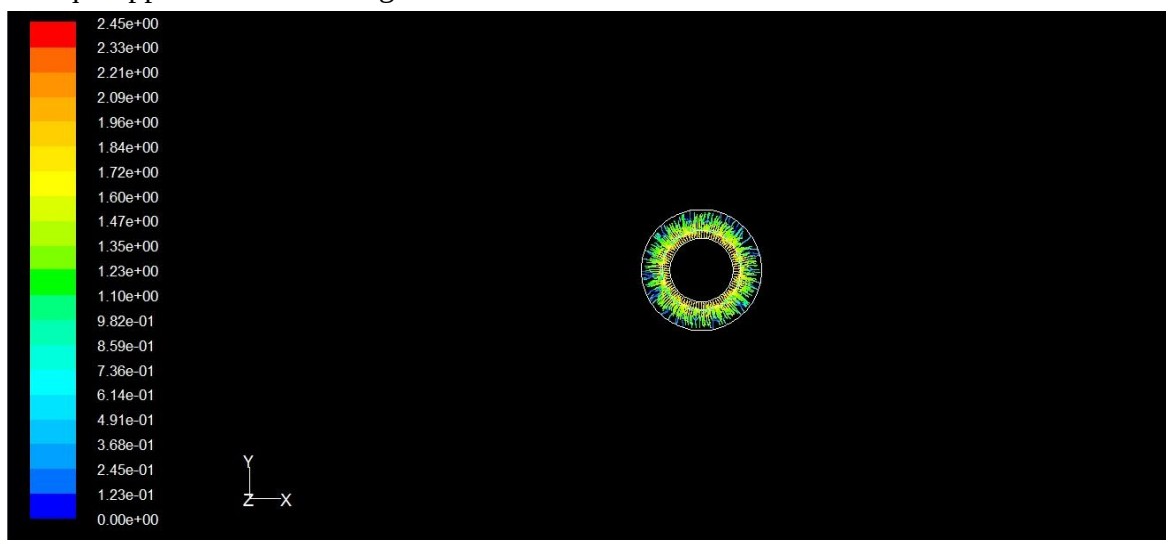


Figure IV.16: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 0tr/min.

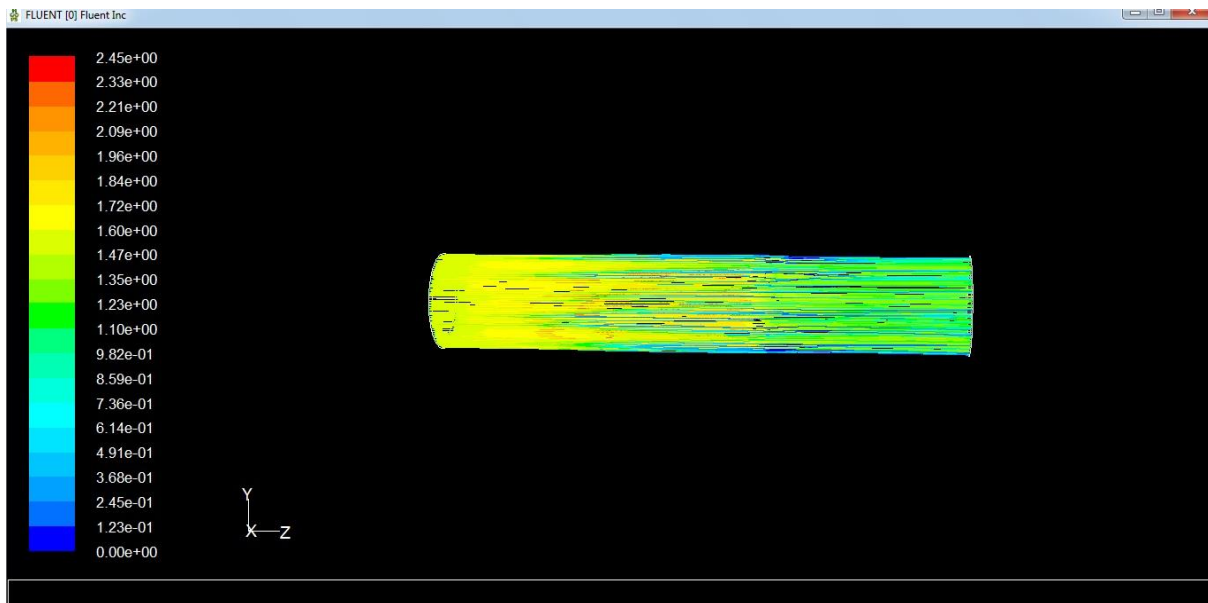


Figure IV.17: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 0tr/min.

6.6.2 RPM= 100tr/min :

Elle compote les mêmes paramètres du cas précédent, sauf pour la BHA qui sera comme suite :

BHA	Type	Wall
	DPM	Reflect
	Wall motion	100 tr/min

Résultats et Discussions:

Le profile de vitesse du fluide de forage s'est développé en 3 phases, tel que :

- Région d'entrée hydrodynamique.
- Région hydrodynamique pleinement développée.
- Changement de section qui a cause chute de valeur de vitesse (puisque le débit est constant).

Dans ce cas, La vitesse n'est pas nulle au contact avec la BHA qui tourne, où la vitesse est maximale au contact de la BHA et s'annule en allant vers la paroi du puits puisque le fluide est en écoulement spontanée suivant Z avec cet effet de Couette, ce qui explique la vitesse maximale au centre. Après le changement de section on observe l'écoulement de Couette proprement, dans le temps la vitesse ne varie pas en fonction de Z quand la région développée est atteinte, sauf dans la phase de changement de section (voir figure IV.18).

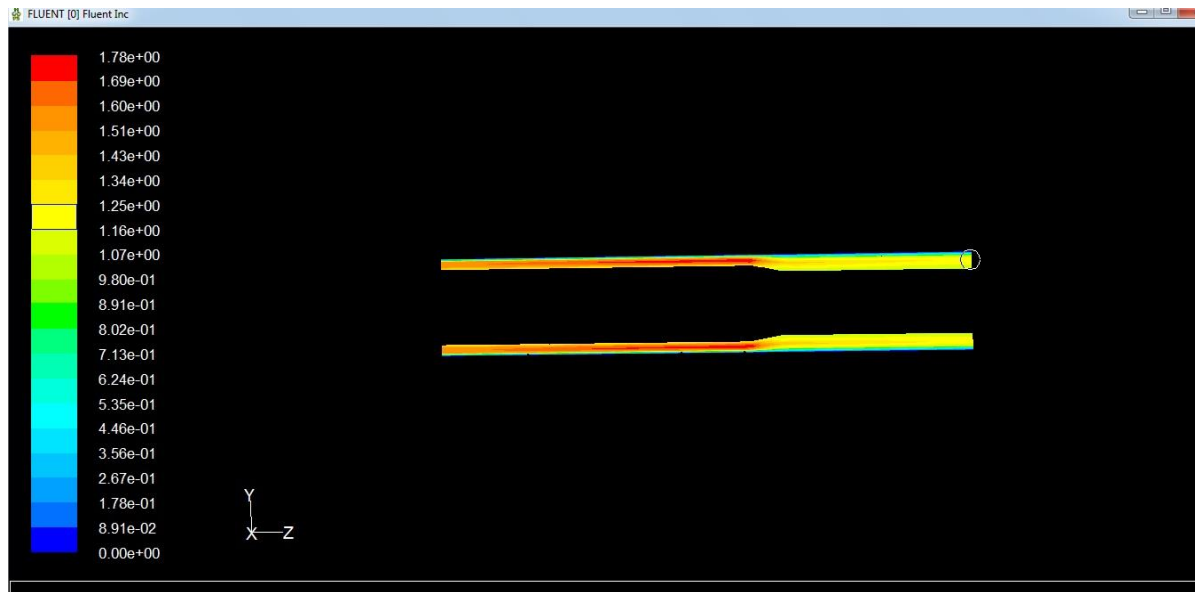


Figure IV.18: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 100tr/min.

La figure ci-dessous illustre le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que les déblais suivent la trajectoire rotationnelle suivant profile de vitesse du fluide puisque il y'a présence de force qui provoque la rotation.

La vitesse des déblais suit les 3 phases d'écoulement du fluide de forage cité au dessus, sauf la vitesse d'entrée des cuttings est nulle qui c'est développé suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman. En ce qui concerne la force centrifuge c'est relative tel qu'elle plaque les déblais de masse vers la paroi mais d'un autre coté il y'a l'effet de Couette qui favorise l'écoulement dont la vitesse déblais c'est augmenté en comparant au premier cas (rpm=0 tr/min).

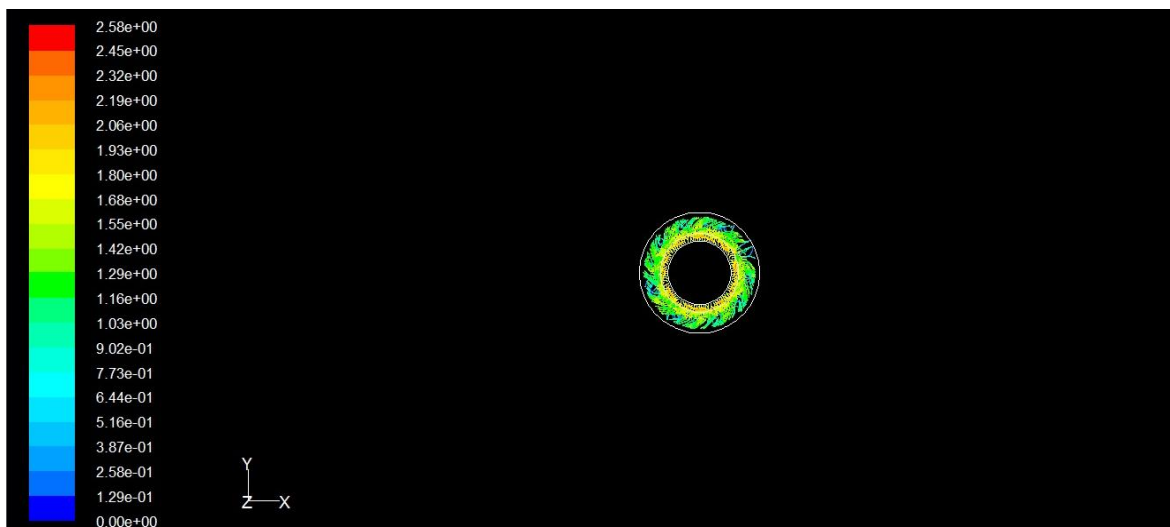


Figure IV.19: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 100tr/min.

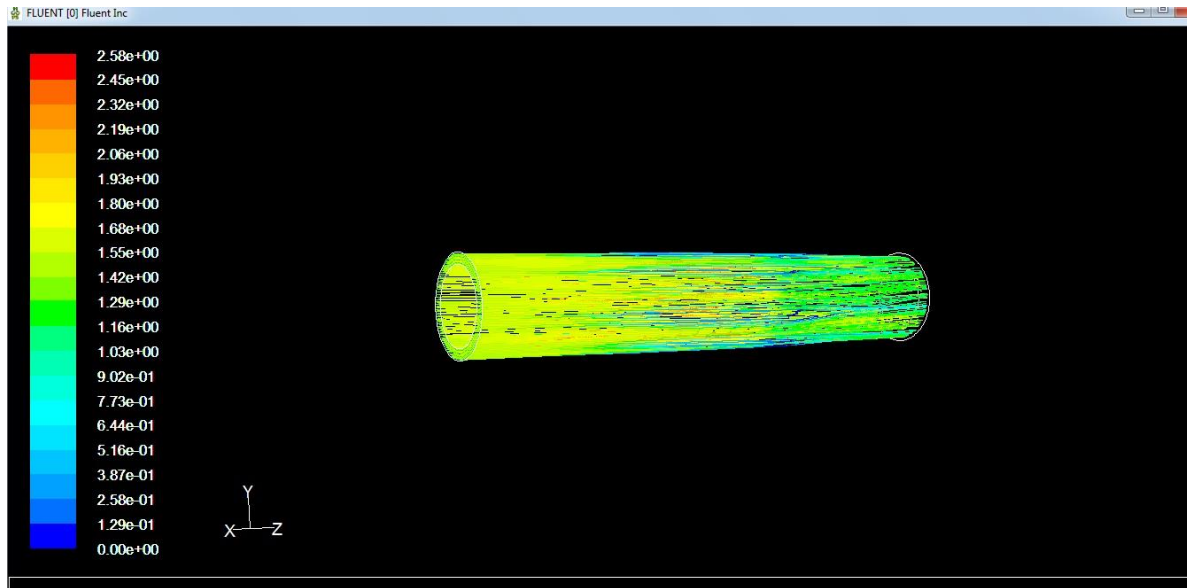


Figure IV.20: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 100tr/min.

6.6.3 RPM= 140 tr/min :

Elle compote les mêmes paramètres du cas précédent, mise appart celle de BHA qui sera de suite :

BHA	Type	Wall
	DPM	Reflect
	Wall motion	140 tr/min

Résultats et Discussions:

Le profile de vitesse du fluide de forage c'est développé en 3 phases, tel que :

- Région d'entrée hydrodynamique.
- Région hydrodynamique pleinement développée.
- Changement de section qui a cause chute de valeur de vitesse (puisque le débit est constant).

Par contre, La vitesse n'est pas nulle au contact avec la BHA qui tourne, ou la vitesse est maximale au contact de la BHA et s'annule en allant vers la paroi du puits mais puisque le fluide est en écoulement spontanée suivant Z avec cet effet de Couette, ce qui explique la vitesse maximale au centre. Après le changement de section on observe l'écoulement de Couette proprement, dans le temps la vitesse ne varie pas en fonction de Z quand la région développé est atteinte, mise appart dans la phase de changement de section (voir figure).

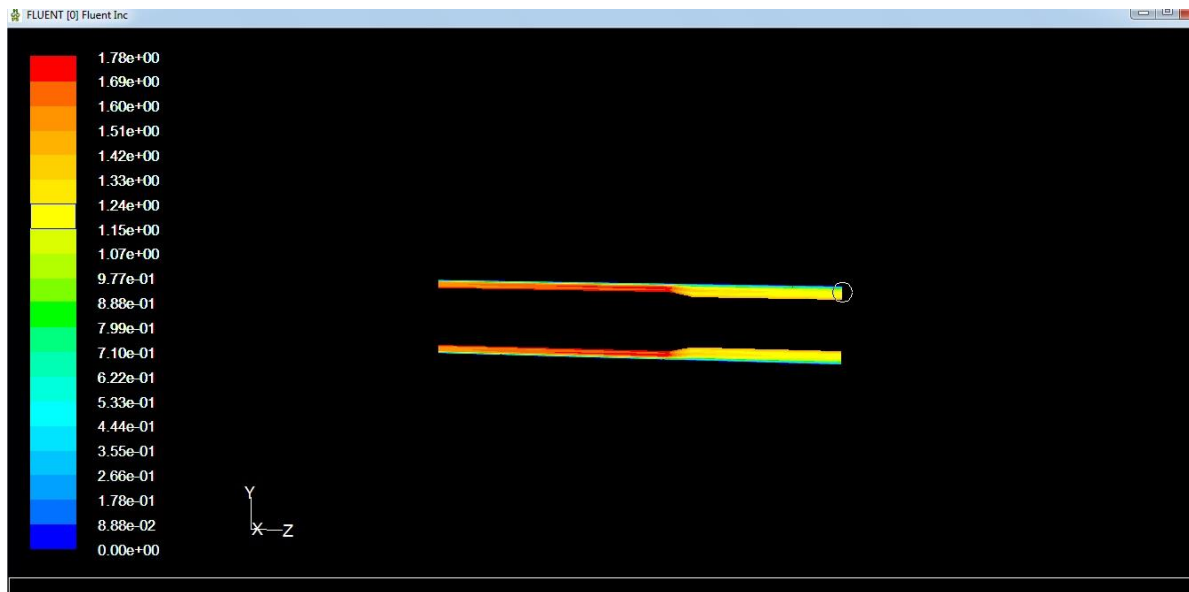


Figure IV.21: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 140tr/min.

La figure ci-dessous illustre le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que les déblais suivent la trajectoire rotationnelle suivant profile de vitesse du fluide puisque il y'a présence de force qui provoque la rotation.

La vitesse des déblais suit les 3 phases d'écoulement du fluide de forage cité au dessus, sauf la vitesse d'entrée des cuttings est nulle qui c'est développé suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman. En ce qui concerne la force centrifuge c'est relative tel qu'elle plaque les déblais de masse vers la paroi mais d'un autre coté il y'a l'effet de Couette qui favorise l'écoulement dont la vitesse déblais c'est augmenté en comparant au x deux premier cas (rpm=0, 100 tr/min).

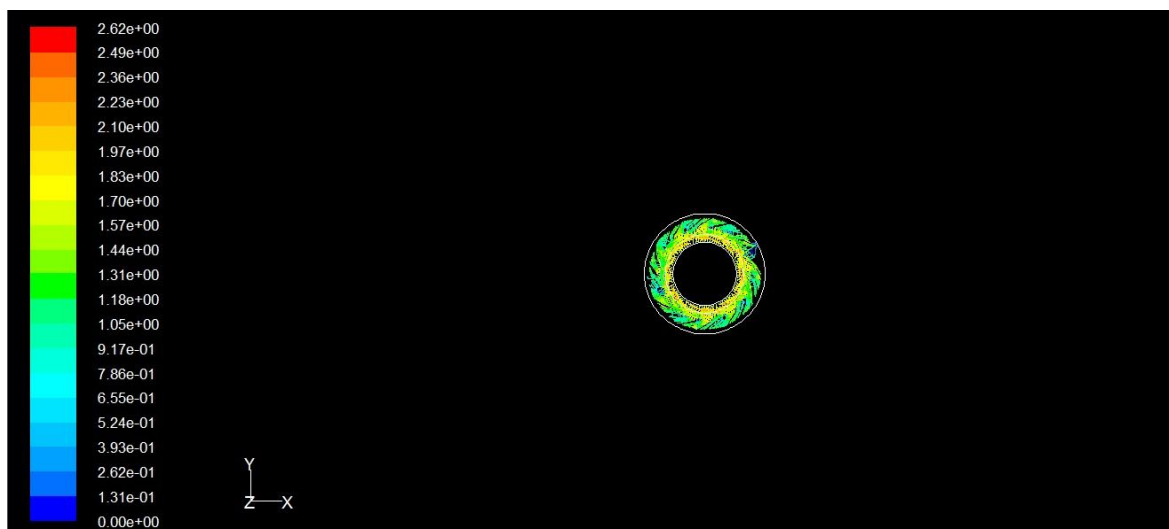


Figure IV.22: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à 140 tr/min.

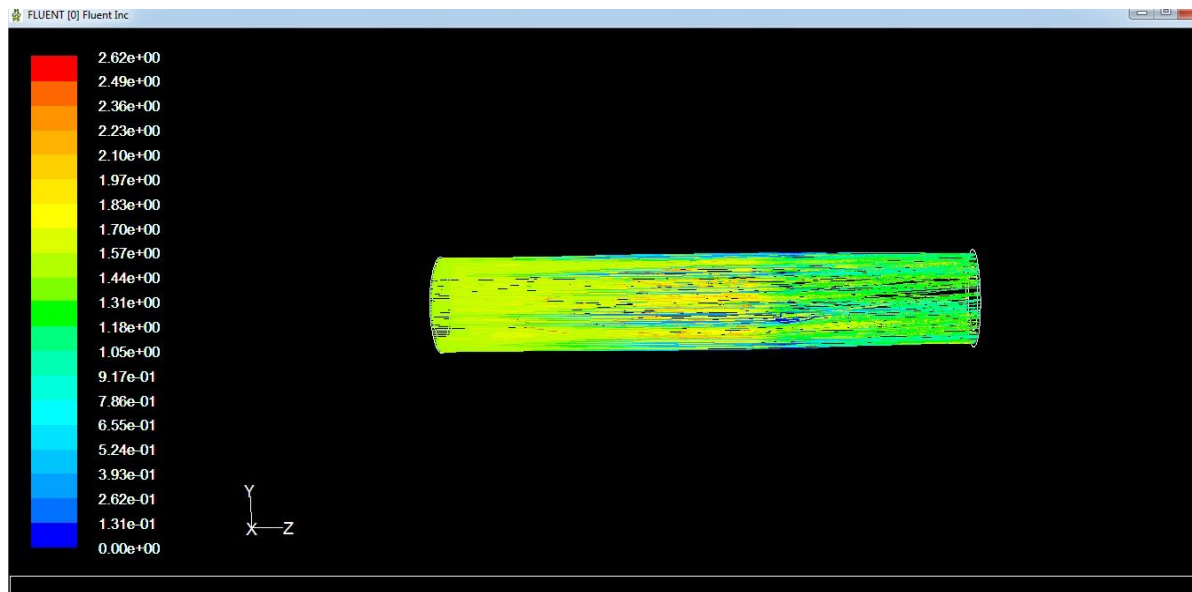


Figure IV.23: Profile de vitesse des déblais (vue de face) à 140tr/min.

6.6.4 RPM= 600 tr/min :

Elle compote les mêmes paramètres du cas précédent, mise appart celle de BHA qui sera de suite :

BHA	Type	Wall
	DPM	Reflect
	Wall motion	600 tr/min

Résultats et Discussions:

Le profil de vitesse du fluide de forage dans ce cas est dominé par l'effet de Couette ou le taux de cisaillement est élevé, donc la vitesse s'est augmenté d'une façon signifiante sans avoir les 3 phases préalables, mise a appart celle de changement de section.

Par contre, La vitesse n'est pas nulle au contact avec la BHA qui tourne, où la vitesse est maximale au contact de la BHA et s'annule en allant vers la paroi du puits

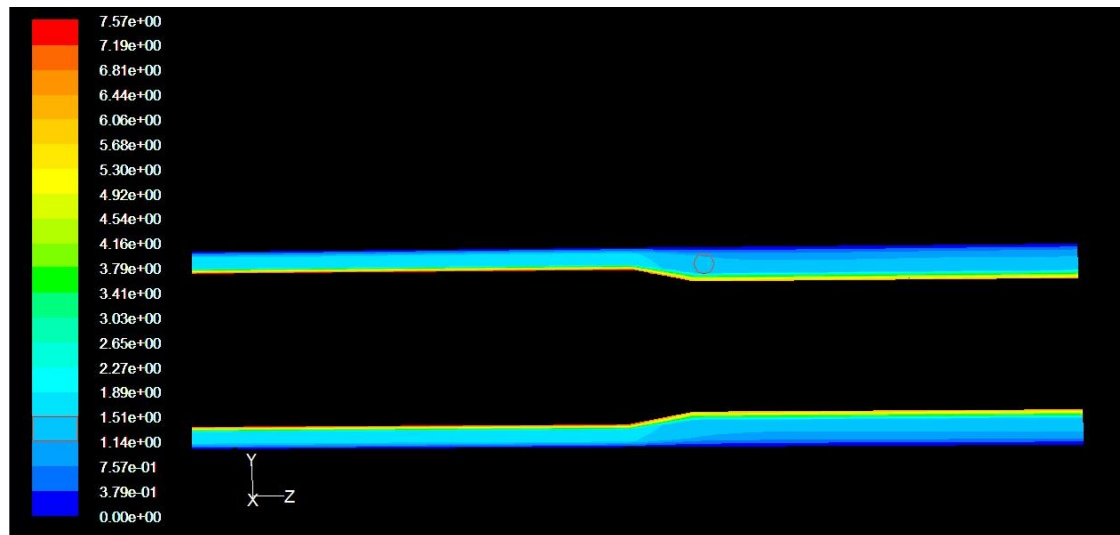


Figure IV.24: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à 600tr/min.

La figure ci-dessous illustre le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que les déblais suivent la trajectoire rotationnelle suivant profile de vitesse du fluide puisque il y'a présence de force qui provoque la rotation.

La vitesse d'entrée des cuttings est nulle ensuite elle s'est développée suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman. En ce qui concerne la force centrifuge c'est relative tel qu'elle plaque les déblais de masse vers la paroi mais d'un autre coté il y'a l'effet de Couette qui s'est imposé dans ce cas et favorise l'écoulement dont la vitesse déblais c'est augmenté d'une façon signifiante en comparant au x deux premier cas (rpm=0, 100, 140 tr/min).

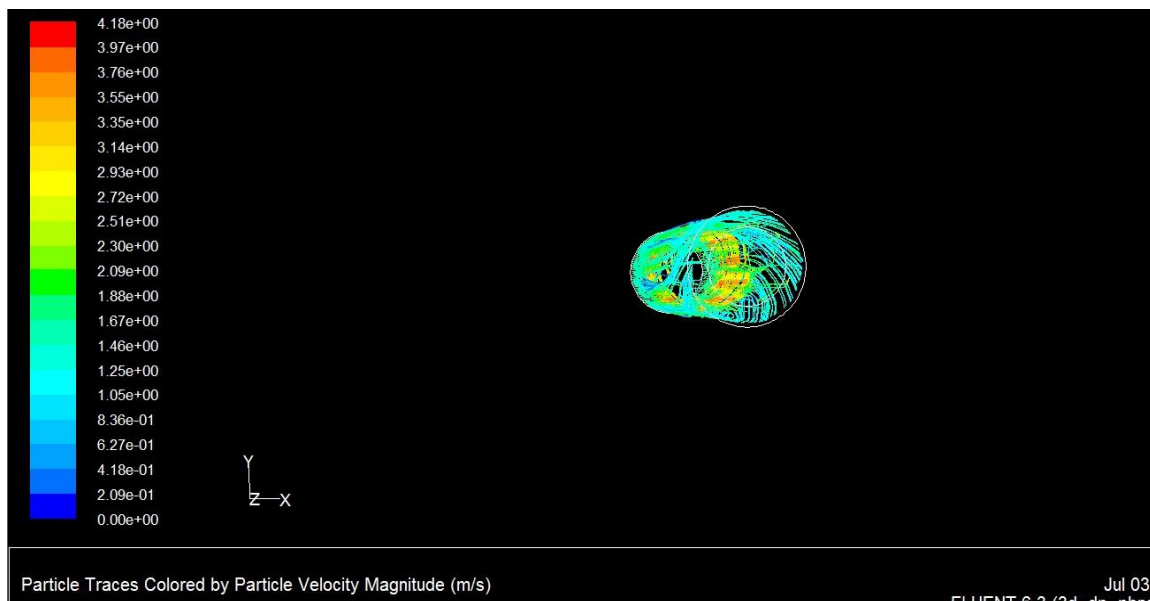


Figure IV.25: Profile de vitesse des déblais à 600tr/min.

6.6.5 Temps de remontée des déblais sous la variation de RPM :

Le temps de remontée des déblais est donné dans le tableau ci-dessous Pour les différentes vitesses de rotation de la BHA.

Tableau IV.13: Temps de remontée des déblais sous différentes vitesses de rotation rpm.

RPM (tr/min)	Temps de remonté des déblais (s)
0	1.63672
100	1.41197
140	1.30495
600	1.00278

On a tracé sur la figure la variation du temps de remontée des déblais en fonction de RPM.

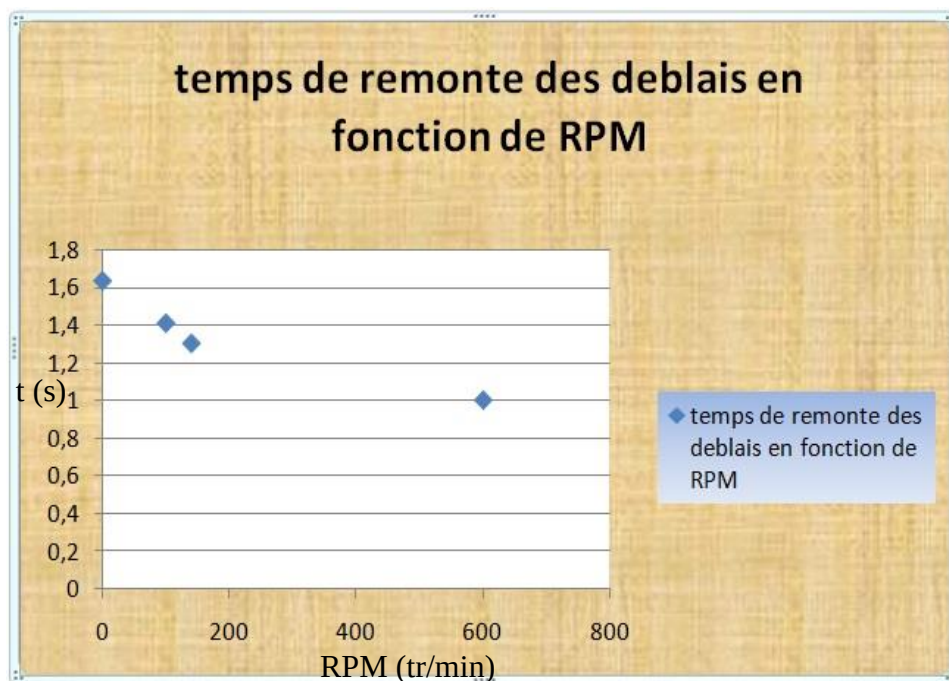


Figure IV.26: Temps de remonté des déblais pour RPM variable.

On observe que le temps de remontée des déblais diminue en augmentant la vitesse de rotation de la garniture du fait que l'effet de couette fournit une énergie supplémentaire qui se traduit par l'augmentation de l'inertie des particules tout en sachant que la forme des particules doit être quasi sphérique parce que dès qu'on s'éloigne de sphéricité (en ayant une facteur de forme inférieur à 1) cela conduit à un résultats proportionnellement inverse.

6.7 Vitesse variable :

6.7.1 $V_{entr}=1.6\text{ m/s}$:

RPM= 100tr/min (cas déjà étudié).

6.7.2 $V_{entr}=1\text{ m/s}$:

RPM= 100 tr/min.

Résultats et Discussions:

Le profile de vitesse du fluide de forage c'est développé en 3 phases, tel que :

- Région d'entrée hydrodynamique.
- Région hydrodynamique pleinement développée.
- Changement de section qui a cause chute de valeur de vitesse (puisque le débit est constant).

Par contre, La vitesse n'est pas nulle au contact avec la BHA qui tourne, où la vitesse est maximale au contact de la BHA et s'annule en allant vers la paroi du puits mais puisque le fluide est en écoulement spontané suivant Z avec cet effet de Couette, ce qui explique la vitesse maximale au centre. Après le changement de section on observe l'écoulement de Couette proprement, dans le temps la vitesse ne varie pas en fonction de Z quand la région développée est atteinte, mise appart dans la phase de changement de section (voir figure).

La vitesse du fluide de forage diminue par rapport à celle de $v=1.55\text{ m/s}$, $\text{rpm}=100\text{tr/min}$ et le taux de diminution est de l'ordre ± 1.45 .

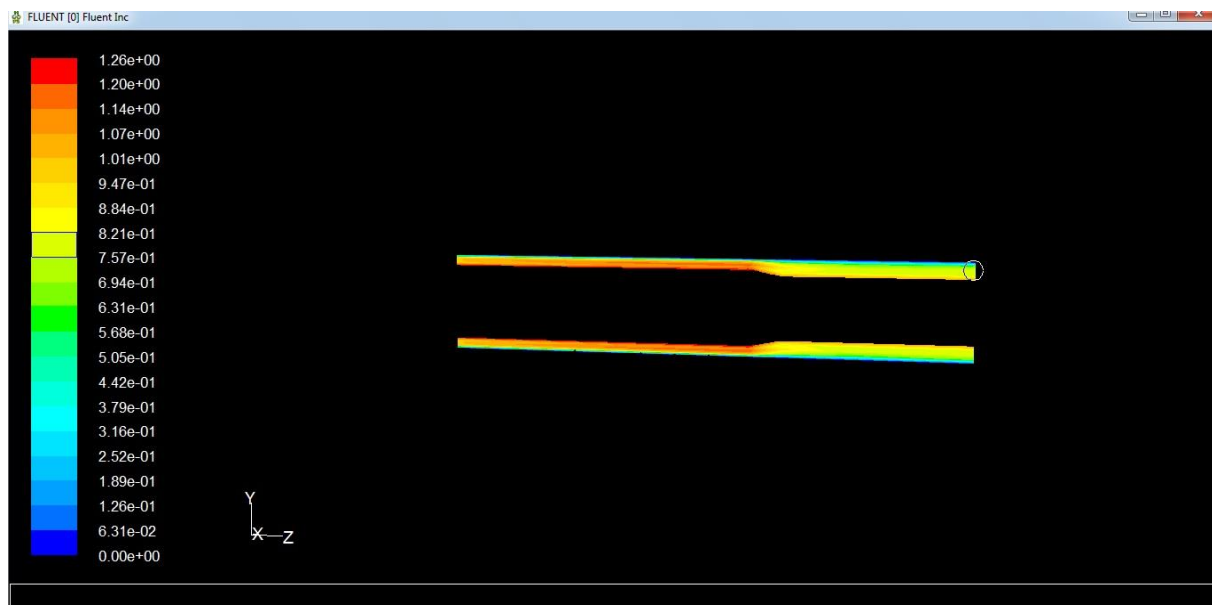


Figure IV.27: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à $V=1\text{m/s}$, $\text{rpm}=100\text{tr/min}$.

Ci-dessous est représenté le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que les déblais suivent la trajectoire rotationnelle suivant le profile de vitesse du fluide puisque il y'a présence de force qui provoque la rotation.

La vitesse des déblais suit les 3 phases d'écoulement du fluide de forage cité au dessus, sauf la vitesse d'entrée des cuttings est nulle qui s'est développé suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman. En ce qui concerne la force centrifuge c'est relative tel qu'elle plaque les déblais de masse vers la paroi mais d'un autre coté il y'a l'effet de Couette qui favorise l'écoulement dont la vitesse déblais c'est diminuer en comparant au premier cas ($V=1.55$ m/s).

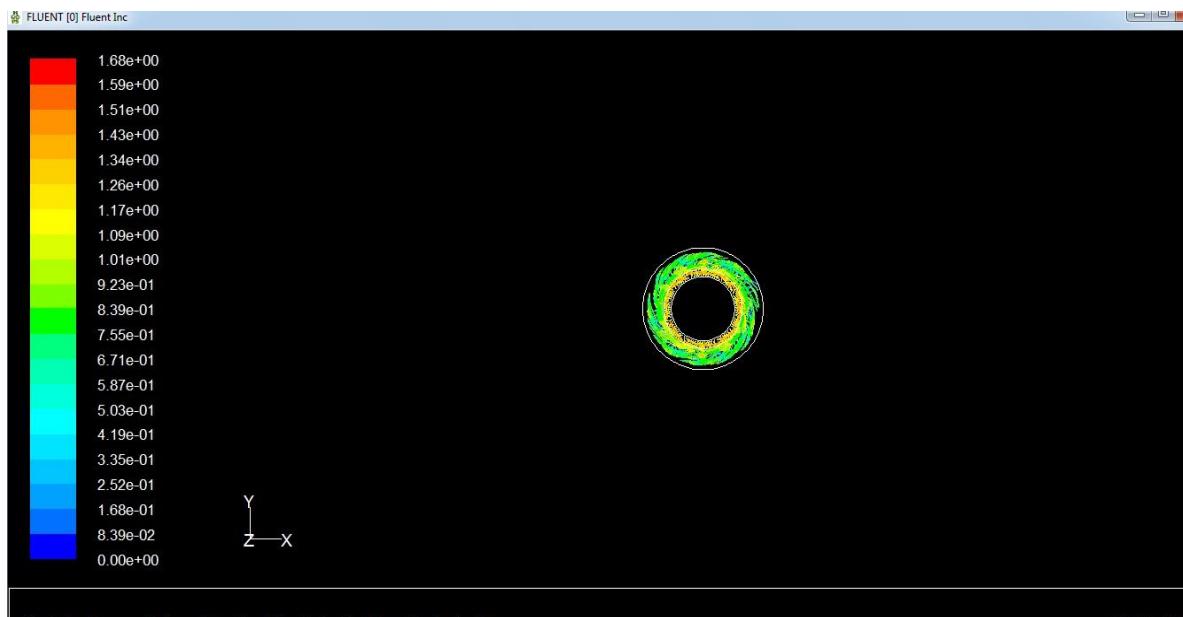


Figure IV.28: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à $V=1$ m/s, 100 tr/min.

6.7.3 $V_{entr}=2$ m/s :

RPM= 100 tr/min.

Résultats et Discussions:

Le profile de vitesse du fluide de forage c'est développé en 3 phases, tel que :

- Région d'entrée hydrodynamique.
- Région hydrodynamique pleinement développée.
- Changement de section qui a cause chute de valeur de vitesse (puisque le débit est constant).

Par contre, La vitesse n'est pas nulle au contact avec la BHA qui tourne, ou la vitesse est maximale au contact de la BHA et s'annule en allant vers la paroi du puits mais puisque le

fluide est en écoulement spontanée suivant Z avec cet effet de Couette, ce qui explique la vitesse maximale au centre. Après le changement de section on observe l'écoulement de Couette proprement, dans le temps la vitesse ne varie pas en fonction de Z quand la région développée est atteinte, mise appart dans la phase de changement de section (voir figure).

La vitesse du fluide de forage augmente par rapport à celle de $v=1.55\text{ m/s}$, $\text{rpm}=100\text{tr/min}$ et le taux d'augmentation est de l'ordre 1.25.

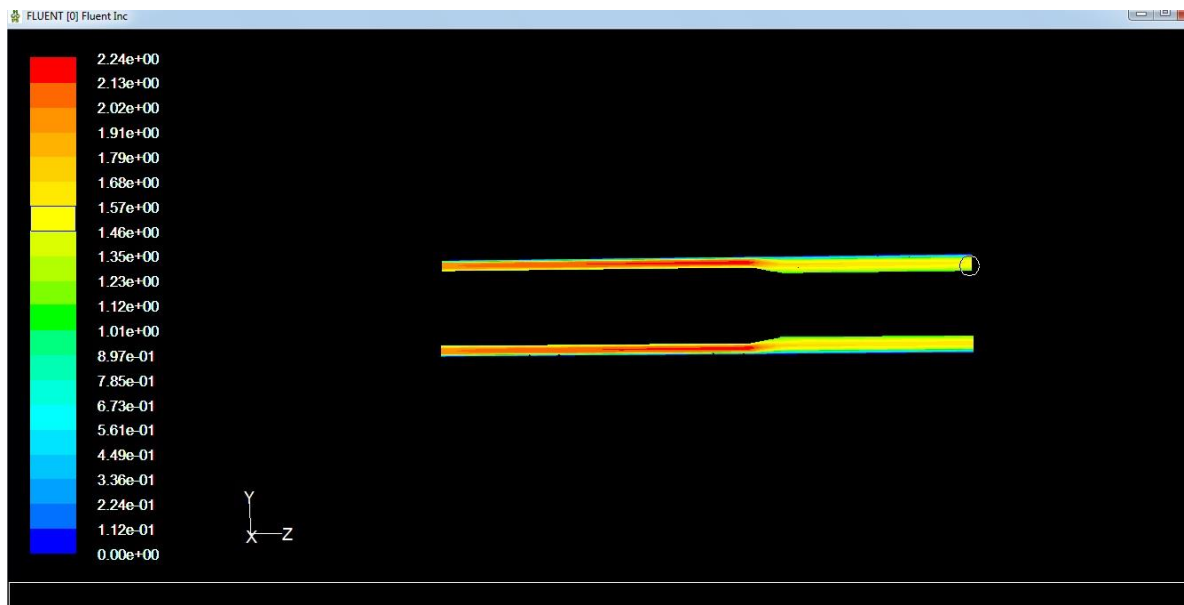


Figure IV.29: Profile de l'intensité de vitesse du fluide de forage à $V=2\text{ m/s}$, $\text{rpm}=100\text{tr/min}$.

La figure IV.30 illustre le profile de vitesse des déblais et leurs trajectoires tout au long de l'espace annulaire.

On constate que les déblais suivent la trajectoire rotationnelle suivant le profile de vitesse du fluide puisque il y'a présence de force qui provoque la rotation.

La vitesse des déblais suit les 3 phases d'écoulement du fluide de forage cité au dessus, sauf la vitesse d'entrée des cuttings est nulle qui c'est développé suivant la flottabilité, viscosité du fluide qui opposent la force de gravité et la force de Saffman. En ce qui concerne la force centrifuge c'est relative tel qu'elle plaque les déblais de masse vers la paroi mais d'un autre coté il y'a l'effet de Couette qui favorise l'écoulement dont la vitesse déblais c'est augmenté en comparant au premier cas ($V=1.55\text{ m/s}$).

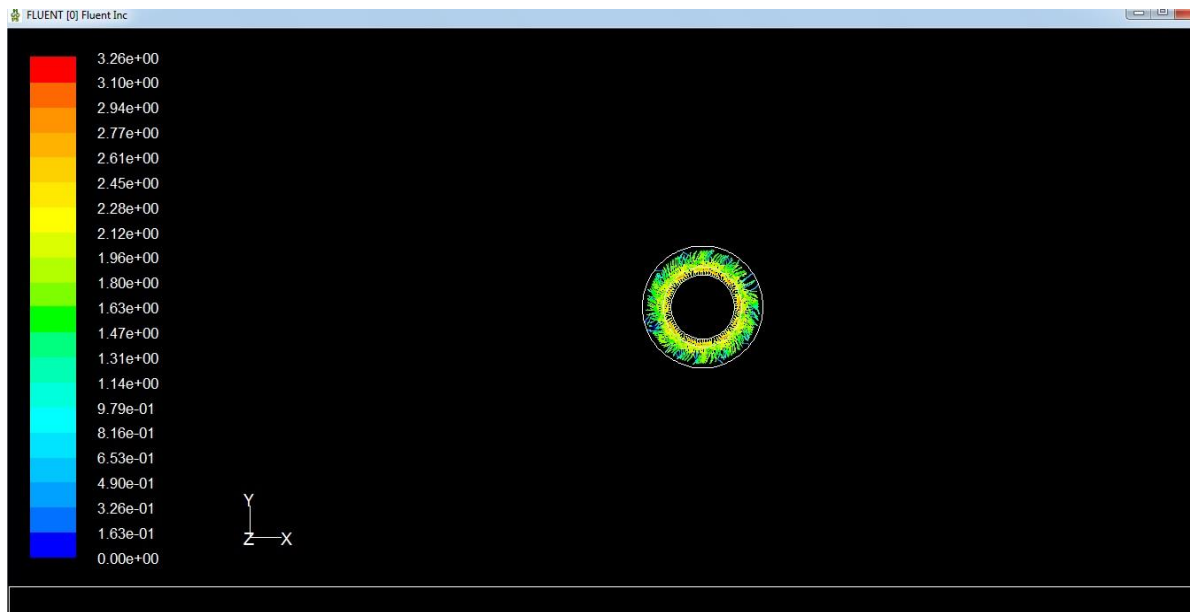


Figure IV.30: Profile de vitesse des déblais (vue de haut) à $V=2\text{m/s}$, 100 tr/min.

6.7.4 Temps de remontée des déblais sous la variation de la vitesse d'entrée :

Le temps de remonté des déblais est illustré dans le tableau et figure ci-dessous pour les différentes vitesses d'entrée du fluide de forage.

Tableau IV.14: Temps de remonté des déblais sous différentes vitesses d'entrée.

Vitesse d'entée (m/s)	Temps de remonté des déblais (s)
1	2.28185
1.55	1.41197
2	1.09728

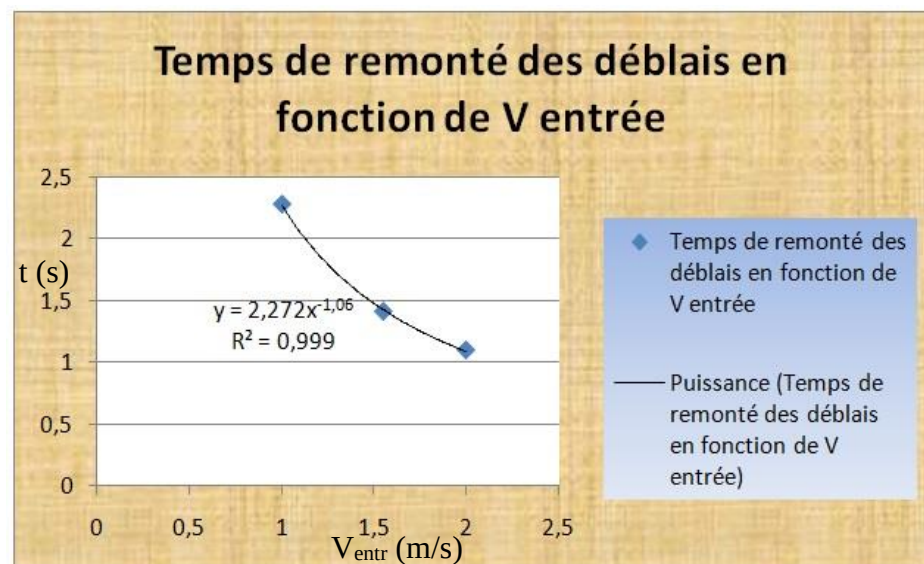


Figure IV.31: Temps de remonté des déblais pour V_{entr} variable.

On peut associer une fonction mathématique qui répond à la variation du temps de remontée des déblais en fonction de Vitesse d'entrée du fluide et cela par une fonction Puissance avec un coefficient $R^2 = 0.999$.

$$t = 2.272V^{-1.06} \quad (4.8)$$

Avec :

t = temps de remonté des déblais.

V = Vitesse d'entrée du fluide de forage.

6.8 Densité des déblais variable :

Les densités des déblais utilisées dans cette étude sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.15: Densité des déblais dont la simulation est faite.

V _{entr}	1.55 (m/s)
RPM	100 (tr/min)
Densité des déblais	1.35, 2, 2.65

6.8.1 Temps de remontée des déblais sous la variation de la densité des déblais :

Le temps de remonté des déblais est illustré dans le tableau et figure ci-dessous pour les différentes densités des déblais.

Tableau IV.16: Temps de remonté des déblais sous différentes densité des déblais.

Densité	Temps de remonté des déblais (s)
1.35	1.37577
2	1.38621
2.65	1.41197

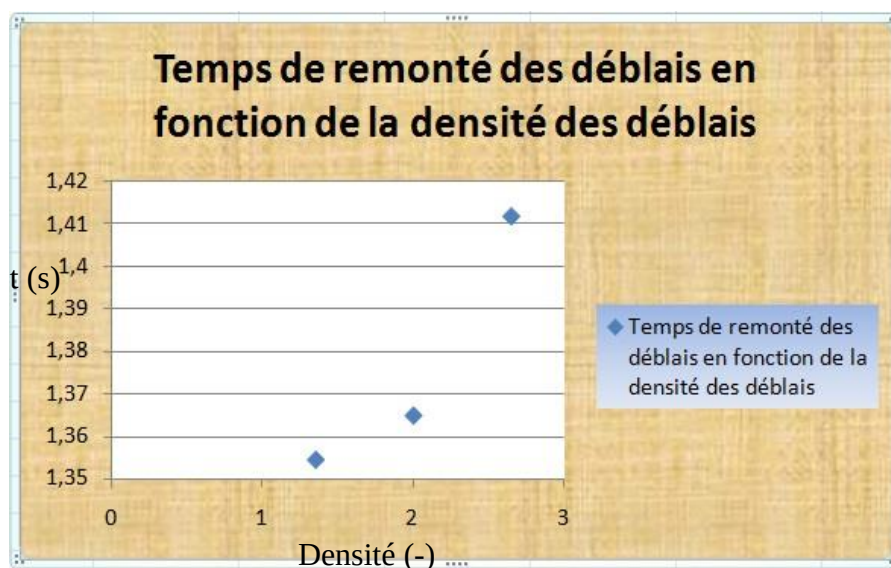


Figure IV.32: Temps de remonté des déblais avec densité des cuttings variable.

On constate que le temps de remontée augmente pour les déblais les plus denses est cela revient à la force gravitationnelle (nommée Force de volume suivant la loi de conservation du mouvement de Navier Stokes) qui prédomine les autres forces, à savoir les forces d'Archimède, force exercée par le fluide de forage (inertie du fluide). On remarque que l'évolution du temps de remontés des déblais peut être associé à une fonction non linéaire (on n'a pas pu lui associé une fonction à cause du nombre limités de densité utilisées)

Conclusion Générale

Conclusion Générale:

L'objectif principal de ce travail est la simulation du transport des déblais sous l'influence de divers paramètres liés à la cinématique et paramètres reliés aux déblais, à savoir la vitesse de rotation des tiges, la vitesse d'entrée du fluide de forage et la densité des déblais.

Nous avons modélisé la boue de forage OBM par le biais du logiciel RGui suivant le modèle de Herschel Bulkley qui s'est avéré le plus adéquat tout en déterminant les 3 paramètres : Indice d'écoulement n , Indice de consistance k et contrainte seuil τ_c avec une erreur quadratique minimal ainsi que l'introduction du paramètre température T dans le terme indice de consistance avec un coefficient de détermination R^2 proche de la valeur 1 (une très bonne correspondance, en comparant les valeurs données par le modèle et celles du rhéomètre Anton Paar MCR 301). Cela nous permet de comprendre et prédire le comportement rhéologique de ce fluide complexe à n'importe quel taux de cisaillement sous différentes température à savoir les hautes températures.

Cette étude nous a permis de constater que La vitesse du fluide utilisée en chaque point dans l'espace annulaire du fluide de forage augmente d'un taux de 1.25 selon les deux vitesses d'entrée 1.55 m/s et 2m/s, cependant elle diminue d'un taux de ± 1.45 selon les deux vitesses d'entrée 1.55 m/s et 1 m/s avec une vitesse de rotation des tiges constantes 100 tr/min.

La vitesse d'entrée du fluide de forage (débit de pompage) est proportionnellement inverse au temps de remontée des déblais ce qui signifie une efficacité significative du transport des déblais où on a pu associer une équation de forme puissance de la variation du temps de remontée des déblais en fonction de la vitesse d'entrée du fluide avec un coefficient de détermination R^2 proche de la valeur 1 (une très bonne correspondance entre les résultats donnée par le code Fluent ANSYS et ceux du modèle de la forme puissance).

Cependant l'augmentation de la densité des déblais implique une proportionnalité au temps de remontée des déblais suite à la force de gravité qui ralentit le déplacement des déblais du fond vers la surface. La vitesse de rotation du train de tige RPM amplifie l'efficacité du transport des déblais pour des formes quasi sphérique.

Recommandations :

Le temps de remontée des déblais diminue tout en augmentant la vitesse de rotation de la garniture de forage pour des formes de déblais sphérique, pour cela on recommande de revoir la composition de la BHA en introduisant un nouveau équipement désigné pour tailler les déblais en forme quasi sphérique ou même sphérique et cela Just au dessus de l'outil de forage avec un corps externe spiralé et un corps interne avec des sections pour le passage du fluide et les déblais avec angle variable suivant la trajectoire des déblais qui dépend de la vitesse de rotation de la garniture de forage. L'incorporation de cet équipement engendre des pertes de charges additionnelles, donc on doit les calculer par le biais de la simulation hydrodynamique du fluide. L'utilisation de cet équipement sera dépendante du type de l'outil de forage qui nécessite un haut torque.

Références Bibliographique:

- [1] Gray, G.R., Darley, H.C.H. et Rogers, W.F. (1980) Composition and properties of oil well drilling fluids, Chap.3, 6, 9. Gulf Publ. 4th Ed.
- [2] Landriot, G. (1968) Fluide de forage, édition Technip, France.
- [3] Steve, S et al. (2006), KMC Oiltools Global Research and Technology Centre, version 1, Section 2, Kuala Lumpur.
- [4] Ryan, C., G. et Chillingar, V. (1996) Drilling fluids: state of the art, Journal of petroleum science and engineering 14, 221-230.
- [5] Economides, M. J. et al. (1988) Petroleum well construction, édition John Wiley and sons. pp. 199 – 204.
- [6] Herzhaft, B. (2001) Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels, 36^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR 2001), Marne-la-Vallée France, 10- 12 Octobre.
- [7] Peysson, Y. (2004) Solid/Liquid Dispersions in Drilling and Production. Oil and Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 59 No. 1, pp. 11-21.
- [8] The Chevron Texaco and BP Drilling Fluid Manual, Rev 01/2002, Section 2
- [9] IDF (1988) Product data manual.
- [10] S.N.Repal (1961) Le forage à l'air. Compte rendu sur le forage à l'air à Djebel Onk (Algérie)
- [11] Hannachi, M. (1972) Air Drilling. Eight Arab Petroleum Congres. Alger.
- [12] Abid, D. (1995) Synthèse sur les fluides de forage, rapport 419/94. Sonatrach/CRD Boumerdès, Algérie.
- [13] AVA Drilling Fluids Manual, (2004), Version 1, Chapter 1: function of drilling fluids.
- [14] Perrin J., (1910). Brownian movement and molecular reality, translated by Soddy. FRS. F, Taylor and Francis, London.
- [15] Einstein, A. (1926). Investigation on Theory of Brownian movement. Methuen, London.
- [16] Coussot, P. et Grossiard J., (2002). Comprendre la rhéologie, de la circulation du sang à la prise du béton", EDP Science, 221p.
- [17] Hammadi, L. (2013), Rhéologie des fluides complexes Chapitre 2 Fluides Non-Newtoniens USTOMB.
- [18] Gareche, M. (2018-2019), cours Mécanique des fluides pétrolière, Chapitre 2 : Classifications des fluides non Newtonien.
- [19] Gareche, M. (2018-2019), cours Mécanique des fluides pétrolière, Chapitre 3 : Principes de rhéomètres et Techniques de mesures.
- [20] Elaziouti, A, (2015-2016), dynamiques des fluides réels.
- [21] Roussel, J. 2010. Cours de Mécanique des fluides.
- [22] ANSYS Fluent Theory Guide, November 2013, Release 15.0
- [23] ANSYS Fluent User's Guide, November 2013, Release 15.0
- [24] Gambit 2.2 Tutorial Guide, September 2004, Fluent.Inc.
- [25] Fluent 6.3 Tutorial Guide, September 2006, Fluent Inc.

Annexes

Annexe I :

1) Présentation du Logiciel RGui :

C'est un logiciel de statistique créé par ROSS IHAKA et ROBERT GENTLEMAN ; il est à la fois un langage informatique et un environnement de travail dont les commandes codées sont exécutées grâce à des instructions simples. Ce logiciel sert à manipuler des données, à tracer des graphiques et a exécuté diverses tâches complexes tel qu'une régression linéaire, régression non linéaire, traitements de données...etc. Dans ce mémoire, et dans le but d'investiguer les paramètres clefs associés à la problématique formulée, nous avons utilisé ce logiciel pour la détermination des trois paramètres « n, k, Yield Point »

Les tableaux suivants regroupent les commandes et sous commandes principales du logiciel RGui pour la résolution d'une régression non linéaire.

Tableau 1: Liste des commandes principales dans la formulation du programme d'une régression non linéaire.

Commande	Fonction
read.table()	Lecture des données (fichier.txt).
names()	Afficher les noms des données.
plot()	Représentation graphique des données.
nls.control()	Contrôle des résultats et convergence.
nls()	Commande de régression non linéaire.

Tableau 2: Liste des sous commandes principales dans la formulation du programme d'une régression non linéaire.

Sous commande	Fonction
header=True	Titre de chaque colonne de données.
Nom du fichier\$.....	Affecter les titres aux variables choisis.
start=list()	Injection des valeurs initiales.

Annexe II

1) Présentation du logiciel utilisé :

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; pré-processeur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers *.msh pour Fluent. Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. Le Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème,
- Le maillage et sa vérification,
- La définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs [22] [23].

1.1) Gambit :

1.1.1) Démarrage de Gambit :

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant : **:/Fluent.Inc/ntbin/ntx86/Gambit.exe**

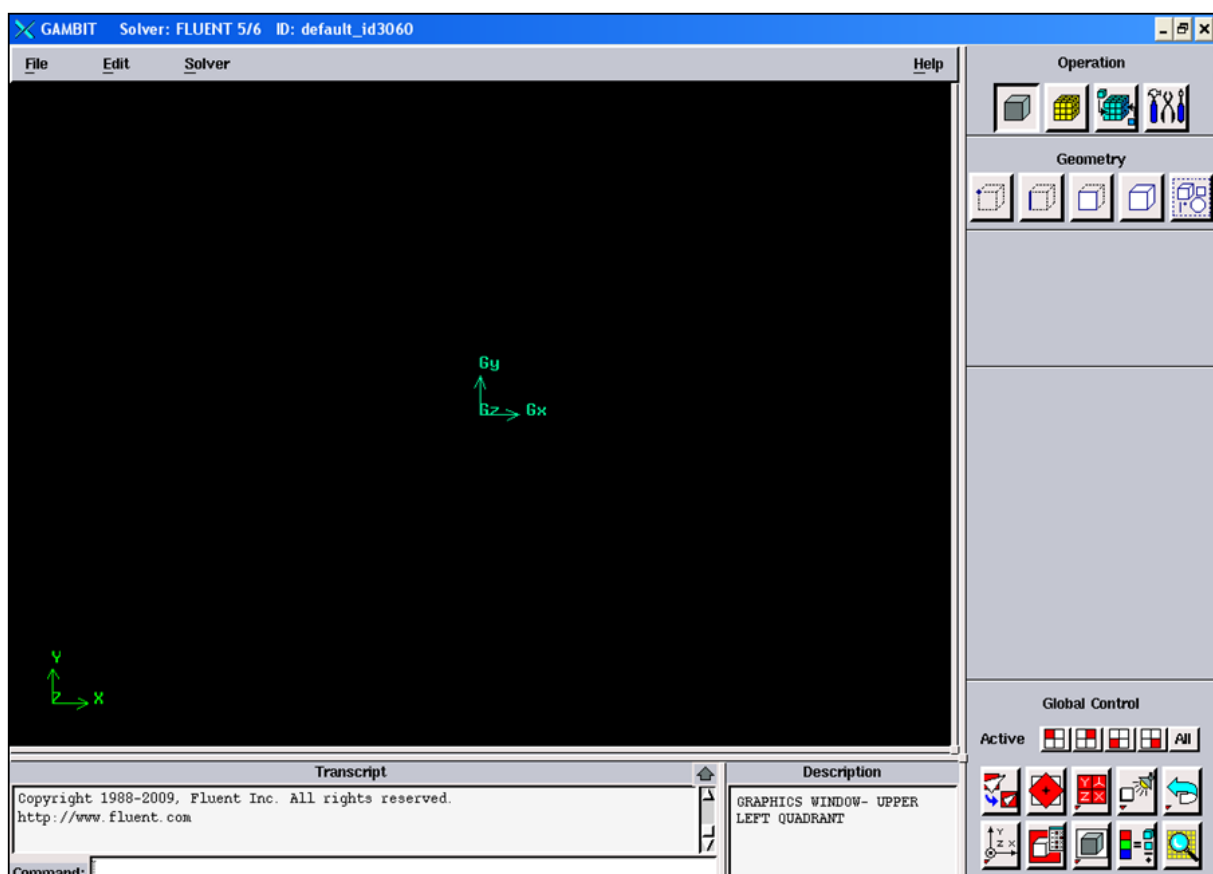


Figure 1 : Lancement du Gambit.

1.1.2) Construction de la géométrie :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

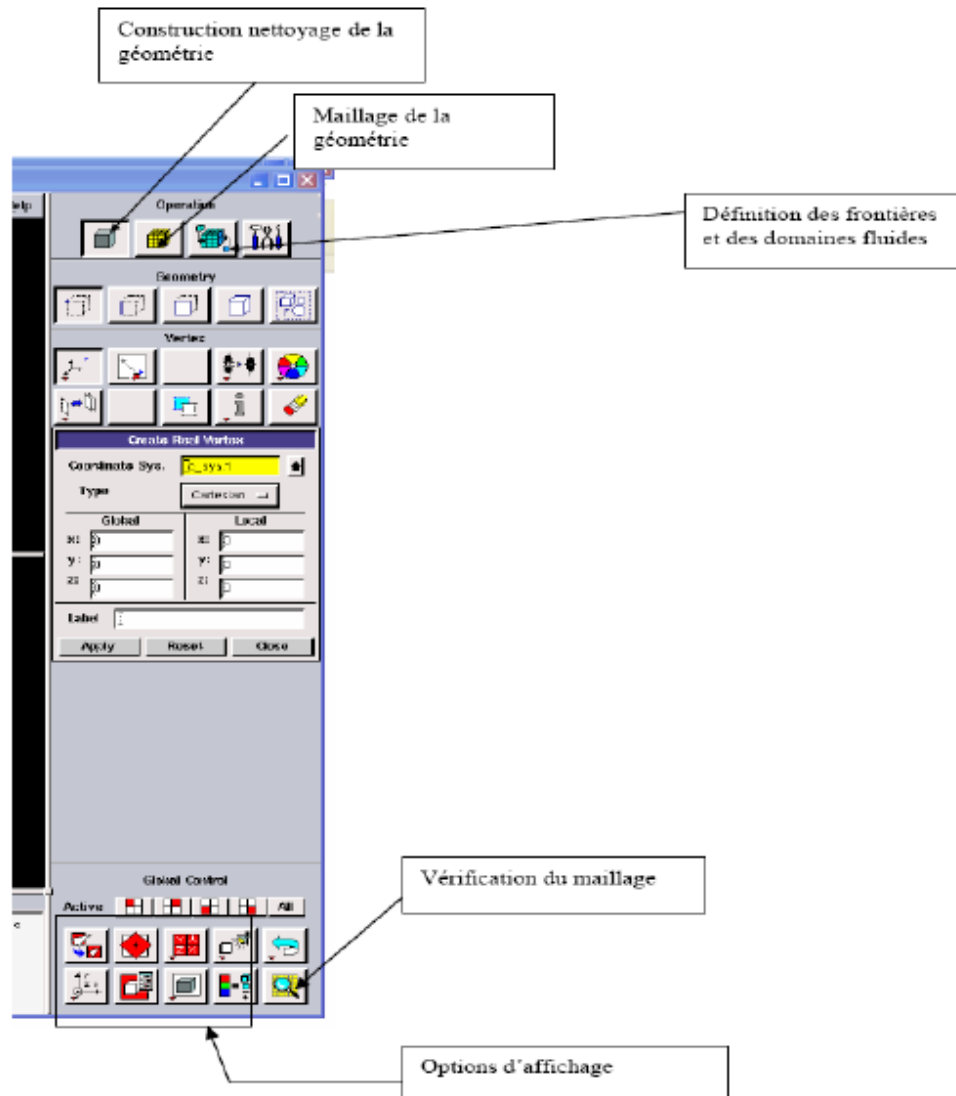


Figure 2 : Les opérations pour construire une géométrie.

1.1.3) Maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage) [24].

Les différents types de maillage sont :

- Maillage structuré (quadra/hexa)
- Maillage non structuré (tri/tétra.)

- Maillage hybride : qui regroupe les deux maillages précédents.

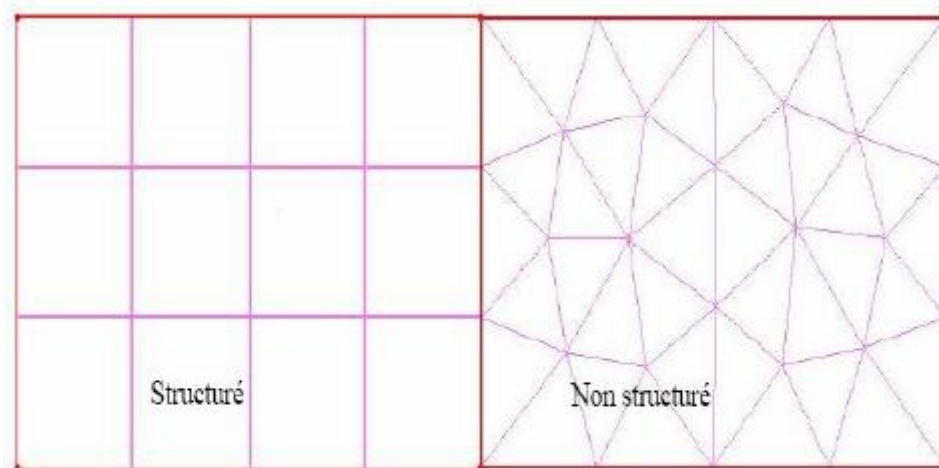


Figure 3 : Maillage structuré et non structuré.

1.1.4) Conditions aux limites et définition de domaines :

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage. Comme conditions aux limites, on peut imposer un débit massique à l'entrée de la machine, en utilisant la condition 'Mass flow Inlet' ou une 'Velocity inlet', la pression à la sortie en utilisant la condition 'Pressure Outlet'.

La figure suivante résume les différentes conditions qu'on peut imposer pour un écoulement d'air en convection forcée turbulente. Ensuite, on procède à la définition des domaines de calcul [24].

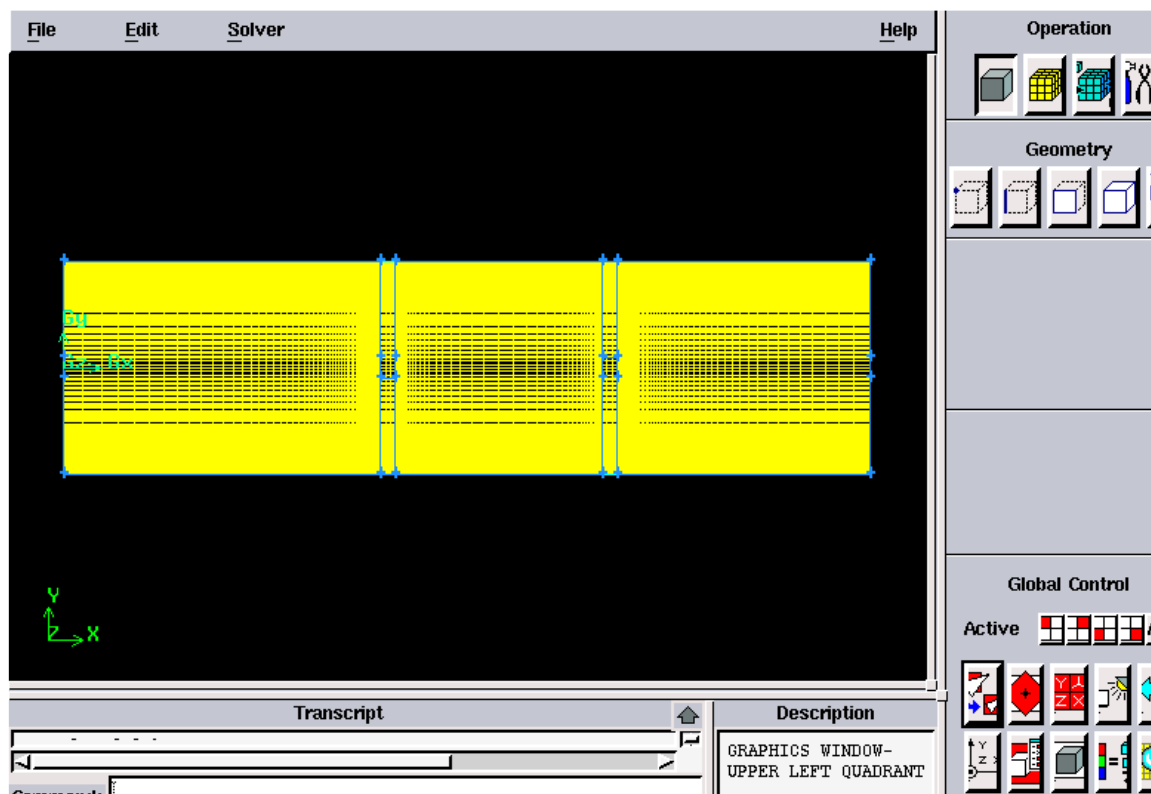


Figure 4 : Définition des conditions aux limites.

1.2) Fluent :

Fluent est un code CFD (Computational Fluid Dynamics) commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides (champs de vitesses, de température...), c'est la raison pour laquelle on l'a choisi pour réaliser notre simulation.

Ensuite l'utilisation de Fluent est simple, il suffit de suivre l'ordre des menus en partant de la gauche pour aller vers la droite. Le premier menu que nous allons étudier est le menu **GRID**. La première chose à faire est d'utiliser l'option check afin de vérifier si le maillage importé comporte des anomalies comme des problèmes de jointure entre les différentes surfaces du maillage. Pour choisir l'échelle d'étude du maillage et par conséquent réfléchir en nombres adimensionnels, il faut utiliser l'option scale (choix est très important car souvent suivant les dimensions du domaine, les phénomènes mis en jeu ne sont pas les mêmes).

Remarque : il est possible de vérifier tout de suite la forme de la grille en cliquant sur **DISPLAY** et ensuite sur grid. On peut de cette façon vérifier que la géométrie correspond bien à ce que l'on veut.

Le second menu que l'on va utiliser est le menu **DEFINE**. La démarche à suivre est de partir des options du haut du menu secondaire et de descendre au fur et à mesure. Nous trouvons donc l'option Models qui se décompose aussi en un autre menu. solve permet de choisir le type de solveur que l'on souhaite utiliser (implicite, explicite, stationnaire, 2D...). viscous permet de choisir le modèle de turbulence que l'on va prendre pour résoudre le problème (laminaire, k- ϵ , k- ω , LES...). Energy permet de choisir si oui ou non on doit faire intervenir l'équation de l'énergie dans la résolution du système (dès qu'un gradient de température intervient dans les phénomènes il faut utiliser cette équation pour d'une part observer une solution réaliste mais aussi souvent pour faciliter la convergence).

Dans le menu Models radiation qui sont à utiliser en fonction de l'énoncé du problème. Vient ensuite le sous menu Materials qui permet de choisir le fluide gravity et entrer la valeur voulue de la gravité. On peut aussi entrer, et cela est souhaitable, la valeur initiale de la densité et lui donner une valeur sous Fluent (ceci montre que même si l'on a fait une erreur de condition sous Gambit, on peut encore tout modifier sous Fluent).

Pour une entrée de fluide, on fixe la vitesse ainsi que le niveau de turbulence ; pour un mur on peut fixer soit un flux constant, soit une température constante et bien d'autres possibilités (telles que la rugosité du mur par exemple).

Maintenant que la géométrie est en place, nous pouvons paramétrer et initialiser le solveur de Fluent dans le menu suivant : le menu **SOLVE**. Le premier sous-menu est le menu Control qui comprend tout d'abord l'option solution. C'est grâce à cette option que l'on va pouvoir entrer les différents facteurs de sous-relaxation du système : pression, température etc.... Ces facteurs peuvent être modifiés au cours de la résolution. Leur principal intérêt est de forcer la solution à converger : en les baissant, on diminue la vitesse de convergence mais on l'améliore (encore que ces constatations soient valables en générales, mais pas nécessairement dans tous les cas) [25].

Voici quelques figures montrant le logiciel Fluent :

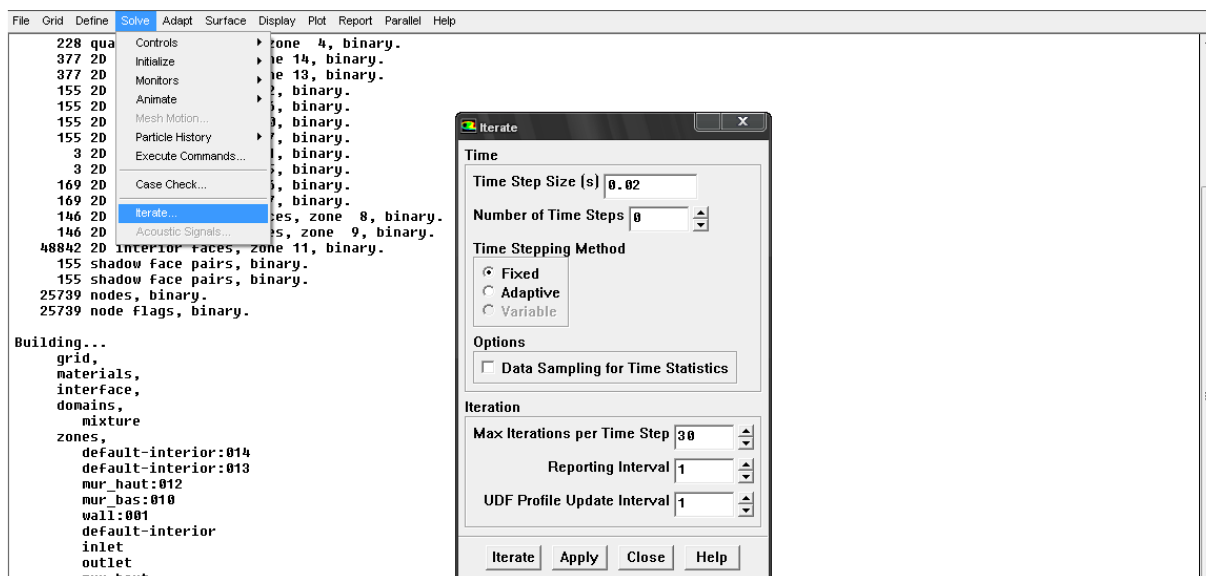


Figure 5 : Choix du nombre des itérations.

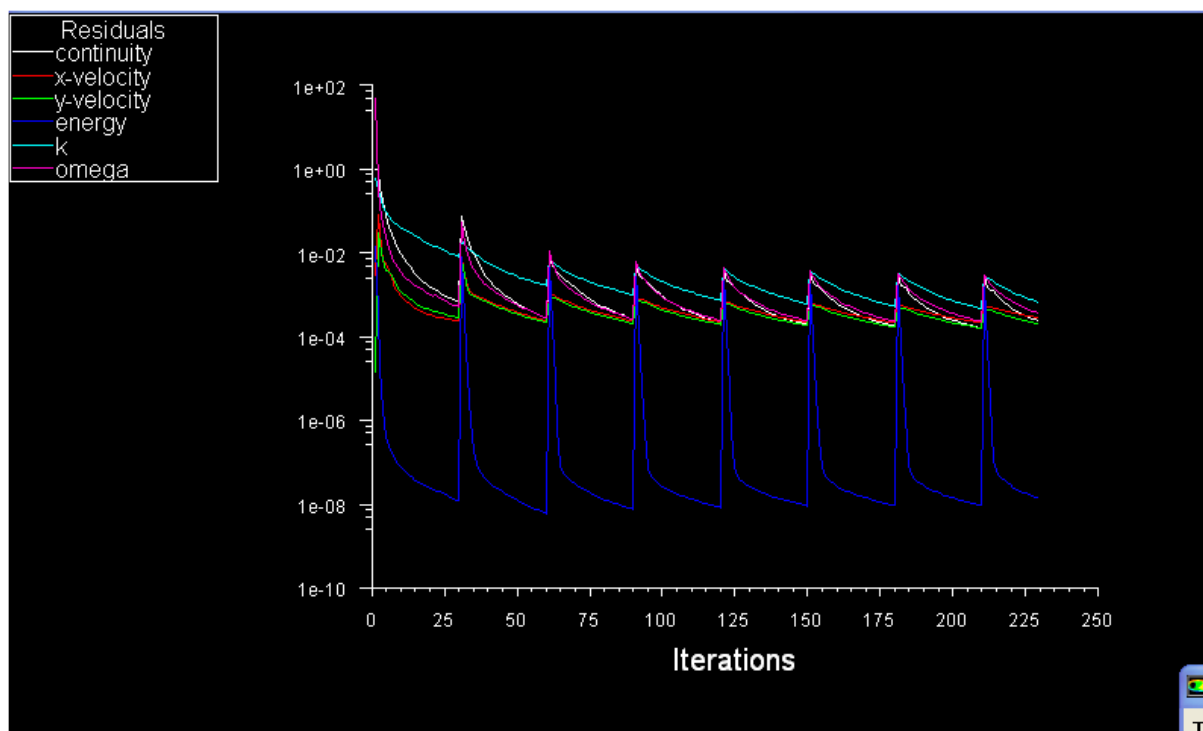


Figure 6: Allures de l'évolution des résidus de calcul.