

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

## **THÈME**

**SIMULATION NUMERIQUE DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE NON  
NEWTONIEN DANS UNE CONDUITE PRESENTANT UN  
RETRECISSEMENT DE SECTION DROITE  
-APPLICATION AU PETROLE BRUT-**

***Préparé par : Mr NTSIETE BANZOUZI Guyvy Pathorel***

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Lieu d'exercice</b>	<b>Qualité</b>
<b>N.SAD Chemloul</b>	<b>MCA</b>	<b>UIK Tiaret</b>	<b>Président</b>
<b>CHAIB Khaled</b>	<b>MCB</b>	<b>UIK Tiaret</b>	<b>Examineur</b>
<b>KARAS Abdelkader</b>	<b>MCA</b>	<b>UIK Tiaret</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2016 /2017**

## *REMERCIEMENTS*

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant, notre créateur, celui qui m'a donné la force, la santé, la détermination, le courage et de m'avoir indiqué le bon chemin afin d'accomplir ce travail.

Je ne peux pas "monter" toute seule. Je resterai reconnaissante toute ma vie à plusieurs personnes qui m'ont aidée à remettre le pied dans les moments difficiles.

Trouver les bons mots pour dire "Merci" est une chose difficile, d'autant plus dans une langue qui n'est pas sa langue maternelle.

Je tiens tout d'abord à manifester ma plus profonde et sincère reconnaissance envers mon encadreur Docteur KARAS Abdelkader, Maître de conférence « Classe A », chef d'équipe de recherche « Ecoulement et Rhéologie des fluides complexes » laboratoire de synthèse et catalyse à l'université Ibn –Khalidoun de Tiaret, pour m'avoir offert les conditions favorables et de m'avoir parfaitement guidé tout le long de la réalisation de ce travail. J'ai particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Pour tout cela, je dis merci.

Mes vifs remerciements s'adressent à Mr MEKROUSSI Saïd, responsable de la spécialité Master Energétique de Tiaret, pour Son accueil chaleureux, sa grande disponibilité, sa compréhension et son humanité.

Je tiens à exprimer mes remerciements à Monsieur N.SAD CHEMLOUL qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur CHAIB Khaled d'avoir accepté de participer au jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes profondes gratitude.

Je remercie également toutes et tous les membres du département de Génie Mécanique de l'Université Ibn-Khalidoun –Tiaret. Ce sont elles et eux qui ont dirigé mes premiers pas en mécanique et énergétique

Je souhaite remercier sincèrement les FRERES CAPUCINS, HUBERT LE BOUQUIN, RENÈ DOMINIQUE, MARIUSZ. Pour votre temps et services rendus. Je dis merci pour tout cela au plus profonds de mon être.

Je profite également de cette page pour remercier trois personnes à qui je dois beaucoup BITSINDOU –MILANDOU Ferdinand, BOUKAKA Raimond et LENVO Flore.

## *DEDICACES*

J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tous leurs efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est Venue.

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

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

A mon Père TSIETE Fernand et à ma mère MOUELO RIDELLE

A toutes la famille NTSIETE, MOUELO NDOULOU et BITSINDOU.

A Toutes Et Tous Mes Ami(E)S De La Vie, Ata Julia, Armandine ,Chabrol,Guy Mouelo Miame .Ntsiete Bantsimba ,Rodly ,Jennifer Claude,Gad ,Cruph Kinzemba,Ridel Fatoubakala Juvet, Boundzou Glec, Boukaka Carmela, Nguilili Franel, N'tchiam Chancelly, Ognami Bernold, Obembo Justin , Rumya Marcellin, Lembe,Oumar Patcha ,Mahamat Saleh,Ngoyi Posthurine,Lelou Danielle ,Ignoumba Lasmi ,Ehoula Rock,Okomba Max,Missambou Amour ,Pembe Adeline ,Beatrice Moukondo,Zopa,Amernio,Abdoulaye ,Imad,Okoulou Tom, Vanicia,Gency ,Gloria, Corine ,Michelle ,Rayane,Tsakala,Christ ,Rich ,Vagueni ,Rosine ,Reine,Riphay,Jaelle Dith,Wine Carter ,Makaya,Paclem,Leroi,Shalom,Olvier,Vanceche .

Et A Toute La Promotion 2012.

A toute la Communauté (Paroisse Sainte Madeleine) de Tiaret

A la toute la Promotion sortante 2<sup>ème</sup> Année Master Génie Mécanique Energétique 2017,

À savoir Belmouaz Samia, Messaoudi Zahia, Djeddah-Ahmed, Nacéri Khellil, Bourendja Amaria, Chaalel Nour, Loumani-Keira.

Guyvy Pathorel Ntsiete Banzouzi

---

# Sommaire

Remerciement .....	
Dédicace.....	
Résumé .....	
Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux.....	
Nomenclature.....	
Sommaire.....	
<b>Introduction Générale.....</b>	

## Chapitre I

### Introduction à la rhéologie

I.1.Introduction à la rhéologie .....	1
I.1.1. Généralité.....	1
I.1.2. Définition de la rhéologie .....	2
I.2. Propriétés rhéologiques des matériaux .....	2
I.2.1. mouvement laminaire de cisaillement .....	2
I.2.2. Contraintes de cisaillement .....	2
I.2.3. Vitesse de cisaillement.....	3
I. I.3. Notion de Viscosité .....	3
I.3.1. les coefficients de viscosité .....	3
I.3.1.1. Viscosités dynamique .....	3

---

I.3.1.2. Viscosités dynamique .....	4
I.3.2. Viscosités utilisées dans l'étude des solutions.....	4
I.3.2.1. Viscosités relative .....	4
I.3.2.2. Viscosités spécifique .....	4
I.3.2.3. Viscosités intrinsèque .....	5
I.3.3. Paramètres influençant la viscosité .....	5
I.3.3.1. La pression .....	5
I.3.3.2. La température .....	5
I.3.3.3. Pour les gaz .....	5
I.4. Principaux comportements des fluides.....	5
I.4.1. Fluides Newtoniens.....	6
I.4.2. Fluides non Newtoniens .....	6
I.4.2.1. Comportement non-newtonien sans contrainte critique (sans contrainte de seuil).....	7
I.4.2.2. Comportement non-newtonien avec contrainte critique (ou contrainte de seuil).....	9
I.4.2.3. Fluides non newtoniens dont la viscosité dépend du temps.....	11
I.4.2.4. Fluides thixotropes .....	12
I.4.2.5. Les fluides viscoélastiques.....	12
I.5. Principe et description des principaux rhéomètres.....	13
I.5.1. Rhéomètres à régime permanent.....	13
I.5.1.1. Rhéomètre de type couette.....	14
I.5.1.2. Rhéomètre de type poiseuille.....	17
I.5.1.3. viscosimètres à chute de bille .....	17
I.5.2. Rhéomètres à régime transitoire.....	18

---

I.5.2.1 Rhéomètres a fluage.....	18
I.5.2.2 Rhéomètres a relaxation.....	19
I.5.3 Rhéomètres dynamiques (ou oscillants).....	20
I.6. Conclusion.....	20

## **Chapitre II**

### **Propriétés rhéologiques du pétrole brut**

II.1.Introduction.....	21
II.2. Travaux antérieurs.....	21
II.3. Modélisation rhéologique du pétrole brut .....	23
II.3.1. Pétrole brut de la Mer du Nord.....	23
II.3.2. Pétrole Brut d’Afrique du Nord .....	27
II.3.2.1 Pétrole Brut d’Afrique du Nord Type I.....	27
II.3.2.2 Pétrole Brut d’Afrique du Nord Type II.....	29
II.4. Modélisation rhéologique du pétrole brut pour différentes température.....	30
II.4.1. Modèle d’Herschel-Bulkley.....	30
II.4.2. Modèle de Bingham.....	30
II.5. Conclusion.....	33

## **Chapitre III**

### **Etudes Des Ecoulements Et Analyses Bibliographiques**

III.3.Introduction.....	34
III.2.Notions fondamentales.....	34
III.2.1.Différents Types d’Ecoulements.....	35
III.2.1.1.Ecoulement Compressible et Incompressible.....	35

---

III.2.1.2. Écoulement à surface libre (en canal ou en conduite).....	35
III.2.1.3. Écoulement uniforme ou non uniforme .....	35
III.2.1.4. Écoulement fluvial ou torrentiel.....	35
III.2.1.5. Écoulement permanent ou non permanent.....	36
III.2.16. Ecoulement Laminaire et Turbulent.....	36
III.3. Equations Fondamentales de la dynamique des fluides.....	37
III.3.1. Equation de continuité.....	37
III.3.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement.....	38
III.4. les Travaux antérieurs.....	38
III.4.1. les écoulements des fluides non-newtoniens dans les conduites.....	38
III.4.2. les écoulements des fluides non-newtoniens dans un élargissement et dans un rétrécissement.....	41
III.4.2.1. Travaux antérieurs sur les écoulements des fluides non-newtoniens dans un élargissement .....	41
III.4.2.2. les écoulements des fluides non-newtoniens dans un rétrécissement.....	43
III.5. Conclusion.....	46

## **Chapitre IV**

### **Méthode Numérique ET Présentation DU Code DE Calcul-Fluent**

IV.1. Introduction .....	47
IV.2. Méthodes Numériques.....	47
IV.2.1. Les méthodes principales de discrétisation .....	47
IV.2.1.1 Différences finies .....	47
IV.2.1.2 Eléments finis .....	47
IV.2.1.3 Volumes finis.....	48
IV.2.2. Les différentes étapes de la mise en œuvre.....	51

---

IV.2.3. Principes des codes CFD .....	52
IV.3. Présentation du code de calcul .....	52
IV.3.1. Différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique par fluent.....	52
IV.3.2. Présentation de GAMBIT.....	53
IV.3.2.1. Choix du maillage.....	54
IV.3.2. Présentation de code FLUENT.....	55
IV.3.3. Choix des paramètres de FLUENT.....	56
IV.3.3.1. Procédure sous FLUENT.....	56
IV.3.3.2. Simple précision ou double précision .....	56
IV.3.3.3. Schémas de discrétisation.....	56
IV.3.3.4. Choix du schéma d'interpolation de la pression.....	57
IV.3.3.5. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse.....	57
IV.3.4. Forme linéaire de l'équation discrétise.....	58
IV.3.5. Sous relaxation.....	58
IV.3.6. Conditions aux limites.....	58
IV.4. Conclusion.....	59

## **Chapitre V**

### **Résultats numériques et Discussions**

V.1.Introduction.....	61
V.2.Présentation Du Cas Etudié.....	61
V.3.Hypothèse du Problème.....	62
V.3.1.Modèle Géométrique et Maillage.....	62
V.3.2.Conditions Aux Limites.....	64
V.3.3 .Résolution sur Fluent.....	65



V.4. Résultats numériques et Discussions.....	65
V.4.1. Influence des conditions géométriques.....	66
V.4.1.1. Influence du rayon de courbure R.....	66
V.4.1.2 .Influence du rapport de contraction S.....	68
V.4.1.3 : Influence de l'angle.....	71
V.4.2. Influence du paramètre rhéologique.....	73
V.4. Validation des résultats.....	74
V.5. Conclusion.....	75
<b>Conclusion Générale et Perspectives.....</b>	<b>76</b>
Bibliographie & Webographie	
Résumé	

## Liste Des Figures

Figure I.1. Rhéogramme .....	4
Figure I.2. Diagrammes caractéristiques des fluides newtoniens. ....	6
Figure I.3. Courbes d'écoulement des principales catégories des fluides sans contrainte critique.....	7
Figure I.4. Comportement d'un fluide rhéofluidifiants .....	8
Figure I.5. Comportement d'un fluide rhéoépaissant (dilatant).....	9
Figure I.6. Comportement d'un fluide de Bingham. ....	10
Figure I.7. Comportement d'un fluide de Casson. ....	10
Figure .I.8. Fluide de type Herschel-Bulkley.....	11
Figure I.9. Rhéogrammes d'un fluide thixotrope.....	12
Figure I.10. Rhéomètres rotatifs cylindriques.....	15
Figure I.11. Rhéomètres rotatifs à cône/plateau .....	16
Figure II.1. Évolution de la viscosité $\eta$ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le pétrole brut pour $\phi = 0,44$ et $T = 30$ °C.....	24
Figure II.2. Évolution de la viscosité $\eta$ en fonction de la contrainte de cisaillement $\tau$ pour le pétrole brut, pour $\phi = 0,44$ et $T = 30$ °C.....	25
Figure II.3. Évolution de la contrainte de cisaillement $\tau$ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ de pour le pétrole brut, pour $\phi = 0,44$ et $T = 30$ °C.....	25
Figure II.4. Comparaison entre les points expérimentaux et le modèle de Bingham pour le pétrole brut, pour $\phi = 0,44$ et $T = 30$ °C .....	26
Figure II.5. Comparaison entre les points expérimentaux et le modèle de Herschel-Bulkley pour le pétrole brut, pour $\phi = 0,44$ et $T = 30$ °C [15].....	27
Figure II.6. Évolution expérimentale de la contrainte de cisaillement $\tau$ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ de pour le pétrole brut d'Afrique du Nord type I.....	28
Figure II.7. Évolution expérimentale de la contrainte de cisaillement $\tau$ en fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ pour le pétrole brut d'Afrique du Nord type II.....	29

Figure II.8. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour $T=15,6^{\circ}\text{C}$ .....	31
Figure II.9. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour $T =18,33^{\circ}\text{C}$ .....	31
Figure II.10. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour $T =21,11^{\circ}\text{C}$ .....	32
Figure II.11. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour $T =23,89^{\circ}\text{C}$ .....	32
Figure III.3. Géométrie de flux dans le domaine physique pour l'expérience de Lee .....	46
Figure IV.1. Volume de contrôle bidimensionnel.....	48
Figure IV.2. Structure de base du code "FLUENT ".....	53
Figure V.1. Modèle géométrique simulé.....	62
Figure V.2. Maillage de la Géométrie.....	63
Figure V.3. Allure de l'évolution des résidus de calcul.....	65
Figure.V.4. Variation de la vitesse sur l'axe de symétrie en fonction de la position.....	66
Figure V.5 .Conteurs de vitesse pour : $\theta = 45^{\circ}$ $S=7$ et $R =30\text{mm}$ .....	67
Figure V.6.Conteurs de vitesse pour : $\theta = 45^{\circ}$ , $S=7$ et $R=60\text{mm}$ .....	67
Figure V.7 .Conteurs de vitesse pour : $\theta = 45^{\circ}$ , $S= 7$ et $R = 80 \text{ mm}$ .....	68
Figure .V.8. Profils des vitesses sur l'axe de symétrie en fonction de la position.....	69
Figure.V.9. Conteurs de pression dynamique avec : $\theta = 60^{\circ}$ , $S=3.5$ , $R=30\text{mm}$ , $S=3.5$ .....	69
Figure .V.10. Conteurs de pression dynamique avec : $\theta=60^{\circ}$ , $R=30\text{mm}$ $S=5$ .....	70
Figure.V.11. Conteurs de pression dynamique avec : $\theta = 60^{\circ}$ , $S=7$ , $R=30\text{mm}$ $S=7$ .....	70
Figure V.12. Lignes de courant pour : $S= 7$ , $R= 30 \text{ mm}$ , $\theta = 45^{\circ}$ .....	71

---

Figure .V.13.Lignes de courant : $S= 7, R= 30 \text{ mm}, \theta = 60^\circ$ .....	71
Figure .V.14.Lignes de courant : $S=7, R=60 \text{ mm}, \theta = 90^\circ$ .....	72
Figure.V.15.Variation de la vitesse en fonction de la position.....	72
Figure.V.16.Les lignes de courant pour : $S=7, R=60\text{mm}, \theta = 45^\circ n=0.7$ .....	73
Figure.V.17.Les lignes de courant pour : $S=7, R=60\text{mm}, \theta=45^\circ n=1$ .....	73
Figure.V.18. Variation de la vitesse de cisaillement en fonction de la position.....	74

**Liste Des Tableaux**

Tableau II.1. Classification des pétroles bruts selon la densité (source IFP).....	21
Tableau II.2. Valeurs expérimentaux de la viscosité, vitesse de cisaillement et de la contrainte de cisaillement du pétrole brut de la Mer du Nord.....	24
Tableau II.3. Paramètres rhéologiques du pétrole brut calculés par le modèle de Bingham [15].....	26
Tableau II.4. Paramètres rhéologiques du pétrole brut calculés par le modèle de Herschel-Bulkley [15].....	26
Tableau II.5. Valeurs de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour différentes températures pour le pétrole brut d’Afrique du Nord de Type I.....	28
Tableau II.6. Valeurs de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour différentes températures pour le pétrole brut d’Afrique du Nord de Type II.....	29
Tableau II.7. Paramètres rhéologiques de Modèle d’Herschel-Bulkley pour différentes températures du pétrole brut d’Afrique du Nord de type I.....	30
Tableau II.6. Paramètres rhéologiques de Modèle de Bingham pour différentes températures du pétrole brut d’Afrique du Nord de type I.....	30
Tableau IV.1. Récapitulatif des équations régissant l’écoulement [40].....	52
Tableau IV.2. Les différentes formes de maillage.....	54
Tableau IV.3. Description des types de maillages des faces.....	54
Tableau V.1 : Conditions aux limites appliquées pour notre modèle.....	65

## Nomenclature des symboles

### Symboles latins

a	: Hauteur minimale de la section de convergent (m)
h	: Hauteur de la section d'entrée du canal (m)
L	: Longueur (cm)
R	: Rayon (mm)
U, V	: Vitesse (m/s)
t	: Temps (s)
F	: Force (N)
S	: Surface (m <sup>2</sup> )
K	: Indice de consistance (Pa.s <sup>n</sup> )
n	: Indice d'écoulement
T	: Température (Kelvin)
g	: L'accélération due à la gravité (m/s <sup>2</sup> )
dm	: Profondeur moyenne hydraulique (m)
D	: Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m)
(S)	: Rapport de contraction
S <sub>c</sub>	: Rapport de contraction critique
u, v	: Composante de la vitesse suivant x et y
x, y	: Coordonnées cartésiennes
$\vec{f}$	: Coefficient de frottement
r	: Variable rayon (m)
C <sub>p</sub>	: Chaleur massique (J/kg K)

- $\phi$  : Propriété transportée
- $S_\phi$  : Terme source (la source de  $\phi$  par unité de volume)

### Symboles grecs.

- $\dot{\gamma}$  : Vitesse de cisaillement (1/s)
- $\tau$  : Contrainte de cisaillement (N/m<sup>2</sup>)
- $\mu_a$  : Viscosité dynamique ou apparente (kg/ms)
- $\nu$  : Viscosité Cinématique (m<sup>2</sup>/s)
- $\tau_c$  : Contrainte de seuil (Pa)
- $\mu_B$  : Viscosité plastique (de Bingham)
- $\rho$  : Masse Volumique (kg/m<sup>3</sup>)
- $\vec{\nabla}$  : Nabla
- $\theta$  : Angle de convergence
- $\lambda$  : Conductivité thermique (W/m<sup>2</sup>.k)
- $\alpha$  : Angle du cône (Radian)
- $\Gamma$  : indique le coefficient de diffusion

### Indices

- $i, j, k$  : i<sup>ème</sup>, j<sup>ème</sup> et k<sup>ème</sup> Composantes
- $e, w, n, s$  : Évalué sur la face correspondante du volume de contrôle entourant le point P
- $E, W, N, S$  : Évalué sur le point entourant le point P

### Nombres Adimensionnels

- $F$  : Nombre de Froude
- $Re$  : Nombre de Reynolds

### Abréviations

2D ,3D : Bidimensionnel, Tridimensionnel ; CFD : Computational Fluid Dynamics

GAMBIT : Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit

DAO ; Dessin Assisté par Ordinateur

VC : Volume de Contrôle



# *Introduction Générale*

La nécessité de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les écoulements de particules est d'autant plus grande qu'on rencontre les milieux dispersés dans de nombreuses applications industrielles et géophysiques. La mécanique des fluides numérique est une discipline passionnante à l'interface entre les mathématiques, physique et l'informatique, dans laquelle s'expriment différentes compétences, en permanente interaction. Les domaines d'application couvrent une large gamme de problème physique (extraction, transport, stockage) souvent gouverné par les mêmes équations.

Les études de l'effet de la viscosité et les pertes de charges lors de déplacement des fluides non-newtoniens font l'objet de plusieurs recherches ces dernières années, à cause de leurs intérêts et l'extensivité de leurs emplois et leurs applications potentiels. L'étude du comportement de cette catégorie de fluide pendant son écoulement à travers une singularité (ex. contraction brusque avec rétrécissement) présente plusieurs difficultés en raison de la complexité de ses propriétés mécaniques surtout en ce qui concerne l'étude des déformations engendrées par les contraintes de cisaillement et leurs l'influence sur l'écoulement lui-même.

L'écoulement à travers des contractions brusques à rétrécissements de section a été souvent utilisé comme un exemple complexe d'écoulement des fluides non newtoniens. Il est considéré comme un écoulement mixte à deux aspects : cisaillement et élongation.

Une grande partie de fluides complexes sont employés dans certains procédés de production industrielle : fabrication des produits alimentaires et pharmaceutiques, élaboration de produits cosmétiques, production des ingrédients ou encore extraction et transport du pétrole.

La compréhension des propriétés de l'écoulement de ces fluides reste la meilleure possibilité qui permettrait l'amélioration de ces procédés.

Le pétrole brut est l'un des produits les plus employés comme énergie, il représente le cœur de l'industrie actuelle.

Les écoulements de fluides, que ce soit en régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équation aux dérivées partielles (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes) et d'énergie qu'il convient de résoudre pour connaître les caractéristiques du champ dynamique et du champ thermique de l'écoulement.

La simulation en mécanique des fluides (CFD : Computation Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournable de conception et est largement utilisée dans l'industrie.

Les codes de simulation numérique des écoulements, ou CFD, basée sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritable (expérience numérique), lorsqu'elles sont faites avec soin. Ils résolvent les équations régissent, les mouvements laminaires et turbulents en 2 et 3 dimension. Les problèmes à résoudre peuvent être en régime stationnaire ou in stationnaire.

### **Objectifs spécifiques de la présente étude**

Le but de ce travail est de prédire numériquement le comportement l'écoulement d'un fluide non-newtonien dans une conduite présentant un rétrécissement de section droite. La simulation numérique est conduite au moyen du code Fluent.

Dans cette étude, nous déterminerons les contours de la vitesse, pression dynamique et la vitesse de cisaillement en fonction de la position pour un fluide non newtonien qui est le pétrole brut de la Mer du Nord.

Des courbes seront obtenues pour la caractérisation de l'écoulement à la traversée de la singularité (rétrécissement local brusque) et nous montrerons l'influence des conditions géométriques et celui d'un paramètre rhéologique sur ces profils.

### **Organisation de travail**

Le présent mémoire comporte cinq chapitres :

Après cette brève introduction, nous abordons dans le premier chapitre une étude consacrée au rappel de notions importantes concernant la rhéologie, les modèles existants et les propriétés rhéologiques des fluides non-newtoniens.

Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés rhéologiques du pétrole brut de l'Afrique du Nord Type I et Type II, ainsi que celui le Pétrole brut de la Mer du Nord.

Le troisième chapitre, est base sur l'Analyse Bibliographique de l'écoulement dans les conduites.

Le quatrième chapitre est dédié aux méthodes numériques et Code de Calcul à la simulation numérique modélisation sous GAMBIT et FLUENT. On y abordera les différentes étapes

passées pour modéliser le problème, depuis la création de la géométrie sous GAMBIT (préprocesseur conçu pour le maillage des configurations géométriques tridimensionnelles complexes) en passant par le paramétrage de FLUENT jusqu'à la résolution du problème.

Le dernier chapitre, c'est la partie la plus importante de ce mémoire, il comporte la simulation et l'interprétation des résultats numériques obtenus sous forme des graphes dans la configuration étudiée.

Finalement, ce mémoire sera terminé par une conclusion générale qui dresse un bilan global de ce travail et des perspectives sont présentées.

# Chapitre I

## *Introduction À La Rhéologie*

## I.1. Introduction à la rhéologie :

### I.1.1. Généralités :

La rhéologie, mot créé aux États Unis en 1929 par Eugène Cook Bing Ham (1878-1945). L'émergence de la rhéologie est liée à l'épanouissement des polymères et bien sûr la construction des premiers rhéomètres.

Étymologiquement, la rhéologie est une science qui traite de l'écoulement, des déformations, et plus généralement de la viscosité des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides. Mais dans la plupart des cas, le formateur doit traiter de problèmes qui concernent des solides pâteux ou des liquides épais. Les termes utilisés ici sont volontairement équivoques.

En effet, il faut être conscient du fait que la notion de liquide recouvre aussi bien des liquides très fluides comme l'eau, les solvants organiques, les solutions et les dispersions diluées mais aussi des substances beaucoup plus visqueuses et consistantes à l'aspect pâteux, semi solide voire même solide. Ces différences sont souvent dues à la très large gamme d'échelle de temps qui concerne le mécanisme d'écoulement. L'écoulement d'un fluide comme l'eau s'effectue instantanément sous l'effet de la pesanteur. Dans certains cas, il faudra attendre quelques heures, pour observer un début d'écoulement significatif. C'est le cas extrême des verres des vitraux des cathédrales dont l'écoulement s'opère à l'échelle des siècles.

Malgré ces différences d'échelle de temps, ce sont les mêmes lois de comportement et les mêmes grandeurs qui régissent les écoulements.

La viscosité n'est pas la seule grandeur à observer, la plupart des matériaux possèdent également des propriétés élastiques d'autant plus marquées qu'ils possèdent une organisation moléculaire complexe. La viscoélasticité étudie de concert les propriétés visqueuses et élastiques des matériaux.

Pour commencer il convient de définir le mouvement de cisaillement qui est le type de mouvement mis en œuvre en rhéologie [1].

### **I.1.2. Définition de la rhéologie :**

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, etc...) ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc. ...) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- Rhéologie expérimentale : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
- Rhéologie structurale : explication des comportements à partir de la structure du matériau.
- Rhéologie théorique : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique [1].

## **I.2. Propriétés rhéologiques des matériaux :**

### **I.2.1. mouvement laminaire de cisaillement :**

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre ; c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume.

La forme des couches dépend bien entendu de la géométrie du problème et par conséquent des conditions expérimentales. [1]

### **I.2.2. Contraintes de cisaillement :**

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre.

Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées forces de cisaillements [1].

Ces forces dépendent de la surface considérée. On est amené à définir la contrainte de cisaillement par :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (\text{I.1})$$

Ou :

$dF$  : représente la projection algébrique de  $d\vec{F}$  sur un axe orienté parallèlement au mouvement.

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau, elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche.

La contrainte de cisaillement  $\tau$  est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie.

### I.2.3. Vitesse de cisaillement :

Par définition la vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement  $\varepsilon$  ; c'est une vitesse de déformation :

$$\dot{\varepsilon}(y, t) = \frac{dv(y, t)}{dy} \quad (\text{I.2})$$

Notons que la vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  est souvent désignée par la lettre D et appelée gradient de vitesse [1].

## I.3. Notion de Viscosité :

### I.3.1. les coefficients de viscosité :

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie leur connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau, on définit différents coefficients de viscosité [2].

#### I.3.1.1. Viscosités dynamique :

Elle est définie par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} \quad (\text{I.3})$$

La viscosité dynamique s'appelle aussi viscosité apparente.



Il est clair que  $\mu$  est une fonction de la température  $T$  et de la pression  $P$  extérieures, mais aussi en général de la contrainte de cisaillement  $\tau$  ou encore selon un point de vue tout à fait équivalent de la vitesse de cisaillement  $\dot{\varepsilon}$  :

$$\begin{cases} \mu = F(T, P, \tau) \\ \mu = G(T, P, \dot{\varepsilon}) \end{cases}$$

Les rhéomètres permettent d'obtenir des courbes appelées rhéogrammes qui servent à décrire les propriétés d'écoulement du matériau.

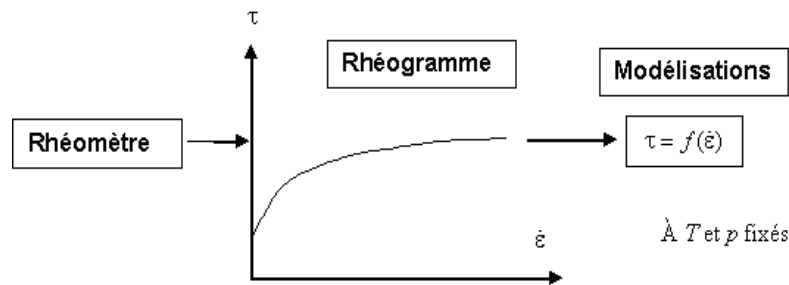


Figure I.1. Rhéogramme

C'est généralement la représentation contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement qui est utilisée mais on peut aussi trouver la représentation réciproque :  $\dot{\varepsilon} = f(\tau)$

### I.3.1.2. Viscosité cinématique :

Ce coefficient est défini par la relation :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{I.3})$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique du matériau.

### I.3.2. Viscosités utilisées dans l'étude des solutions :

#### I.3.2.1. Viscosités relative :

$$\mu_{\text{rel}} = \frac{\mu}{\mu_s} \quad (\text{I.4})$$

Où :  $\mu_s$  est la viscosité dynamique du solvant.

#### I.3.2.2. Viscosités spécifique :

$$\mu_{\text{sp}} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{\text{rel}} - 1 \quad (\text{I.5})$$

**I.3.2.3. Viscosités intrinsèque :**

$$\mu = \lim_{\substack{C \rightarrow 0 \\ \dot{\epsilon} \rightarrow 0}} \left[ \frac{\mu_{sp}}{C} \right] \quad (I.6)$$

Où :  $\mu$  et  $\mu_s$  représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution (de la dispersion) et du solvant (de la phase dispersante), et ou C représente la concentration de la solution (de la phase dispersée).

$\mu_{rel}$  et  $\mu_{sp}$  sont des grandeurs sans dimension et  $\mu$  est homogène à l'inverse d'une concentration.

**I.3.3. Paramètres influençant la viscosité :****I.3.3.1. La pression :**

- Pour les liquides : son influence est négligeable.
- Pour les gaz : si la pression augmente, il y a plus de frottements au sein du fluide, la viscosité augmente un peu.

**I.3.3.2. La température :**

La viscosité peut varier beaucoup avec la température (de l'ordre de 0.5 à 10 % par °C), Pour les liquides purs comme l'eau, l'huile, l'alcool, ...) on montre qu'elle suit une loi exponentielle croissante :  $\mu = A \exp(B / T)$ .

**I.3.3.3. Pour les gaz :**

La viscosité augmente un peu avec la température.

**I.4. Principaux comportements des fluides :**

Les fluides sont des corps dont les molécules sont très mobiles les unes par rapport aux autres. A l'état d'équilibre les contraintes dans les fluides sont toujours normales à la surface sur laquelle elles sont appliquées. Les contraintes tangentielles ne sauraient provoquer qu'un changement de forme des volumes élémentaires des corps (glissement) sans en modifier les volumes. Lorsque l'on veut déplacer un fluide les molécules de ce fluide sont liées entre elles par des forces de cohésion qui freinent leur déplacement. Cette propriété c'est la viscosité qui introduit alors la notion de fluide parfait et de fluide réel.

Chaque fluide se comporte plus ou moins différemment de point de vue rhéologique, ce qui nous mène à les classer les caractéristiques rhéologiques de chacun d'entre eux.

### I.4.1. Fluides Newtoniens :

Newton fut le premier à établir la loi de comportement de l'écoulement d'un liquide idéal appelle aussi liquide linéaire ou Newtonien.

Les fluides newtoniens montrent un comportement rhéologique proportionnel.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{I.7})$$

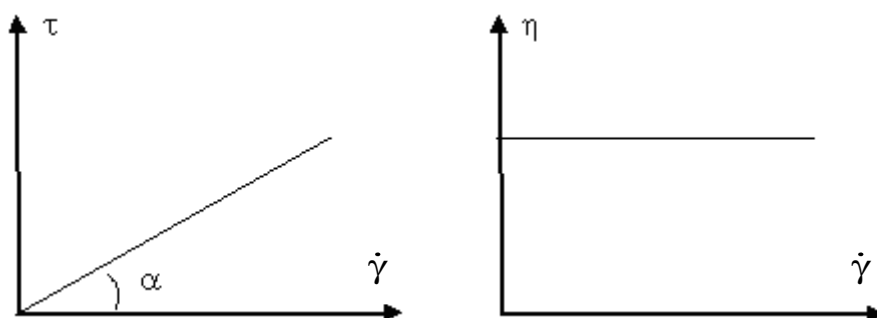
avec :

$\tau$  : La contrainte de cisaillement.

$\dot{\gamma}$  : La vitesse de cisaillement.

Le facteur de proportion  $\eta$  (la viscosité) est un constant propre à la matière.

La courbe d'écoulement d'un fluide Newtonien étant une droite, le rapport de toutes les paires des valeurs  $\tau$  et  $\dot{\gamma}$  le long de cette ligne est constant ceci dit que  $\eta$  n'est pas affectée par le changement de vitesse.



*Figure I.2. Diagrammes caractéristiques des fluides newtoniens.*

Parmi les fluides Newtoniens on peut citer (eau, Benzine, huile minérale, bitume,...etc.).

### I.4.2. Fluides non Newtoniens :

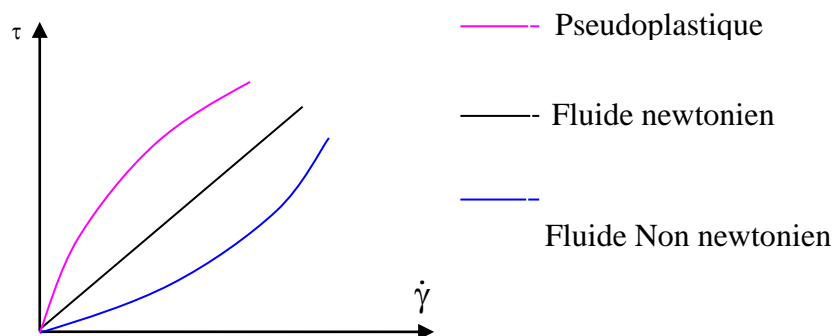
Par opposition aux fluides newtoniens, les fluides non-newtoniens sont définis comme étant des fluides pour lesquels le tenseur des extras-contraintes ne peut pas être exprimé comme étant une fonction linéaire et isotrope des composantes du tenseur des vitesses de déformation.

En particulier, pour les fluides non-newtoniens en écoulement cisailé, la relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement est non linéaire.

Du fait, que le comportement des fluides non-newtonien incompressibles ne peut être prédit par les équations de Navier Stokes, il est donc nécessaire de coupler les équations de conservation de masse et de quantité du mouvement avec une autre relation afin d'assurer la fermeture du système. Cette relation, qui est la loi de comportement ou la loi constitutive, est généralement formulée comme une relation entre les contraintes et le tenseur des taux de déformation, elle a pour but de modéliser l'effet non-newtonien du fluide [6].

#### I.4.2.1. Comportement non-newtonien sans contrainte critique (sans contrainte de seuil) :

La figure I.3 présente les courbes d'écoulement des deux principales catégories des fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides rhéofluidifiants (pseudo plastiques) et Fluides rhéo épaississants (fluides dilatants) :



*Figure I.3. Courbes d'écoulement des principales catégories des fluides sans contrainte critique. [1]*

Une première approche simple pour modéliser les fluides non-newtoniens est de généraliser le modèle newtonien en introduisant une viscosité dite "apparente" ou "équivalente" dépendante de la vitesse de déformation ou du taux de cisaillement.

Dans ce cas, où la viscosité de cisaillement n'est pas indépendante du taux de cisaillement, il est nécessaire d'utiliser des modèles pour décrire le comportement mécanique de ces fluides.

Plusieurs modèles existent, dépendant essentiellement du nombre de paramètres qu'ils comportent. On distingue par exemple, les modèles à deux paramètres (le modèle d'Oswald et Waele), ou à trois paramètres (le modèle de Carreau ou d'Ellice) [1].

## a) Comportement rhéofluidifiants (pseudo plastiques) :

La diminution de la viscosité avec l'augmentation du taux de cisaillement, (rhéofluidification), est observée pour la plupart des fluides non newtoniens, ils sont appelés fluides pseudo plastiques ou fluides rhéofluidifiants, ce comportement très répandu, s'observe sur les solutions polymères et les suspensions aqueuses, les pétroles, le latex de caoutchouc, la pâte à papier, les colles, certaines peintures, etc.

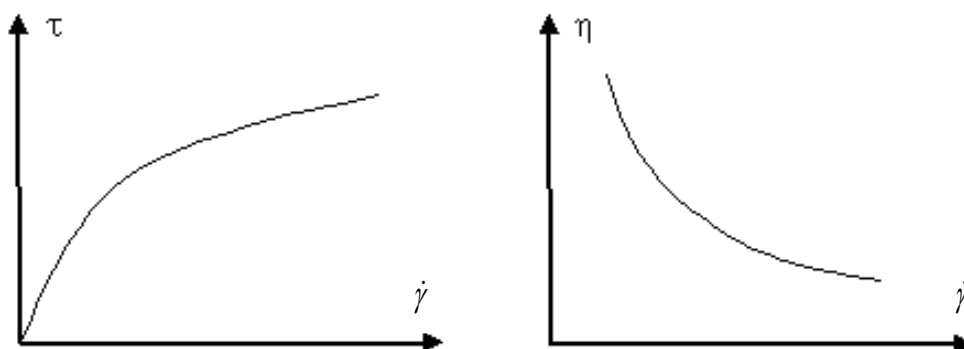


Figure I.4. Comportement d'un fluide rhéofluidifiants.

Le modèle de Waele et Ostwald a été largement utilisé de façon empirique dans l'industrie, il est donné par :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.8})$$

avec :

K : indice de consistance ou consistance,

n : indice de comportement ( $0 < n < 1$ ).

Dans le modèle d'Ostwald, la viscosité s'exprime par :

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{I.9})$$

## b) Fluides rhéoépaississants (fluides dilatants) :

Ce comportement est beaucoup moins fréquent. Il concerne des dispersions très concentrées, les solutions d'amidon, sables mouillés et compactés et certaines huiles polymériques. Certains de ce produit augmentent de volume sous la contrainte (épaississants). Les causes d'origine moléculaire sont diverses et pas toujours élucidées. On peut invoquer l'augmentation du volume libre entre les particules. Au repos, il serait minimal, sous un gradient de vitesse en augmentation, il y a gonflement du liquide (les particules sont moins

imbriquées). La phase continue n'est plus capable de combler les vides interarticulaires ni d'assurer une bonne lubrification [5].

Une équation du type équation d'Ostwald (loi de puissance):

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.10})$$

avec :  $n > 1$

On rencontre également le comportement rhéoépaississant : la viscosité augmente lorsqu'on augmente le taux de cisaillement. Dans la plupart des cas connus, le comportement rhéoépaississant n'est observé que sur une gamme limitée de taux de cisaillement, le liquide possédant également un comportement rhéofluidifiant à des taux de cisaillement plus faibles.

Par exemple, les suspensions très concentrées (au-dessus de 30% en fraction volumique) de Particules solides présentent une brusque augmentation de viscosité qui est liée à un changement important de la structure de la suspension.

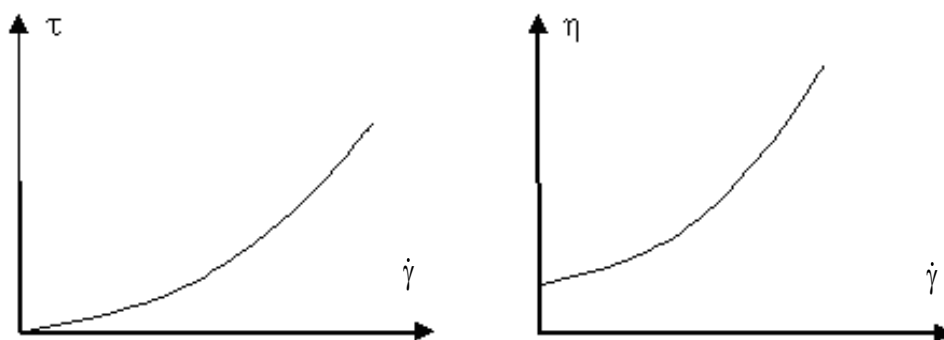


Figure I.5. Comportement d'un fluide rhéoépaississant (dilatant).

#### I.4.2.2. Comportement non-newtonien avec contrainte critique (ou contrainte de seuil ):

**Fluides plastiques :** Ce dernier terme indique qu'ils s'écoulent à partir d'une certaine valeur de contrainte  $\tau_{sl}$ , au repos le liquide possède une structure tridimensionnelle rigide (particules emboîtées) ou floculées. Le seuil d'écoulement correspond à l'énergie nécessaire pour les séparer. Au-delà, l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective  $(\tau - \tau_{sl})$ .

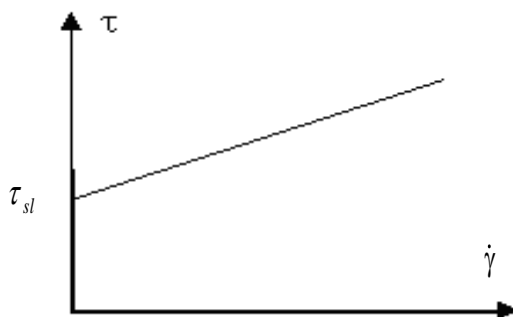
On distingue deux types de liquides plastiques :

##### a) Comportement d'un fluide plastique idéal (fluide de Bingham) :

La représentation la plus simple des fluides rhéostatiques ou fluides à seuil, est le modèle de Bingham, qui donne la relation entre la contrainte  $\tau$  et le taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  sous la forme suivante :

$$\tau - \tau_{sl} = \eta_p \dot{\gamma} \quad (\text{I.11})$$

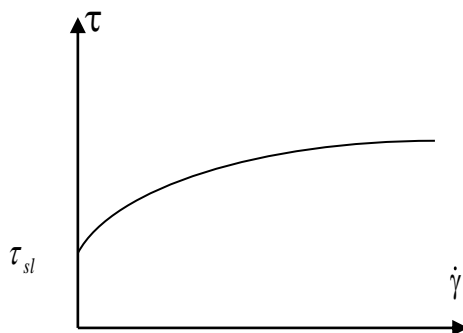
avec :  $\eta_p$  est la viscosité plastique



*Figure I.6. Comportement d'un fluide de Bingham.*

#### b) Comportement d'un fluide plastique non idéal (fluide de casson) :

Ce sont des liquides plastiques non idéaux qui possèdent un comportement plastique fluidifiant.



*Figure I.7. Comportement d'un fluide de Casson.*

Ce cas est plus répandu que les liquides de Bingham.

Exemples : boues, pâte dentifrice, sulfate de zinc ou de baryum en suspension, pâte à pain, matières grasses, peintures dispersion.

Modèle de Casson:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_{sl}} + \sqrt{\eta_p \dot{\gamma}} \quad (\text{I.12})$$

### c) Modèle d'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. Avec les fluides de Herschel-Bulkley on rencontre la juxtaposition, en trois étapes, d'une contrainte critique, d'une loi d'Ostwald puis d'une loi newtonienne. Récapitulons les trois phases. La première est donc liée à l'existence d'une contrainte critique, la seconde correspond à une loi en puissance : on y retrouve la consistance  $K$  et un indice de structure  $n$  qui peut être inférieur ou supérieur à 1, comme dans la loi d'Ostwald. Enfin, à partir d'une valeur de la contrainte, le comportement devient newtonien, comme dans les fluides de Bingham [3].

Les propriétés de type Herschel-Bulkley se rencontrent principalement dans des solutions de polymères. L'équation rhéologique de ce modèle est donnée par la formule suivante :

$$\tau = \tau_{sl} + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{I.13})$$

Avec :

- $\tau_c$  : Contrainte critique (Pa)
- $K$  : Indice de consistance ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )
- $n$  : Indice d'écoulement

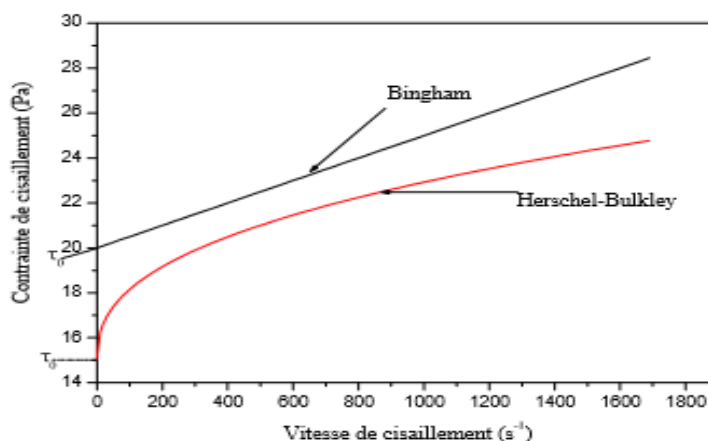


Figure 1.8 : Fluide de type Herschel-Bulkley

#### I.4.2.3. Fluides non newtoniens dont la viscosité dépend du temps :

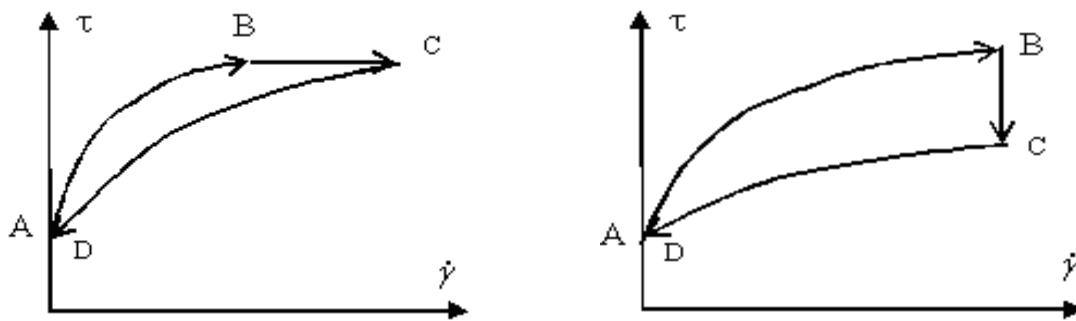
Une peinture ou un vernis à ongle doivent posséder une faible viscosité à fort cisaillement afin de pouvoir être étalés facilement. Par contre, elle doit retrouver rapidement une forte viscosité dès que la contrainte s'annule afin d'éviter les coulures... mais pas trop



rapidement si l'on veut un effet tendu. Cela impose de connaître un temps caractéristiques  $t_c$  de la cinétique de restructuration, comparativement au temps d'observation  $t_E$ . Le rapport  $t_c/t_E$  s'appelle le nombre de Déborah (De) ou encore le nombre de Weissenberg (We) [1].

#### I.4.2.4 .Fluides thixotropes :

De nombreux matériaux présentent des phénomènes d'hystérésis. Tout se passe comme si les contraintes subies dans un passé relativement récent modifiaient leur comportement à l'écoulement présent. Mais ils ne seront considérés comme thixotropes que s'ils retrouvent les propriétés initiales. Cela se traduit par des rhéogrammes qui présentent un cycle d'hystérésis.



a): rhéogramme enregistré par un Rhéomètre à contrainte imposée.

b): rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée.

**Figure I.9.** Rhéogrammes d'un fluide thixotrope.

Cet exemple montre un fluide qui voit sa viscosité décroître sous l'augmentation de la vitesse de cisaillement (AB). Sous l'effet d'une contrainte constante, la viscosité continue à diminuer (BC). L'effet destructurant est retardé. Il s'ensuit que la descente en contrainte se fait sous une viscosité plus faible. Le fait d'observer que les points A et D sont confondus permet d'affirmer que l'on a affaire à un matériau thixotrope [5].

#### I.4.2.5. Les fluides viscoélastiques :

Un autre comportement non-newtonien très important est le caractère viscoélastique, très fréquent dans les suspensions, les solutions de polymères et dans les polymères fondus.

Nous allons dans ce qui suit, présenter une étude détaillée sur les fluides non-newtoniens présentant ce caractère et qui sont appelés fluides viscoélastiques [1].

##### a) Description phénoménologique des fluides viscoélastiques :

Un fluide viscoélastique est un fluide qui possède à la fois des propriétés de viscosité et d'élasticité. Ainsi, un fluide viscoélastique soumis à une déformation donnée, présente une

réponse intermédiaire entre celle d'un solide hookéen classique purement élastique, pour lequel la contrainte est proportionnelle à la déformation, et celle d'un fluide newtonien classique purement visqueux caractérisé par une contrainte proportionnelle à la vitesse de déformation.

b) les de représentation des fluides viscoélastiques :

Plusieurs modèles ont été élaborés pour représenter les effets de la viscoélasticité, le modèle le plus simple de fluide viscoélastique consiste à additionner les contraintes d'origine élastique et les contraintes d'origine visqueuse.

$$\tau = \tau_{\text{elast}} + \tau_{\text{visq}} = E\gamma + \eta\dot{\gamma} \quad (\text{I.14})$$

Où :  $E$  est le module d'élasticité.

### I.5. Principe et description des principaux rhéomètres :

Les rhéomètres peuvent être classés en trois catégories :

- 1- Les rhéomètres à régime permanent : utilisés comme viscosimètres, ils permettent néanmoins d'obtenir des rhéogrammes pour des liquides.
- 2- Les rhéomètres à régime transitoire permettent l'étude de la viscoélasticité des matériaux.
- 3- Les rhéomètres dynamiques qui fonctionnent en régime sinusoïdal forcé sont sûrement ceux qui fournissent le plus de renseignements des matériaux.

Il faut noter que certains rhéomètres, à condition de leur adjoindre des équipements accessoires, sont susceptibles de fonctionner aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire ou dynamique ; il en est ainsi de la plupart des rhéomètres de type couette nous avons cependant choisi d'introduire séparément les trois types possibles de fonctionnement, afin de présenter de façon claire et distincte les principes et équations d'utilisation [4].

#### I.5.1. Rhéomètres a régime permanent :

Dans ces rhéomètres la substance étudiée à un mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps, les différentes couches s'écoulent sans que vitesse et contrainte de cisaillement ne subissent aucune modification au cours du temps.

L'utilisation de tels rhéomètres se réduit donc à l'étude des seules substances possédant le comportement liquide capables par conséquent de suivre un processus d'écoulement permanent, l'objectif expérimental recherché étant la détermination de leur rhéogrammes.

Dans cette catégorie, nous distinguerons essentiellement deux types de rhéomètres :

- Les rhéomètres de type couette dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solide, l'une au repos l'autre mobile.
- Les rhéomètres de type poiseuille dans lesquels le mouvement de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par l'action de la pesanteur.

Nous présenterons également le viscosimètre à chute de bille dont les possibilités sont limitées, mais qui est cependant très connu et relativement utilisé [4].

### **I.5.1.1. Rhéomètre de type couette :**

#### a) Rhéomètres plans à translation :

La substance à étudier est placée entre deux plans solides parallèles et de même surface  $S$ .  $P_1$  et  $P_2$  : Une force  $\vec{F}$  constante est appliquée tangentiellement au plan mobile  $P_2$  lui communiquant un mouvement de translation parallèle à lui-même de vitesse  $\vec{v}_0$  le plan  $P_1$  demeurant fixe.

Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré si l'on suppose que la distance « e » entre les plans est faible devant les dimensions linéaires de la surface  $S$  des plans, on pourra admettre, en négligeant les effets de bord, que l'écoulement possède la symétrie plane et matériau se décompose en plans parallèles aux surfaces  $P_1$  et  $P_2$  animés de vitesses distinctes qui se répartissent continûment de  $\vec{v}_0$  (vitesse de la couche au contact de  $P_2$ ) à 0 (vitesse de la couche au contact de  $P_1$ )

Les rhéomètres plans sont peu nombreux ; ils sont souvent peu précis et, de ce fait, utilisés surtout pour des contrôles grossiers. On peut les classer en deux catégories :

- appareils à lames, qui sont utilisés pour la mesure de viscosités de 1 à  $3 \cdot 10^3$  Pa.s ;
- appareils à plaques, pour la mesure de viscosités comprises entre 10 et  $10^{10}$  Pa.s ;

#### b) Rhéomètres rotatifs cylindriques :

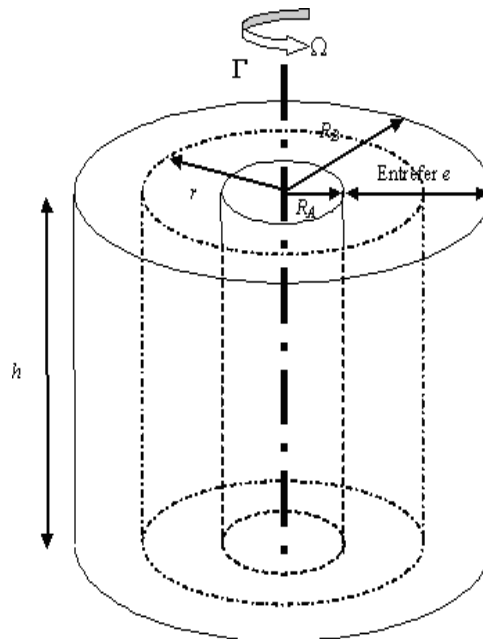
C'est la classe de rhéomètres la plus fréquemment utilisée. C'est pourquoi nous avons tenté d'en faire une présentation aussi complète que possible ; et cela d'autant plus que le fonctionnement de tels rhéomètres étant le plus souvent automatisé, la plupart des manipulateurs connaissent mal le principe, les équations, les limites de fonctionnement de ce

type d'appareils : cette méconnaissance peut déboucher sur une utilisation erronée ou de graves erreurs d'interprétation.

La substance étudiée emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux de rayons  $R_1$  et  $R_2$  et de hauteur  $h$ . Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesses angulaires  $\omega_0$ , l'autre cylindre demeurant immobile, notons que l'on rencontre des rhéomètres cylindriques dans lesquels le cylindre mobile est intérieur ou au contraire extérieur. Pour fixer les idées. Nous avons choisi de décrire ici un rhéomètre avec cylindre intérieur fixe, cylindre extérieur mobile.

La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre intérieur fixe) à  $\omega_0$  (pour la couche en contact avec le cylindre extérieur mobile).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement  $\tau$ .



**Figure I.10.** Rhéomètres rotatifs cylindriques.

c) Rhéomètres rotatifs à cône/plateau :

Bien que moins répandu que le rhéomètre cylindrique ce type de rhéomètre possède de très grandes qualités qui font de lui un concurrent et un complément indispensable au rhéomètre cylindrique.

La substance étudiée est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution de rayon  $R$ , dont l'axe est perpendiculaire au plan de plateau et dont le sommet est situé sur le plateau. L'angle  $\Psi$  que fait la génératrice du cône et le plateau est petit il est toujours inférieur à  $5^\circ$  et peut descendre jusqu'à  $0,3^\circ$ .

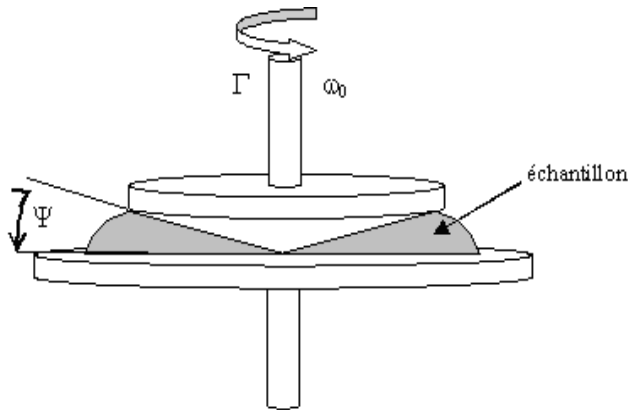


Figure I.11. Rhéomètres rotatifs à cône/plateau.

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenue en communiquant au cône une vitesse de rotation constante  $\omega_0$ , le plateau demeurant fixe la substance se décompose alors en couches, qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et de même axe que le cône solide animées de vitesses angulaires de rotation différente, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cône solide).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement  $\varepsilon$  et une contrainte de cisaillement  $\tau$ . On rencontre indifféremment les deux procédures expérimentales suivantes :

On peut imposer au cône :

- soit un couple de rotation connue  $M$  ; on mesure alors la vitesse angulaire  $\varepsilon$  correspondante.
- soit une vitesse angulaire de rotation  $\omega_0$  donnée on mesure alors le couple de rotation  $M$  correspondant.

Il est nécessaire de connaître les relations qui existent entre  $\varepsilon, \tau$  et les quantités accessibles expérimentalement à savoir  $\omega_0$  et  $M$ .

### I.5.1.2. Rhéomètre de type poiseuille :

Cette classe de rhéomètres, de mise en œuvre relativement simple, est utilisée surtout comme viscosimètres pour des mesures rapides de la viscosité absolue de liquides newtoniens.

Dans ce type de rhéomètre, le mouvement est engendré en imposant une différence de pression entre deux extrémités d'un tube cylindrique de faible section circulaire, dans lequel est contenue la substance.

La différence de pressions tend à entraîner dans un mouvement d'ensemble le matériau, dans des pressions. Ce mouvement d'ensemble est contrarié par le frottement exercé par les parois du tube sur la couche de substance directement au contact, si bien que le matériau se décompose en couches cylindriques coaxiales (de même axe que l'axe du tube). animées de vitesses différentes, la couche limite demeurant au repos.

Les rhéomètres type poiseuille fonctionnent parfois en position verticale. A la force de pesanteur qui est souvent suffisante pour provoquer l'écoulement, on peut surajouter une différence de pression aux extrémités de tube : nous établirons les équations de fonctionnement dans ce cas, très général, ou l'écoulement, vertical, est obtenu par la conjonction de l'action de la pesanteur et d'un gradient de pression. Nous distinguerons les différentes couches cylindriques du matériau par leur distance  $r$  à l'axe du cylindre. Nous noterons  $\tau(r)$  et  $\varepsilon(r)$  les contraintes et vitesses de cisaillement. Nous utiliserons d'autre part un axe vertical  $Oz$  orienté vers le haut pour repérer les hauteurs dans le tube cylindrique.

### I.5.1.3 viscosimètres à chute de bille :

Il est sans doute nécessaire d'achever cette première partie consacrée à l'étude des rhéomètres permanents par une présentation rapide du principe de fonctionnement du viscosimètre à chute de bille d'un emploi commode et rapide autre fois très répandu bien que ses possibilités soient très limitées il ne permet en effet l'étude que de liquides rigoureusement newtoniens.

Son principe de fonctionnement est très simple une sphère solide rigide, de rayon  $R$  et de masse volumique  $\rho_s$  tombe l'effet de la gravité dans le liquide newtonien étudié de masse volumique  $\rho$  et de coefficient de viscosité  $\eta$ .

Lorsque le régime permanent est atteint, la sphère a acquis une vitesse limite constante et la somme algébrique des forces est nulle :

$$6\pi\eta Rv = \frac{4}{3}R^3(\rho_s - \rho)g \quad (\text{I.15})$$

Soit encore:

$$\eta = \frac{2}{9v}gR^2(\rho_s - \rho) \quad (\text{I.16})$$

On voit, d'après cette relation, qu'il suffit pour déterminer  $\eta$  de mesure la vitesse limite de chute de la sphère.

### I.5.2. Rhéomètres à régime transitoire :

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires, aussi bien solide que liquide. Dans de tels rhéomètres on soumet l'échantillon à une sollicitation instantanée qui est maintenue constante et l'on étudie son comportement dans les instant qui suivent pendant un certain intervalle de temps qui précède l'établissement d'un régime permanent, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps : l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

Il existe deux types de rhéomètres transitoires :

- les rhéomètres à fluage.
- les rhéomètres à relaxation.

#### I.5.2.1 Rhéomètres a fluage :

Le fluage est une expérience au cours de laquelle une contrainte d'amplitude constante  $\varepsilon$  est appliquée à l'échantillon étudié à partir de l'instant initial  $t = 0$ .

La déformation de cisaillement correspondante  $\varepsilon(t)$  est mesurée pour un matériau linéaire, on peut alors déduire la fonction fluage  $f(t)$  :

$$f(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\tau} \quad (\text{I.17})$$

La connaissance de cette fonction fluage permet la détermination des propriétés viscoélastiques du matériau.

Un rhéomètre à fluage est donc capable :

- d'imposer à un instant donné une contrainte constante  $\varepsilon$  connue
- de mesurer la déformation de cisaillement correspondant  $\varepsilon(t)$  et d'en suivre l'évolution dans le temps.

Nous nous limiterons à la présentation des rhéomètres à fluage les plus répandus ce sont les rhéomètres rotatifs : cylindrique, à cône/plateau et a plateau/plateau.

Leur principe de fonctionnement est le suivant on applique à l'instant initial  $t=0$  un couple constant  $M$  au cylindre extérieur, au cône, ou au plateau supérieur, et l'on enregistre graphiquement la variation correspondante de l'angle de rotation  $\varnothing(t)$  du cylindre, du cône ou du plateau au cours du temps,  $M$  et  $\varnothing(t)$  sont donc les données expérimentales.

Comme nous venons de le voir, un rhéomètre transitoire à fluage doit être capable d'imposer au matériau des contraintes suffisamment faibles pour qu'il ait un comportement linéaire par voie de conséquence, il doit être capable de mesurer des angles de rotation  $\varnothing(t)$  extrêmement petits les appareils perfectionnés, munis d'enregistreur graphique suffisamment sensible, sont capables d'apprécier une rotation d'angle  $10^{-5}$  radians (ce qui correspond à exténuement sophistiqué et par conséquent très coûteux. Ce type de rhéomètre est essentiellement destiné à étudier le comportement viscoélastique linéaire du matériau par l'analyse de sa fonction fluage  $f(t)$  et la déduction des paramètres caractériseront son élasticité instantanée et retardée.

### **I.5.2.2 Rhéomètres a relaxation :**

Traditionnellement une expérience de relaxation consiste à soumettre l'échantillon au repos à une déformation instantanée qu'on maintient constante et à enregistrer l'évolution des contraintes au cours du temps, l'analyse de la fonction relaxation fournit le spectre des temps de relaxation, ainsi que les modules de rigidité associés à chaque élément de Maxwell du modèle de Maxwell généralisé représentatif.

Il existe ainsi une dualité parfaite entre les expérience de fluage et de relaxation, l'échelon de contrainte étant remplacé par un échelon de déformation alors que les expériences de fluage ne peuvent être mises en œuvre que par des rhéomètres pilotes en contrainte, il faut faire appel à des rhéomètres pilotés en déformation pour réaliser les tests de relaxation, ces deux modes de pilotage étant exclusifs l'un de l'autre.

Les tests de relaxation présentent le même type d'avantages et de limites que les tests de fluage, en particulier :

- la facilité d'analyse pour un spectre de temps de relaxation discret, réduit et nettement différencié.
- La difficulté d'analyse dans le cas d'une distribution rapproché ou continue.
- L'impossibilité de caractériser les petits "temps" de relaxation.



### **I.5.3 Rhéomètres dynamiques (ou oscillants) :**

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps.

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

- Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquences ou à une seule fréquence particulière (rhéomètres résonants).
- Les rhéomètres à oscillations libres qui permettent de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

Pour des raisons de simplicité, nous présentons ces rhéomètres dans le cas où les forces appliquées imposent des mouvements de translation, dans la pratique, on rencontre assez souvent le cas où un couple induit un mouvement de rotation. La théorie étant très comparable, seuls les résultats seront donnés.

## **I.6. Conclusion :**

De nombreuses lois (modèles) phénoménologiques ont été élaborées, dans la rhéologie des fluides, à partir de l'empirisme, dont chaque fluide (newtonien ou non-newtonien) a son modèle mathématique. Afin de déterminer les paramètres d'un fluide (viscosité, indice de comportement, consistance du matériau,...etc.), et pour caractériser leur comportement, en trouvant une relation entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse s'approchant le plus possible de la courbe expérimentale.

On distingue deux types fondamentaux de comportement des fluides non newtonien :

- Comportement indépendant du temps, qui se décompose de sa part en deux types, l'un ne possède pas une contrainte critique (contrainte de seuil) lors de l'écoulement et l'autre ne s'écoule pas sans que la contrainte de cisaillement soit au-dessus de la contrainte critique.
- Comportement dépendant du temps, c'est-à-dire le facteur temps intervient dans l'empirisme quant à les modèles mathématiques.

On peut dire que la viscosité des fluides c'est un paramètre de base il faut prendre en considération, pour déterminer les différents types de comportements rhéologiques.

# Chapitre II

## *Propriétés Rhéologiques Du Pétrole Brut*

## II.1.Introduction :

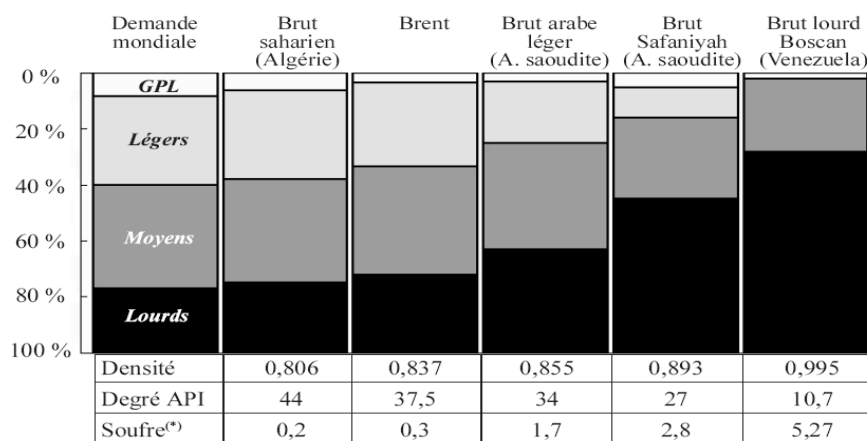
Le pétrole brut est un fluide constitué principalement d'hydrocarbures ; il contient également des composés organiques soufrés, oxygénés et azotés. On le rencontre dans les bassins sédimentaires, où il occupe les vides de roches poreuses appelées réservoirs.

On emploie le pétrole comme matière première dans l'industrie chimique et dans la production de carburants. Le pétrole et ses dérivés sont utilisés dans la production de médicaments, de produits agrochimiques et alimentaires, de matières plastiques, de matériaux de construction, de peintures et de fibres synthétiques, de détergents et de caoutchouc, ainsi que dans la production électrique.

## II.2. Travaux antérieurs :

Ujile Y.et Jingu H. [7] ont classé les huiles brutes en fonction de leur teneur en hydrocarbures et/ou de leurs propriétés physiques. Ils ont considéré que la densité est un critère important de qualité des pétroles bruts car elle constitue une indication sur les rendements des coupes pétrolières en raffinerie. Ils ont pu ainsi classer les bruts en cinq types, selon le tableau suivant:

**Tableau II.1.** Classification des pétroles bruts selon la densité (source IFP)



Note : Teneur en % du poids.

Sources : CEG-IFP, juillet 2000 et ENSPM Formation Industrie.

**La gravité °API** (mesurée en degrés) : La mesure de la gravité °API est une approche de la densité du pétrole à une température de 15°C qui s'obtient d'après le calcul suivant:

$$^{\circ}\text{API} = (141,5 / \text{densité relative}) - 131,5$$

Où la densité relative est le rapport de la densité du pétrole sur la densité de l'eau.

La gravité °API de l'eau est arbitrairement fixée à 10 degrés.

---

Plus la densité d'un pétrole n'est faible, plus sa gravité °API est élevée.

**Gourlay C.** [8] a montré que le pétrole brut est un mélange très complexe de composés organiques. Les principales familles de composés sont les hydrocarbures saturés, les aromatiques, les résines et les asphaltènes. Ces familles comportent des n-alcanes, mais aussi des iso-alcanes et des cyclo-alcanes.

**Rouichi S.** [9] a présenté une étude concernant les huiles brutes qui peuvent être caractérisées par leurs propriétés globales ou par les classes moléculaires qui les composent. Il existe deux sortes de classification des pétroles bruts : classification des géochimistes et classification des raffineurs. Ces classifications ont été faites en tenant compte de leur origine, de leur histoire géologique, et de leur maturité ou d'autres paramètres géochimiques.

**Aycard M.** [10] a exprimé que l'estimation de la distance parcourue par le pétrole est difficile, elle est fonction de plusieurs facteurs : la nature du pétrole, les caractéristiques physiques et lithologiques du réservoir, et l'histoire sédimentaire du bassin. La distance parcourue peut être courte (de l'ordre du kilomètre) si les hydrocarbures rencontrent un obstacle et peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres. La direction de la migration du pétrole par rapport à la roche mère peut être verticale, latérale ou les deux à la fois.

**Moiseeva L. S. et Aisin A. E.** [11] ont testé un modèle numérique pour diminuer la corrosion des pipe-lines dans un champ pétrolifère. Ils ont validé leur modèle par des expériences et, ce pour différentes concentrations de l'émulsion. Ils ont obtenu des résultats prometteurs pour les systèmes de protection des pipe-lines, améliorant ainsi leur sécurité.

**Aomari N., Gaudu R., Cabioch F. et Omari A.** [12] ont étudié, du point de vue rhéologique, l'eau de mer dans les émulsions de pétrole brut. Ils ont mis en évidence, d'une part, un taux critique de la teneur en eau et, d'autre part, le taux de fraction maximum de volume (0,63-0,64). Ce taux critique traduit le contact physique entre les gouttelettes d'eau.

**Vinay Guillaume, Wachs Anthony et Agassant Jean-François** [13] ont examiné, par simulation numérique, l'écoulement du pétrole brut riche en cire qui peut être considéré comme étant un fluide viscoplastique. Les conditions de la température externe créent des problèmes de transport d'un tel fluide dans les pipe-lines. Pour modéliser l'influence de cette température, ils ont utilisé le modèle rhéologie de Bingham qui dépend des contraintes de cisaillements et de la température. Ce modèle obtenu par la méthode des éléments finis a donné des bons résultats.

**Meriem Benziane M., et autres** [14] ont modélisé l'écoulement du pétrole brut avec le modèle Phan-Thien et Tanner Modifié (MPTT), ce modèle est considéré dans cette étude pour un écoulement axisymétrique dans un conduit. Le calcul des contraintes de cisaillement avec ce modèle est un pas important parce qu'il permet d'étudier en conséquence quelques phénomènes importants tels que la corrosion ou la chute de pression qui est contrôlée par le coefficient de frottement dans le cas d'écoulements turbulents. Les calculs concernent différents cas de pétrole brut et les résultats obtenus sont confrontés à des données expérimentales.

### **II.3. Modélisation rhéologique du pétrole brut :**

#### **II.3.1. Pétrole brut de la Mer du Nord :**

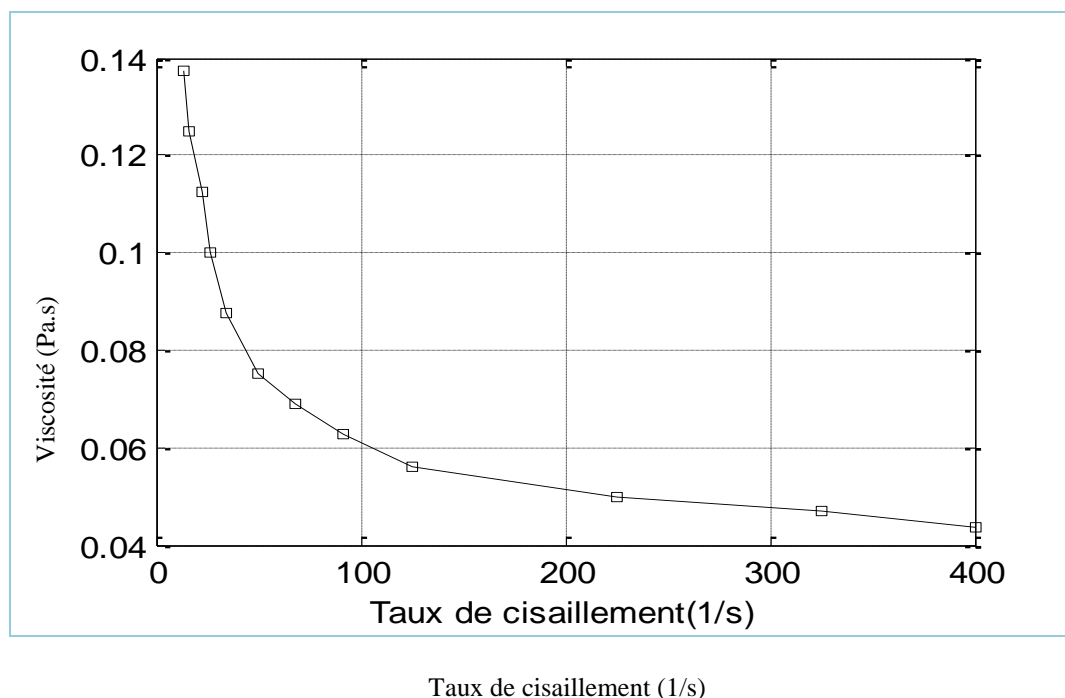
Dans ce chapitre, on s'est basé sur des résultats expérimentaux qui donnent la courbe rhéologique du pétrole brut de la Mer du Nord [16]. Partant de là, on se propose de faire le point sur les caractéristiques rhéologiques du pétrole brut et sur les différentes méthodes utilisées pour les déterminer. Ces caractéristiques sont importantes à connaître puisqu'elles entrent dans les calculs de dimensionnement des installations de pompage et des pipe-lines.

Tout d'abord, il faut noter que les propriétés rhéologiques d'un pétrole brut varient fortement avec sa température [16]. Dans ce qui suit, on fera le point autour des caractéristiques rhéologiques du pétrole brut et les méthodes utilisées pour les déterminer puisqu'elles rentrent dans les calculs des installations de pompage et de transport du pétrole brut.

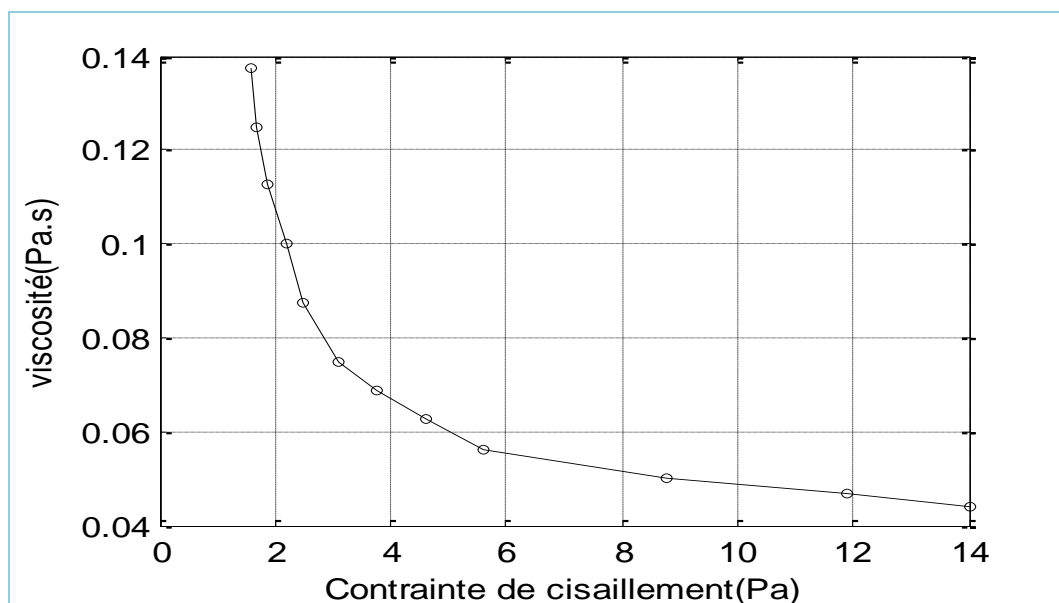
Les expériences, qui ont été faites sur le pétrole brut de la Mer du Nord à l'aide d'un rhéomètre (tableau II.1), sont représentées par les rhéogrammes suivantes : la viscosité ( $\eta$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) (Figure. II.1), la viscosité ( $\eta$ ) en fonction de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) (Figure.II.2) et la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) pour  $\phi = 0,44$  à  $30^\circ\text{C}$  (Figure. II.3).

**Tableau II.2.** Valeurs expérimentaux de la viscosité, vitesse de cisaillement et de la contrainte de cisaillement du pétrole brut de la Mer du Nord..

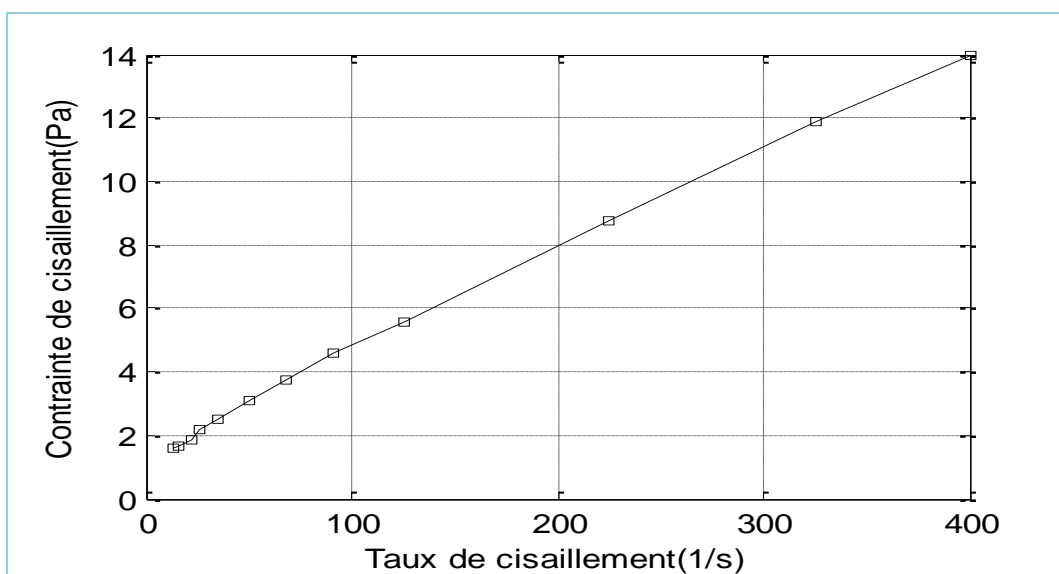
Viscosité (Pa.s)	Vitesse de cisaillement (1/s)	Contrainte de cisaillement (Pa)
0,13750	14.00	1,6000
0,12500	16,50	1,6600
0,11250	22,50	1,8750
0,10000	26.00	2,1875
0,08750	35.00	2,5000
0,07500	50.00	3,1000
0,06875	68,75	3,7500
0,06250	91,50	4,6000
0,05625	125.00	5,6000
0,05000	225.00	8,7500
0,04687	325.00	11,9000
0,04375	400.00	14.0000



**Figure II.1.** Évolution de la viscosité  $\eta$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour le pétrole brut pour  $\phi = 0,44$  et  $T = 30$  °C.



**Figure II.2.** Évolution de la viscosité  $\eta$  en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  pour le pétrole brut, pour  $\phi = 0,44$  et  $T = 30$  °C.



**Figure II.3.** Évolution de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  de pour le pétrole brut, pour  $\phi = 0,44$  et  $T = 30$  °C.

On peut remarquer que le pétrole brut étudié est un fluide non newtonien avec une contrainte de seuil. Il peut être donc représenté par des modèles tels que ceux de Bingham et Herschel-Bulkley.

Le calcul des caractéristiques rhéologiques a pour but de déterminer par quel modèle, Herschel-Bulkley ou Bingham, le pétrole brut étudié sera le mieux représenté.

L'utilisation de la méthode des moindres carrés, permet d'obtenir les résultats suivants :

**Tableau II.3.** Paramètres rhéologiques du pétrole brut calculés par le modèle de Bingham [15].

$\tau_c$ (Pa)	n	$\eta_p$ (Pa.s)
1.37	1	0.0322

**Tableau II.4.** Paramètres rhéologiques du pétrole brut calculés par le modèle de Herschel-Bulkley [15]

$\tau_c$ (Pa)	n	K (Pa.s <sup>n</sup> )
0.85	0.86	0.076

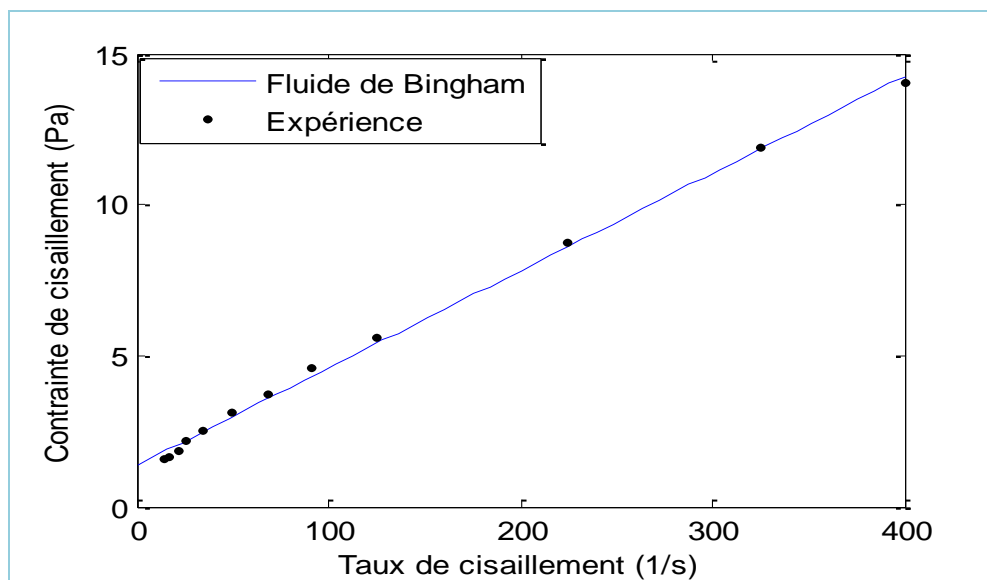
- Le modèle de Herschel-Bulkley, s'écrit :

$$\tau = 0.85 + 0.076 \dot{\gamma}^{0.86} \quad (\text{II.1})$$

- le modèle de Bingham, s'écrit :

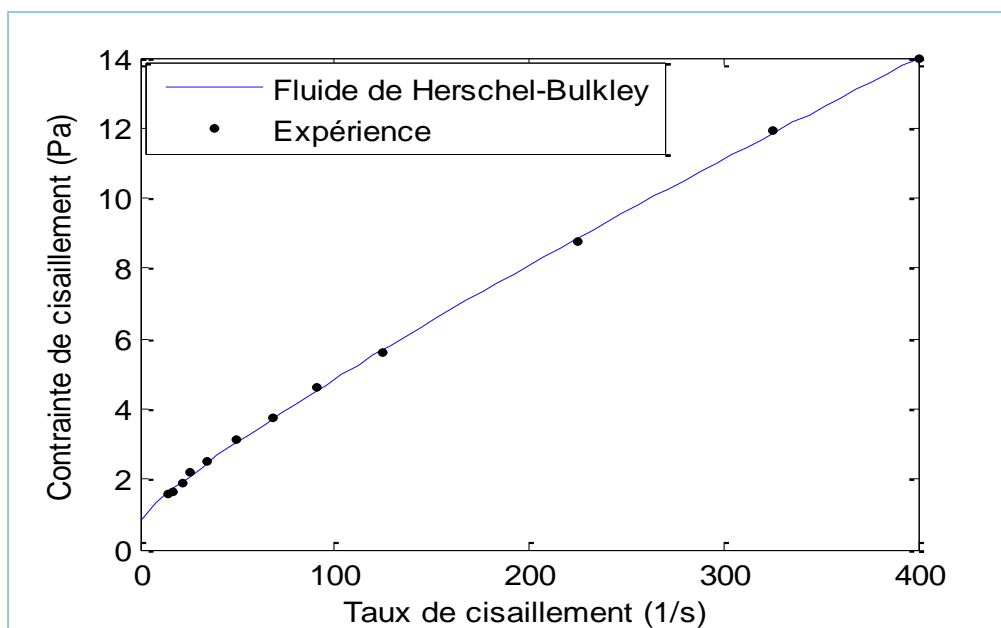
$$\tau = 1.37 + 0.0322 \dot{\gamma} \quad (\text{II.2})$$

A partir de ces données, nous traçons les différents rhéogrammes afin de conclure quel est celui qui est le plus représentatif, le plus près de la réalité.



**Figure II.4.** Comparaison entre les points expérimentaux et le modèle de Bingham pour le pétrole brut, pour  $\phi = 0,44$  et  $T = 30$  °C





*Figure II.5. Comparaison entre les points expérimentaux et le modèle de Herschel-Bulkley pour le pétrole brut, pour  $\phi = 0,44$  et  $T = 30$  °C [15]*

D'après les deux courbes qui représentent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour les deux modèles, on conclut que les propriétés rhéologiques du pétrole brut étudié sont convenablement représentées par le modèle de Herschel-Bulkley.

### **II.3.2. Pétrole Brut d'Afrique du Nord :**

#### **II.3.2.1 Pétrole Brut d'Afrique du Nord Type I :**

Le tableau (II.4), représente les résultats expérimentaux de pétrole brut d'Afrique du Nord type I, et qui donne la variation de la contrainte de cisaillement et, le taux de cisaillement, en fonction de la température [15].

Tableau II.5. Valeurs de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour différentes températures pour le pétrole brut d'Afrique du Nord de Type I.

Température 15,56°C (60°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	9,7	11	14	17,2	20	23	26,7	32,5	34,5	36,5
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	2	9	27	48	73	100	136	200	225	240
Température 18,33°C (65°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	2,3	3,5	5,5	7,2	9,5	12	14,7	19,7	21,2	21,6
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	2	10	25	42	70,5	100	134	200	225	233
Température 21,11°C (70°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	1,2	2,5	3,8	5,3	6,6	8,1	9,7	10,8	11,6	12
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	10	25	43,5	73	100	138,5	175	200	225	237,5
Température 23,88°C (75°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	0,6	0,7	1	1,5	2,5	3,5	4,7	6,2	7	7,4
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	2	10	25	43,5	73	100	141	200	225	242

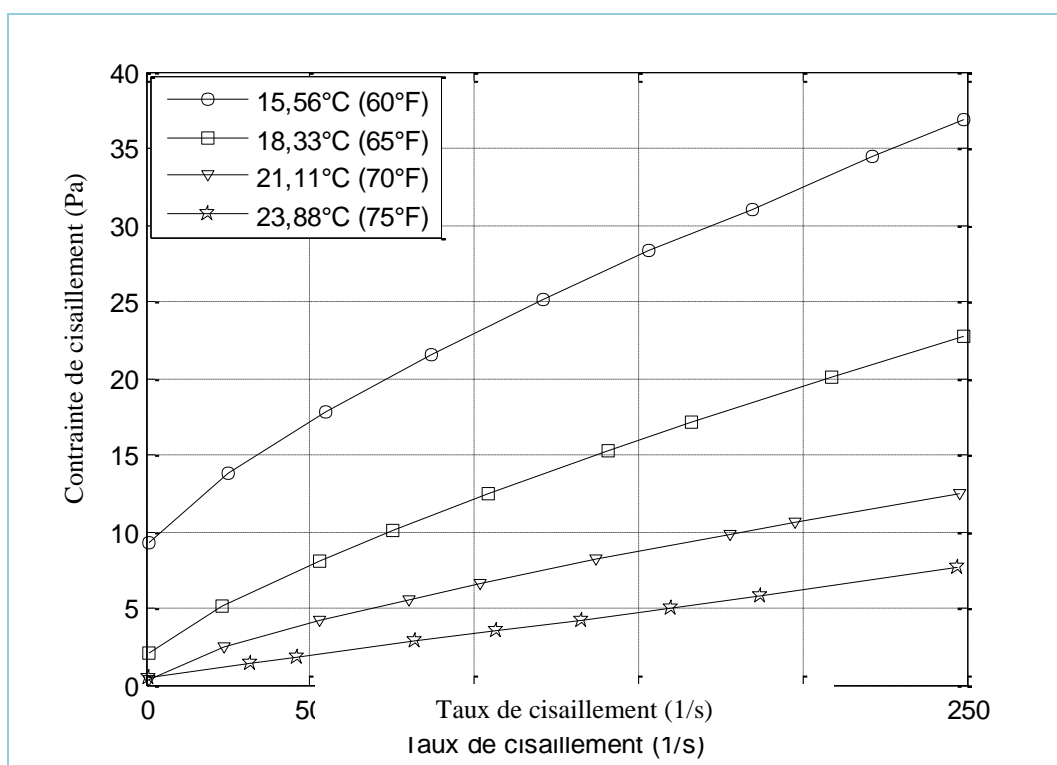


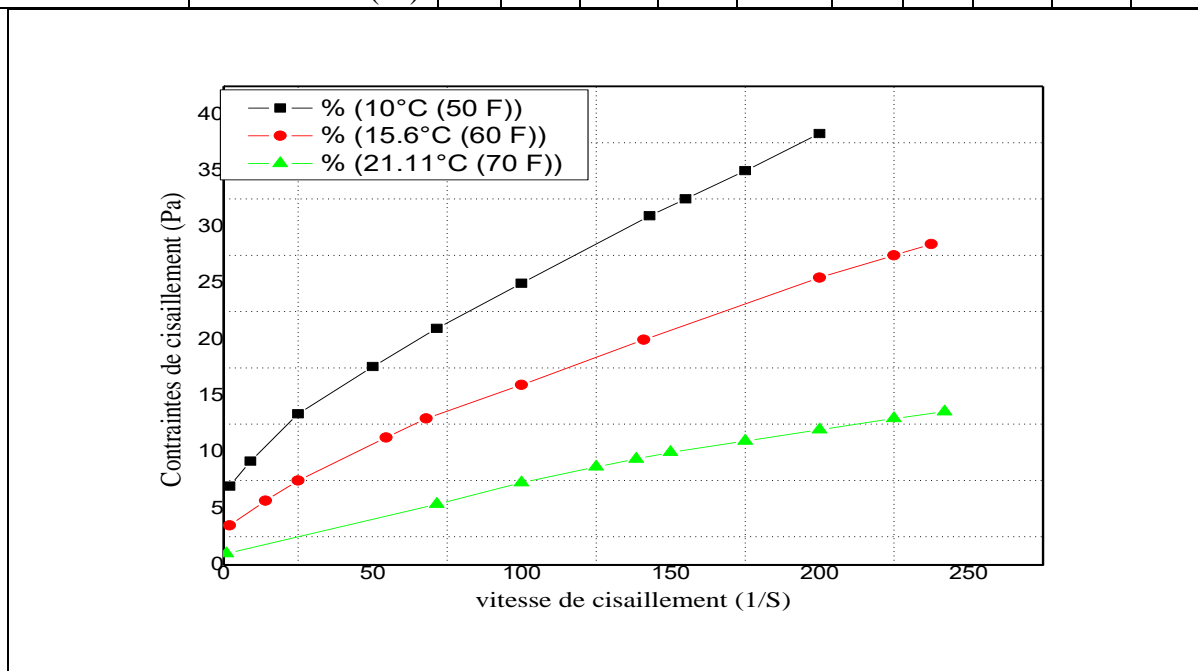
Figure II.6. Évolution expérimentale de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  de pour le pétrole brut d'Afrique du Nord type I.

### I.3.2.2 Pétrole Brut d'Afrique du Nord Type II :

Le tableau (II.5), représente les résultats expérimentaux de pétrole brut d'Afrique du Nord type I, et qui donne la variation de la contrainte de cisaillement et, le taux de cisaillement, en fonction de la température [15].

**Tableau II.6.** Valeurs de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement pour différentes températures pour le pétrole brut d'Afrique du Nord de Type I I.

Température 10°C (50°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	7	9,2	13,4	17,6	21	25	31	32,5	35	38,5
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	2	9	25	50	71,5	100	143	155	175	200
Température 15.5°C (60°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	3,5	5,7	7,5	11,3	13	16	20	25,5	27,5	28,5
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	2	14	25	54,5	68	100	141	200	225	237,5
Température 21,11°C (70°F)	Contraintes de cisaillement (Pa)	1	5,4	7,3	8,7	9,4	10	11	12	13	13,6
	Vitesse de cisaillement (s <sup>-1</sup> )	0,9	71,5	100	125	138,5	150	175	200	225	242



**Figure II.7.** Évolution expérimentale de la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  pour le pétrole brut d'Afrique du Nord type II.

## II.4. Modélisation rhéologique du pétrole brut pour différentes température

Dans cette partie de l'étude, nous nous proposons de modéliser le comportement rhéologique du pétrole brut pour différentes valeurs de température en utilisant deux lois de comportement qui donnent la variation de la contrainte de cisaillement en fonction la vitesse de cisaillement. Pour ce faire, nous avons choisi deux modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham.

En utilisant les résultats expérimentaux de [15], qui donne la variation de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour différentes valeurs de température du pétrole brut nous obtenons les résultats suivants:

### II.4.1. Modèle d'Herschel-Bulkley :

*Tableau II.7. Paramètres rhéologiques de Modèle d'Herschel-Bulkley pour différentes températures du pétrole brut d'Afrique du Nord de type I.*

Température (T)	l'indice de comportement (n)	Contrainte de seuil ( $\tau_c$ )	Coefficient de consistance (K)
15,56°C (60°F)	0.75	8.8125	0.4467
21,11°C (70°F)	0.78	1.8319	0.2830
21,11°C (70°F)	0.71	0.6505	0.2470
23,89°C (75°F)	0.99	0.4192	0.0305

### II.4.2. Modèle de Bingham :

*Tableau II.6. Paramètres rhéologiques de Modèle de Bingham pour différentes températures du pétrole brut d'Afrique du Nord de type I.*

Température (T)	l'indice de comportement (n)	Contrainte de seuil ( $\tau_c$ )	Viscosité plastique. ( $\eta_p$ )
15,56°C (60°F)	1	11.1482	0.1075
21,11°C (70°F)	1	3.3519	0.0812
21,11°C (70°F)	1	1.3096	0.0474
23,89°C (75°F)	1	0.4390	0.0289

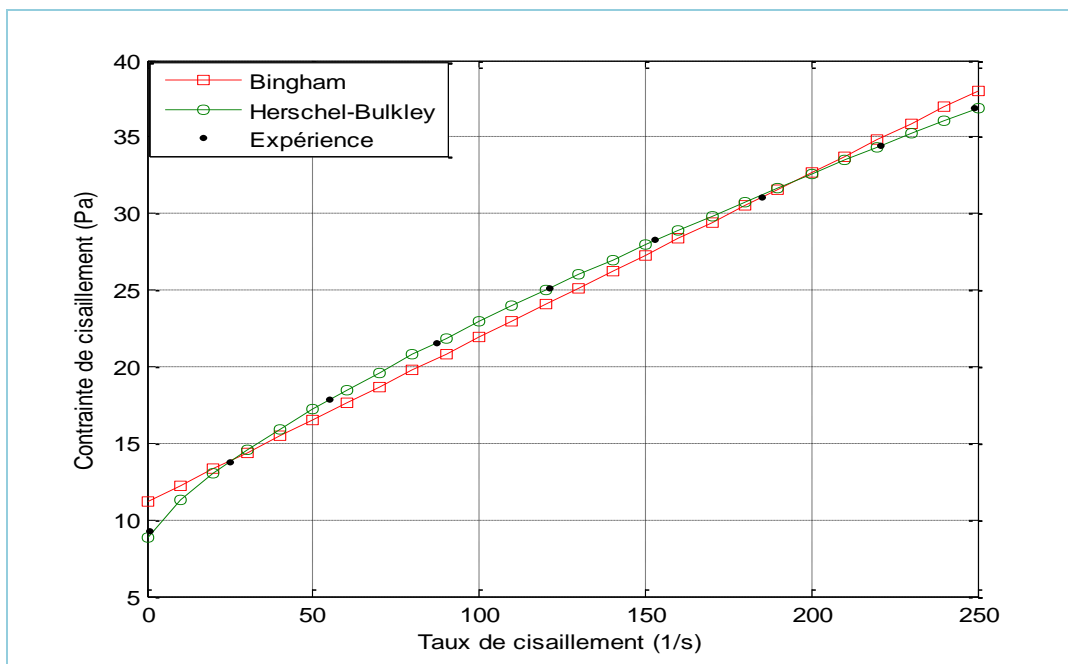


Figure II.8. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contraite de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour  $T=15,6^{\circ}\text{C}$ .

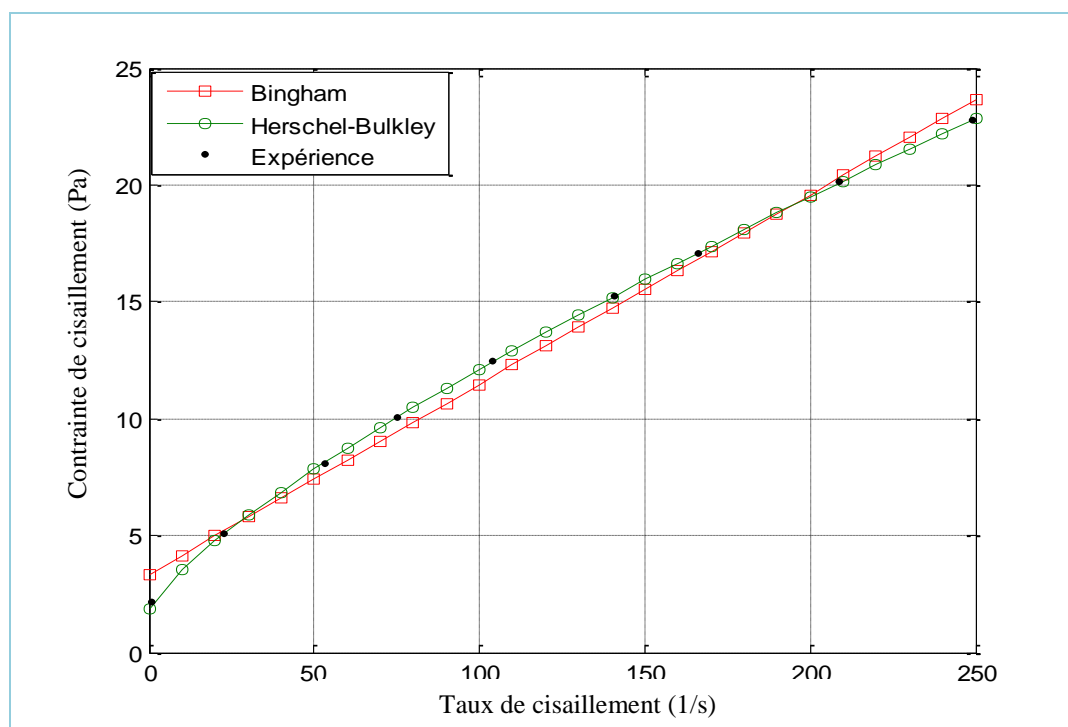


Figure II.9. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contraite de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour  $T=18,33^{\circ}\text{C}$ .

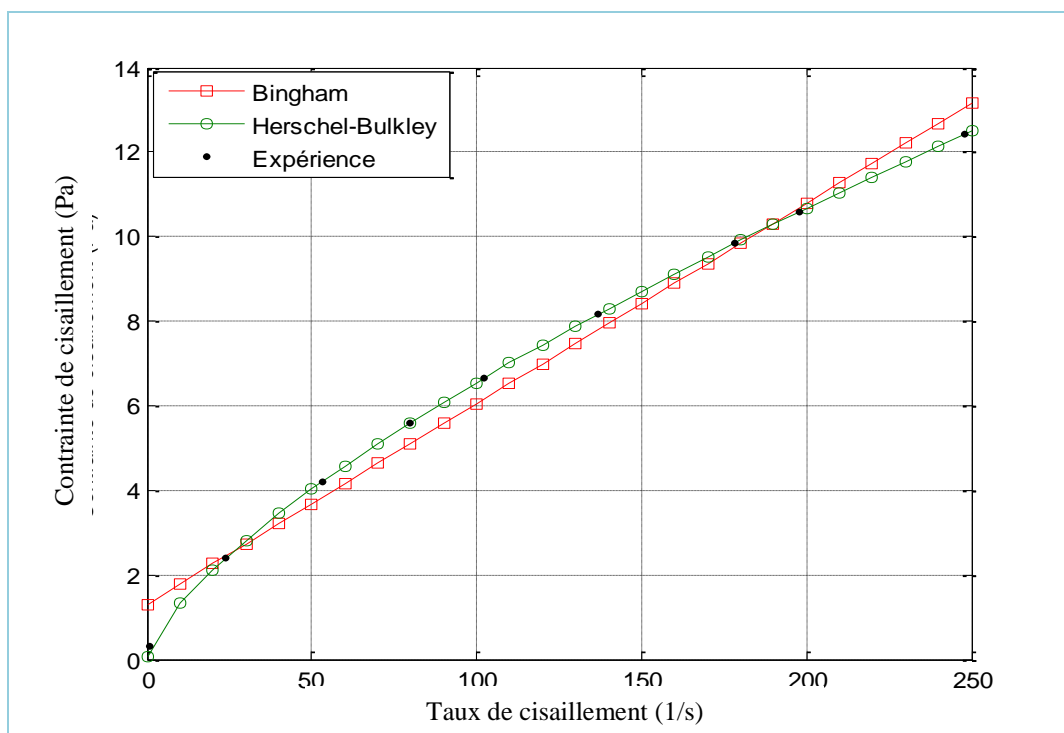


Figure II.10. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour  $T = 21,11^{\circ}\text{C}$ .

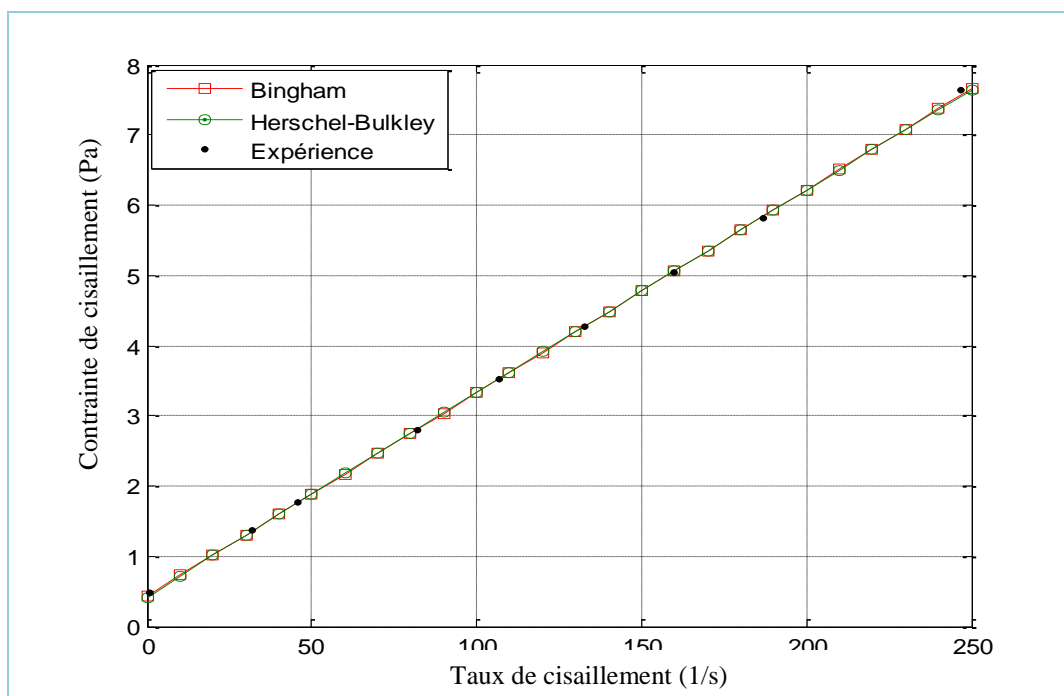


Figure II.11. Comparaison des modèles d'Herschel-Bulkley et de Bingham, avec des données expérimentales, de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement du pétrole brut de l'Afrique du Nord de type I pour  $T = 23,89^{\circ}\text{C}$ .

D'après les courbes et les tableaux ci-dessus, la modélisation rhéologique du pétrole brut montre que le modèle de Bingham n'est valable que pour les cas où :

- il existe une contrainte de seuil,
- la viscosité est constante et,
- les taux de cisaillement sont élevés.

De même, l'application d'autre modèle rhéologique tel que celui de Herschel-Bulkley a montré une bonne concordance avec des résultats expérimentaux [15].

## **II.5. Conclusion :**

La modélisation rhéologique du pétrole brut montre que le modèle de Bingham n'est valable que pour le cas d'un fluide à contrainte de seuil, de viscosité constante et où les taux de cisaillement sont élevés. L'application d'un autre modèle rhéologique tel que celui de Herschel-Bulkley au pétrole brut étudié nous a donné de meilleurs résultats par rapport à la réalité expérimentale.

# Chapitre III

*Etudes Des Ecoulements Et  
Analyses Bibliographiques*



### **III.1. Introduction :**

La nécessité de mieux comprendre les mécanismes qui régissent les écoulements de particules est d'autant plus grande qu'on rencontre les milieux dispersés dans de nombreuses applications industrielles et géophysiques.

L'écoulement à travers des contractions brusques (élargissement ou rétrécissement), dans lequel un fluide s'écoule à travers une conduite de grande section en passant par une contraction vers une conduite de petite section, brusques a été souvent utilisé comme un exemple complexe d'écoulement des fluides non newtoniens. Il est considéré comme un écoulement mixte à deux aspects : cisaillement et élongation [17].

Cela a été le sujet de nombreuses études avec des fluides non-newtoniens. En raison de sa grande utilité pour comprendre une variété de phénomènes qui existent dans beaucoup d'applications de l'ingénierie, telles que le dimensionnement des échangeurs de chaleur et des conduites de transport utilisant les produits industrielles et agroalimentaires, c'est aussi un problème de base classique utilisé dans les calculs de la rhéologie.

Le présent travail porte principalement sur l'étude des écoulements et sur l'analyse bibliographique ainsi que les écoulements des fluides non-newtoniens dans les conduites, les élargissements, et dans les rétrécissements.

### **III.2. Notions fondamentales :**

Dans la vie quotidienne, dans la nature et dans le domaine industriel, les écoulements sont toujours présents. La circulation de l'oxygène dans notre organisme est l'un des exemples de l'importance de l'écoulement dans la vie humaine. Les tsunamis, les cyclones ou les coulées de lave sont aussi des exemples de l'écoulement mais qui conduisent quelquefois à de grands dégâts pour l'humanité.

A part le critère physique qui distingue écoulements compressibles et incompressibles, ainsi qu'écoulements visqueux et non visqueux, il existe d'autres critères qui distinguent les écoulements de fluides.

### **III.2.1. Différents Types d'Écoulements :**

#### **III.2.1.1. Écoulement Compressible et Incompressible :**

Ce qui différencie un écoulement compressible d'un écoulement incompressible, c'est le fait que des petites variations de masse volumique, de pression et de vitesse se propagent à l'intérieur du fluide à une vitesse qui est la célérité du son dans le milieu considéré [3].

Autrement dit un fluide est appelé compressible si les changements de la densité du fluide ont des effets significatifs sur l'ensemble de la solution. Un écoulement est dit incompressible si la masse volumique du fluide ne varie pas lors de l'écoulement.

#### **III.2.1.2. Écoulement à surface libre (en canal ou en conduite) :**

Un écoulement libre comme dans un canal naturel ou un fossé n'est pas totalement confiné ; en conduite, l'écoulement est dit en surface libre lorsque les niveaux d'eau n'atteignent pas la pleine hauteur de la canalisation. D'un autre côté, on peut également avoir avec une conduite un écoulement partiellement plein ou plein. Dans le premier cas, l'analyse est similaire à un écoulement à surface libre. Dans le cas d'un écoulement plein, l'écoulement est confiné sans une surface libre et on dit alors qu'il se fait sous pression ou en charge [18].

#### **III.2.1.3. Écoulement uniforme ou non uniforme :**

Un écoulement est dit uniforme lorsque le débit, la profondeur d'eau et la vitesse sont constants avec la distance ; Dans ce type d'écoulement, les forces causant cet écoulement sont balancées par la force de friction causée par l'effort de cisaillement aux surfaces de contact. La profondeur d'eau correspondant à un écoulement uniforme s'appelle la profondeur normale. Par opposition, un écoulement est non uniforme lorsque les mêmes paramètres (débit, vitesse et profondeur d'eau) varient avec la distance [18].

#### **III.2.1.4. Écoulement fluvial ou torrentiel :**

L'écoulement peut finalement être défini en fonction du nombre de Froude, qui représente le niveau d'énergie contenu dans l'écoulement lui-même. Un écoulement fluvial, caractérisé par des vitesses faibles et de plus grandes profondeurs d'eau, se produit lorsque le nombre de Froude est inférieur à 1. Par opposition, un écoulement torrentiel se produira dans

une canalisation avec une forte pente et avec un nombre de Froude supérieur à 1. L'écoulement lorsque le nombre de Froude est égal à 1 est dit critique

Ces forces dépendent de la surface considérée. On est amené à définir la contrainte de cisaillement par :

$$F = \frac{V}{(gd_m)^{1/2}} \quad (\text{III.1})$$

Où :

F : représente le Nombre de Froude ;

V : est la vitesse moyenne dans la section d'écoulement ;

g : est l'accélération due à la gravité (9,81 m/s<sup>2</sup>) et d<sub>m</sub> est la profondeur moyenne hydraulique [18].

### III.2.1.5. Écoulement permanent ou non permanent :

Un régime d'écoulement est dit permanent ou stationnaire quand les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique...), ont une valeur constante au cours du temps. L'écoulement d'un fluide est dit non permanent si la vitesse et la pression en un point donné de ce fluide en mouvement varie en fonction du temps [19].

### III.2.16. Ecoulement Laminaire et Turbulent :

Les expériences réalisées par Reynolds en 1883 lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : régime laminaire et régime turbulent

- Régime laminaire : Les filets fluides sont des lignes régulières, sensiblement parallèles entre elles.
- Régime turbulent : Les filets fluides s'enchevêtrent, s'enroulent sur eux-mêmes.

Des études plus fines ont montré qu'il existe encore une subdivision entre :

- les écoulements turbulents lisses
- les écoulements turbulents rugueux.

La limite entre ces différents types d'écoulements est évidemment difficile à appréhender. En utilisant divers fluides à viscosités différentes, en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer

si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds donné par l'expression suivante [20] :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (\text{III.2})$$

Où : U Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s)

D : Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m)

$\nu$  : Viscosité cinématique du fluide en (m<sup>2</sup>/s)

- Si  $2000 < Re$  l'écoulement est laminaire
- Si  $2000 > Re$  l'écoulement est turbulent
- Lisse si  $2000 < Re < 1000000$
- Rugueux si  $Re > 1000000$  [20].

### III.3. Equations Fondamentales de la dynamique des fluides :

En mécanique des fluides en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de la conservation qui sont:

- Loi de conservation de la masse ou l'équation de continuité.
- Deuxième loi de Newton (principe de conservation de quantité de mouvement) ou les équations de quantité de mouvement.
- Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou l'équation d'énergie.

#### III.3.1. Equation de continuité :

C'est l'équation qui s'exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivant [20].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(U \rho) = 0 \quad (\text{III.3})$$

Où :  $\rho$  est la masse volumique

### III.3.2. Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenue dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquée [20].

Il s'écrit sous la forme suivant :

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial(\mu \delta_{ij})}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad (\text{III.4})$$

Où : P est la pression;

$\delta$  est le tenseur des vitesses de déformation ;

F est la force volumique.

## III.4. les Travaux antérieurs :

### III.4.1. les écoulements des fluides non-newtoniens dans les conduites :

**B. S. Ridley et R. J. Poole (2007)** : Nous présentés les résultats d'une étude numérique détaillée et systématique du développement d'écoulements de tubes de fluides non-newtoniens inélastiques obéissant au modèle power-Law. Et nous démontre qu'un choix judicieux du nombre de Reynolds permet à la longueur de développement à un nombre de Reynolds élevé de s'affaisser sur une seule courbe (c'est-à-dire indépendante de l'indice de puissance n). De plus, à des nombres de Reynolds faibles, ils montrent que la longueur de développement est, contrairement aux résultats existants dans la littérature, une fonction de l'indice de pouvoir-loi. En utilisant une modification simple à la corrélation récemment proposée pour les écoulements de fluides newtoniens [22].

**Adélio S. Cavadas, Fernando T. Pinho, João B.L.M. Campos (2008)** : ont effectués une étude sur le débit de fluides non newtoniens dans des jets d'impage confinés par des murs de planage. Une étude expérimentale a été menée pour caractériser le champ d'écoulement dans un jet d'impact liquide confiné par des parois planes et émanant d'un conduit rectangulaire pour divers fluides non newtoniens. Ces jets sont fréquemment trouvés

dans des procédés dans les industries alimentaires et pharmaceutiques et ils se forment lorsqu'un fluide à grande vitesse frappe une surface solide conduisant à des niveaux intenses de transfert de chaleur et de masse. Le travail expérimental est complété par les résultats d'une étude numérique pour les fluides purement visqueux. Ce travail poursuit des recherches antérieures, Cavadas et al (2006), sur la même géométrie de flux pour les fluides newtoniens dans les régimes de flux laminaire et turbulent [23].

**Fu-Shu Wu et Karsten Pruess (1998)** : ont développés une Méthode numérique pour simuler un écoulement et un déplacement de fluide non newtonien dans des milieux poreux. Dans de nombreux systèmes souterrains, le flux et le déplacement de fluides non newtoniens dans les milieux poreux sont liés à des projets souterrains de récupération et de stockage des ressources naturelles, ainsi qu'à des projets d'assainissement environnemental. Une compréhension approfondie de l'écoulement de fluide non newtonien à travers des milieux poreux est d'une importance fondamentale dans ces applications d'ingénierie. Pour l'écoulement de fluide non newtonien à travers des milieux poreux, les équations gouvernantes deviennent non linéaires, même dans des conditions d'écoulement monophasées, car la viscosité effective pour le fluide non-newtonien est une fonction hautement non linéaire de la vitesse de cisaillement ou de la vitesse des pores. La solution à de tels problèmes ne peut en général être obtenue que par des méthodes numériques [24].

**Bekir Sami Yilbas, Muhammet Yürüsoy et Mehmet Pakdemirli (2004)** : Effectuent une analyse d'entropie pour le débit de fluide non newtonien dans un tuyau annulaire: Cas de viscosité constante. La solution analytique pour les champs de vitesse et de température est présentée alors que la génération d'entropie due au frottement du fluide et au transfert de chaleur est formulée. Le fluide de troisième classe à propriétés constantes est pris en compte dans l'analyse. On constate que la réduction du paramètre non newtonien augmente l'amplitude maximale de vitesse et la température maximale dans le tuyau annulaire. Le nombre de génération d'entropie totale atteint des valeurs élevées dans la région proche de la paroi interne du tuyau annulaire, ce qui devient significatif pour des paramètres non néon-giens faibles. L'augmentation du nombre de Brinkman améliore le nombre de génération d'entropie, en particulier dans la région proche de la paroi interne du tube annulaire [25].

**Alouche. (2000), Wielage-Burchard et Frigaard (2013)** : ont étudié le flot de déplacement du fluide de Bingham par un autre fluide dans un canal plan. Lorsque le doigt pénètre à l'intérieur du canal, une couche résiduelle statique du fluide déplacé est laissée derrière le doigt. Ils ont étudié l'épaisseur de cette couche résiduelle pour différents nombres de Bingham et ont comparé leurs résultats avec ceux obtenus en utilisant l'approximation de lubrification. C'est une tâche difficile de traiter numériquement le comportement viscoplastique du fluide, car le problème devient singulier dans la région de flux de la vitesse de dégradation. La complexité de la discontinuité du modèle de Changhome augmente car la surface de rendement n'est pas connue a priori mais doit être déterminée en tant que partie de la solution. En général, on utilise des méthodes de régularisation de la viscosité pour surmonter cette difficulté [26].

**T.G. Myers, J. Low (2014)** : Ont réalisé une modélisation de la solidification d'un fluide de la loi de puissance passant par une conduite étroite. En développant un modèle mathématique pour simuler le processus de solidification d'un fluide de loi de puissance non-Newtonien passant par un microcanal de section transversale circulaire. Le système initial se compose de trois équations différentielles partielles, décrivant le fluide de fluide et la température dans le liquide et le solide, qui sont résolus sur un domaine spécifié par la condition de Stefan. Ceci est réduit à la résolution d'un système partiellement couplé constitué d'une seule équation différentielle partielle et de la condition de Stefan. Les résultats montrent des différences qualitatives, en fonction de l'indice de la loi de puissance et des conditions de flux imposées, entre la solidification Newtonienne et non Newtonienne. Le comportement du modèle est illustré à l'aide de modèles de loi de puissance pour le sang et l'oxyde de polyéthylène [27].

#### **III.4.2. les écoulements des fluides non-newtoniens dans un élargissement et dans un rétrécissement :**

L'élargissement et rétrécissement brusque se démarque comme l'un des cas importants de modèles géométriques considérés bidimensionnels ou tridimensionnels. Quoique étant simple, l'attrait de ce modèle géométrique est que les écoulements sont caractérisés par d'importants phénomènes fondamentaux reliés à la mécanique des fluides : le développement d'une couche limite sur la paroi horizontale en amont, décollement et

développement d'une couche de cisaillement au coin de la marche, formation d'une zone de recirculation en aval de la paroi verticale, recollement de la couche de cisaillement sur la paroi horizontale en aval et redéveloppement d'une couche limite en aval du point de recollement.

#### **III.4.2.1. Travaux antérieurs sur les écoulements des fluides non-newtoniens dans un élargissement :**

**P. Townsend et K. Walters (1994) :** Etudient le flux d'expansion des liquides non newtoniens. Amplement, le liquide est une solution aqueuse de polymère et les débits d'expansion d'intérêt peuvent être considérés comme être bidimensionnelle ou tridimensionnelle. La grande activité vortex créée par l'inertie du fluide est amortie par l'élasticité du fluide. Dans le second groupe d'expériences, une suspension de fibre dans une matrice newtonienne est étudiée dans un flux de contraction axisymétrique et un écoulement d'expansion axisymétrique [28].

**Bockchoon Pak, Youngi. Cho et Stephen U.s. Choi (1990) :** Réalisent la Séparation et rattachement de flux de fluides non newtoniens dans une conduite d'expansion soudaine dans les études actuelles de visualisation des flux, le rôle des non-newtoniens caractéristiques (comme la viscosité et la viscoélasticité dépendantes du taux de cisaillement) le comportement d'écoulement à travers l'étape de détente brusque dans un tuyau circulaire est sur un large éventail de nombres de Reynolds, y compris les turbulents couler. Les rapports d'expansion testés sont de 2.000 et 2.667 et la plage du nombre de Reynolds couvert dans les tests de visualisation du courant est 35 000 sur la base du diamètre d'entrée. Les longueurs de rattachement viscoélastique fluides dans le régime d'écoulement laminaire sont beaucoup plus courtes que celles du fluide newtonien. En outre, ils diminuent la concentration croissante de fluide viscoélastique au même nombre de Reynolds. Cependant, dans le régime d'écoulement turbulent, la longueur de rattachement viscoélastique est deux ou trois fois plus longue que celle de l'eau, et augmente graduellement avec la concentration croissante de solutions viscoélastiques, ce qui se traduit par 25 et 28 distances de pas de hauteur pour 500 ppm et 1000 ppm polyacrylamide respectivement. C'est peut-être parce que l'élasticité polyacrylamide supprime le mouvement de tourbillon et contrôle la séparation et le comportement de réattachement dans l'écoulement brusque du tuyau de dilatation [29].



**Panagiotis Neofytou et Dimitris Drikakis (2003)** : étudient l'Instabilité du flux non-newtonien dans un canal avec une expansion soudaine. L'instabilité se manifeste par une rupture de symétrie de la séparation d'écoulement. Le début de l'instabilité dépend des paramètres spécifiques impliqués dans l'équation constitutive de chaque modèle. L'enquête englobe une analyse paramétrique étude pour chaque modèle, plus précisément les valeurs critiques à partir desquelles se produit la transition entre écoulement stable et instabilité. Dû au fait que pour chacun des modèles de Casson et Quemada, il existe deux paramètres de flux caractéristiques, la relation entre les valeurs critiques pour chacun de ces paramètres est également examinée [30].

**Primož Ternik, Jure Marn, Zoran Zuni (2006)** : Ont réalisés les recherches sur le flux de fluide non newtonien à travers une expansion symétrique plane: Fluides épaisseurs de cisaillement. Le flux de fluide non-newtonien incompressible par une expansion soudaine symétrique est étudié numériquement afin d'obtenir le nombre de Reynolds valeur critique. Le modèle quadratique est utilisé pour tenir compte du comportement de cisaillement et d'épaississement du mélange d'amidon de maïs et d'eau. Numérique est validée avec des résultats pour le flux de fluide newtonien dans une plage du nombre de Reynolds  $Re = 10, 20, \dots, 100$ . Résultats pour le non newtonien fluide montre que le comportement de cisaillement-épaississement abaisse le seuil de la transition de la symétrie de flux à son asymétrie (abaisse le début de la bifurcation et la valeur critique du nombre de Reynolds) et augmente la longueur du rattachement [31].

**Paulo J. Oliveira(2003)** : a mené une étude sur le Flux asymétriques de fluides viscoélastiques dans des géométries d'expansion planaires symétriques. Pour les liquides newtoniens dans une expansion 1: 3, il prédit le résultat que le flux devient asymétrique pour un nombre de Reynolds (basé sur la vitesse moyenne en amont et le canal hauteur) d'environ 54, en accord avec les résultats précédemment publiés. Pour le cas non-newtonien, la transition dépend de la concentration et des paramètres d'extensibilité du modèle, et la tendance est pour la fourchette bifurcation à se produire à des nombres supérieurs de Reynolds. Des simulations détaillées sont effectuées pour augmenter le nombre de Reynolds, nombre, à concentration fixe et nombre de Weissenberg, et pour augmenter la concentration à un Reynolds fixe nombre de 60 [32].

### III.4.2.2. les écoulements des fluides non-newtoniens dans un rétrécissement :

**I.J. Keshtiban, F. Belblidia, M.F. Webster (2004)** : Ont basé leur travail sur la Simulation numérique de liquides viscoélastiques compressibles. Un algorithme d'éléments finis de Taylor Galerkin est présenté pour tenir compte du faible nombre de Mach compressible et des écoulements liquides viscoélastiques incompressibles. L'algorithme est basé sur un processus constructif de division d'opérateur qui décrit trois fractionnaires. Pour le régime compressible, on utilise une interpolation de densité constante par morceaux avec récupération de gradient, pour laquelle la théorie de fond et la cohérence de l'approche sont discutés. Le schéma est appliqué aux flux de contraction pour les fluides du modèle Oldroyd, couvrant les flux d'entrée-sortie et les situations de forte chute de pression. Caractéristiques de stabilité et de performance de la nouvelle implémentation algorithmique sont mis en évidence. Des solutions sont fournies pour une gamme de réglages compressibles, tendant à la limite incompressible à la chute du nombre de Mach [33].

**Jonathan P. Rothstein, Gareth H. McKinley (2001)** : Ont réalisé une étude sur La contraction expansion axisymétrique : le rôle de la rhéologie extensionnelle sur la dynamique de croissance des vortex et la chute de pression accrue. L'écoulement d'un fluide de Boger de polystyrène par des contractions-expansions axisymétriques ayant diverses contractions ( $2 \leq \beta \leq 8$ ) et des degrés variables de courbures d'angle réentrantes sont étudiés expérimentalement sur une grande surface gamme de nombres Deborah. Le fluide élastique idéal est dilué, monodispersé et bien caractérisé en cisaillement et une extension uniaxiale transitoire. Une forte chute de pression accrue au-dessus de celle d'un fluide newtonien est observée indépendamment du rapport de contraction et de la courbure d'angle réentrant [34].

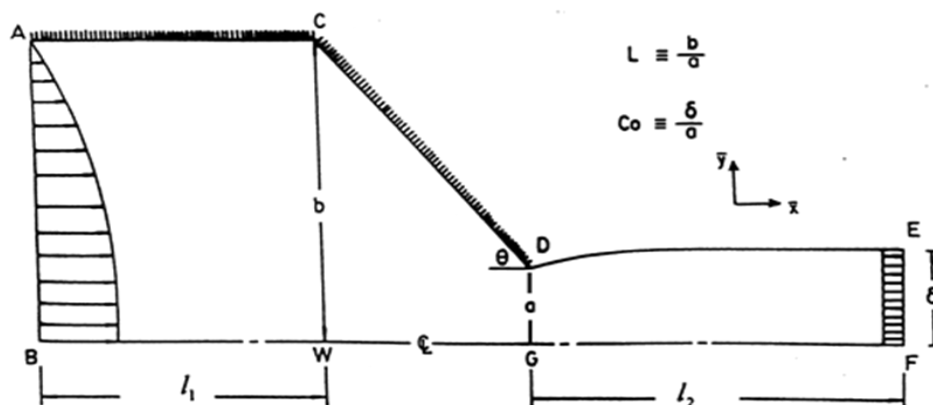
**S. Nigen, K. Walters (2002)** : ont étudié le Flux de contrainte viscoélastique : comparaison des configurations axisymétriques et planes. Il s'agit d'une étude expérimentale, qui étudie le comportement de deux solutions de polymères à viscosité constante appelés fluides de Boger) dans les contractions axisymétriques et planaires. Fournir un moyen d'étudier le rôle du fluide élasticité, des expériences sont également réalisées sur des liquides newtoniens ayant la même viscosité de cisaillement que les fluides de Boger. Dans les contraintes axisymétriques, les résultats expérimentaux sont tels qu'attendus, avec ce qu'on

appelle "l'amélioration du vortex" dans les fluides de Boger, associée à des pertes de pression accrues dues à la viscoélasticité.

Le comportement dans les contractions planaires pour les mêmes liquides est provocativement différent de celui trouvé dans l'axe géométries. Or, l'amélioration du vortex est absente. En outre, il est impossible de distinguer entre les données de chute de pression et débit pour les fluides Boger et Newtonien [35].

**Manuel A. Alves, Paulo J. Oliveira, Fernando T. Pinho (2004)** : Ont travaillé sur l'effet du rapport de contraction dans le flux viscoélastique par des contractions abruptes. Une étude numérique du flux rampant d'un fluide PTT par des contractions soudaines planaires a été réalisée pour quantifier l'effet de la contraction sur les caractéristiques d'écoulement (lignes de courant, taille et intensité des vortex de recirculation). Les équations gouvernantes pertinentes ont été résolues avec une méthode à volume fini mettant en œuvre un nouveau schéma à haute résolution (Alves et al. [Int. J. Numer. Meth. Fluids 41 (2003) 47]) pour la discrétisation des termes de convection, qui est ici expliqué et montré pour produire une précision et une robustesse améliorées. Les résultats des simulations, en termes de schémas de rationalisation, donnent des preuves supplémentaires d'un mécanisme d'amélioration des lèvres-vortex et sont en accord remarquable avec la flux visualisation des photographies de la littérature. De plus, les résultats montrent que la variation des caractéristiques d'écoulement au voisinage du réentrant comme la taille des vortex lèvres et les lignes de courant, sont dominées par les quantités et l'échelle en aval avec la définition commune pour la Deborah alors que les caractéristiques d'écoulement dans la région de l'angle saillant varient avec ce nombre de Deborah divisé par le rapport de contraction [36].

**Lee-May Huang, Chin-Chin Tsai, Ta-Jo Liu (1998)**: Une analyse par éléments finis a été réalisée pour étudier le mouvement fluide de jets non newtoniens émanant d'un canal convergent. Trois modèles typiques de fluides non newtoniens ont été envisagés: le fluide de loi de puissance, le fluide de Bingham modifié et le fluide d'Oldroyd-B. Les effets de cinq paramètres sur le champ d'écoulement sont analysés en détail, ces paramètres sont: le rapport de contraction de l'écart de canaux bien en amont de l'intervalle à la sortie de canal  $L$ ; L'angle de convergence du canal  $\theta$ ; L'indice de puissance  $n$ ; Le nombre de Bingham  $Bn$  et le nombre de Weissenberg  $We$  [37].



**Figure III.3:** Géométrie de flux dans le domaine physique pour l'expérience de Lee

### III.5. Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude sur la généralité des différents types d'écoulements, équations de la dynamique des fluides et c'est basé aussi sur l'analyse bibliographique des écoulements de fluide non-newtonien dans les conduites, les contractions brusques suivi d'un élargissement et rétrécissement.

# Chapitre IV

*Méthode Numérique Et Présentation  
Du Code De Calcul-Fluent*

## **IV.1.Introduction :**

Les codes de simulation numérique des écoulements, ou codes CFD (Computational Fluid Dynamics), résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie. Certains codes sont aussi en mesure de décrire le transport de polluant ou les réactions chimiques au sein d'un fluide. Il existe un grand nombre de codes CFD disponibles, qu'ils soient commerciaux, du domaine public ou encore propres à certaines institutions. [38]

Pour notre travail, nous aurons recours au code CFD **Fluent**, commercialisé par Fluent Incorporated. Nous disposons de la version 6.3. Pour l'usage que nous en avons, il permet de résoudre les équations régissant les mouvements laminaires et turbulents d'un fluide, en dimension 2 ou 3. Les problèmes à résoudre peuvent être en régime permanent et stationnaire.

## **IV.2.Méthodes numériques :**

### **IV.2.1. Les méthodes principales de discrétisation :**

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numérique. On distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous forme discrète, la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis. La méthode utilisée par le code "FLUENT" est celle des volumes finis [38].

#### **IV.2.1.1 Différences finies :**

Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie [38].

#### **IV.2.1.2 Eléments finis :**

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chacun de ces domaines, appelés éléments finis, la fonction inconnue est approchée par un polynôme dont le degré peut varier d'une application à l'autre mais reste en général faible. Ces éléments, triangles ou quadrilatères, rectilignes ou curvilignes, doivent réaliser une partition du domaine d'étude (ils sont disjoints et leur union recouvre le domaine tout entier). Cette partition qui est

généralement appelée découpage ou discrétisation du domaine doit respecter un certain nombre de règles qui permettent d'assurer un bon déroulement du calcul [38].

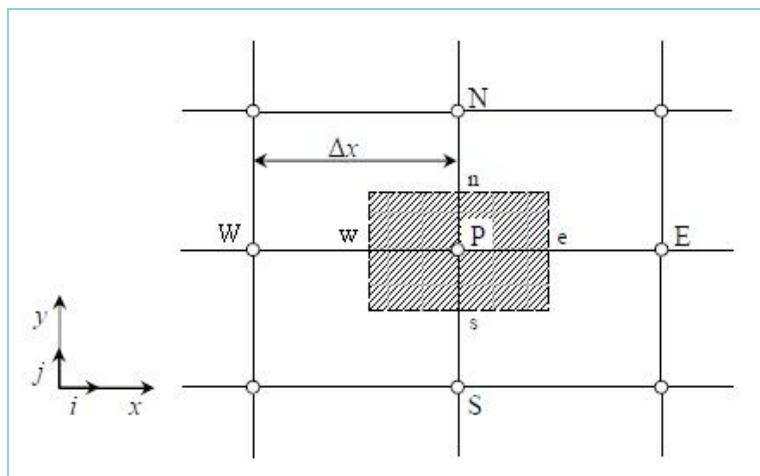
#### IV.2.1.3 Volumes finis :

La méthode a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar (Numerical Heat Transfer and Fluid Flow) [39].

La méthode des volumes finis est une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle (VC).

Les différentes étapes de la méthode des volumes finis sont :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle ;
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;
- Écriture des équations algébriques aux nœuds du maillage ;
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.



*Figure IV.1. Volume de contrôle bidimensionnel.*

Le volume de contrôle est montré par la Figure IV.1, Pour un nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y [41].

Le principe de discrétisation peut être illustré en considérant l'équation de transport pour une grandeur scalaire  $\phi$ :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\mathbf{T}} + \underbrace{\sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi)}_{\mathbf{C}} = \underbrace{\sum_{j=1} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)}_{\mathbf{D}} + \underbrace{S_\phi}_{\mathbf{S}} \quad (\text{IV.1})$$

avec :

**T**: Terme transitoire ;

**C**: Terme de convection ;

**D**: Terme de diffusion ;

**S**: Terme source.

Nous venons de voir que, pour chaque variable  $\phi$ , l'équation de transport s'écrit dans le cas stationnaire bidimensionnel [41] :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (\text{IV.2})$$

Où :  $\phi$  est la propriété transportée,  $\Gamma$  indique le coefficient de diffusion et  $S_\phi$  le terme source.

La discrétisation doit se faire au nœud P, ce qui donnera [42] :

$$\text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi = 0 \quad (\text{IV.3})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi = 0 \quad (\text{IV.4})$$

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV + \int_{\Delta V} S_\phi dV = 0 \quad (\text{IV.5})$$

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy + \bar{S}_\phi \Delta x \Delta y = 0 \quad (\text{IV.6})$$

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy + \bar{S}_\phi \Delta x \Delta y = 0 \quad (\text{IV.7})$$

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma A_y \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx + \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma A_x \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dy + \bar{S}_\phi \Delta x \Delta y = 0 \quad (\text{IV.8})$$

$$\left[ \Gamma_e A_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[ \Gamma_n A_n \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] + \bar{S}_\phi \Delta x \Delta y = 0 \quad (\text{IV.9})$$



Les quantités à e, w, n et s des faces de contrôle sont évaluées en fonction des valeurs des nœuds au milieu des volumes de contrôle. Donc il faut considérer une variation linéaire des variables d'un nœud à un autre pour assurer la continuité du phénomène physique ce qui est plus réaliste. C'est une approximation linéaire. [42]

Pour une grille uniforme on aura :

$$\begin{aligned}\Gamma_w &= \frac{\Gamma_w + \Gamma_p}{2}, & \Gamma_n &= \frac{\Gamma_n + \Gamma_p}{2} \\ \Gamma_e &= \frac{\Gamma_p + \Gamma_E}{2}, & \Gamma_s &= \frac{\Gamma_p + \Gamma_s}{2}\end{aligned}\quad (\text{IV.10})$$

Ce qui donnera par le flux de diffusion :

$$\begin{aligned}\Gamma_e A_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= \Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right), & \Gamma_n A_n \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n &= \Gamma_n A_n \left( \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} \right) \\ \Gamma_w A_w \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w &= \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right), & \Gamma_s A_s \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s &= \Gamma_s A_s \left( \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta x_{SP}} \right)\end{aligned}\quad (\text{IV.11})$$

En remplaçant les termes, on obtient :

$$\begin{aligned}\Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) + \Gamma_n A_n \left( \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta y_{PN}} \right) \\ - \Gamma_s A_s \left( \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta x_{SP}} \right) + \bar{S}_\phi \Delta x \Delta y = 0\end{aligned}\quad (\text{IV.12})$$

$\bar{S}_\phi$  est la valeur moyenne du terme source sur le volume de contrôle, Quand le terme source dépend de la variable dépendante. Cette dépendance doit être exprimée par une relation linéaire, ceci permettra d'utiliser les méthodes de résolution des systèmes linéaires.

La linéarisation est l'évolution de la valeur moyenne  $\bar{S}_\phi$  qui peut être fonction de la variable dépendante, leur valeur est donc calculée à chaque itération à partir des nouvelles des variables dépendantes. [41]

Le terme source sera linéarisé de façon à forcer la convergence, de sorte que :

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_p \phi_P \quad (\text{IV.13})$$

Où  $S_u$  est la partie constante qui ne dépend pas explicitement de  $S_p$ ,

$S_p$  est la pente de  $\phi_P$ .

Il est nécessaire que le coefficient  $S_p$  soit inférieur à zéro pour que la solution soit numériquement stable et que la convergence soit plus rapide. [41]

En arrangeant les termes on obtient :

$$\left( \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}} + \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}} + \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}} + \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}} \right) \phi_P = \left( \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}} \right) \phi_W + \left( \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}} \right) \phi_E + \left( \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}} \right) \phi_S + \left( \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}} \right) \phi_N + S_u \quad (\text{IV.14})$$

Cette équation est sous la forme :

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_u \quad (\text{IV.15})$$

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N - S_P$$

avec :

$$A_W = \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}}, \quad A_E = \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}},$$

$$A_S = \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}}, \quad A_N = \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}}$$

L'équation est appliquée pour chaque nœud du domaine de calcul. Pour le domaine adjacent au domaine limite, l'équation est modifiée pour incorporer les conditions aux limites.

Le système d'équations algébriques linéaire résultant est résolu pour obtenir la distribution de la propriété  $\phi$  à tous les points. [42]

#### IV.2.2. Les différentes étapes de la mise en œuvre :

- Le domaine de calcul est discrétisé en un nombre fini de points (les nœuds du maillage), autour desquels on définit des volumes élémentaires (appelés volumes de contrôle) contigus, non juxtaposés et sans discontinuités aux interfaces ;
- Les équations modèles, sous forme conservative, sont intégrées sur chaque volume de contrôle (VC) ;
- Les intégrales sur un volume de contrôle en un nœud donné sont évaluées en approchant la variation de  $\Phi$  par des profils ou des lois d'interpolation entre les nœuds voisins du point considéré ;
- Écriture des équations algébriques en fonction des valeurs de  $\Phi$  aux nœuds du maillage ;
- Résolution du système algébrique linéaire obtenu.

### IV.2.3. Principes des codes CFD :

Les logiciels de simulation numérique des écoulements basés sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritables « expériences numériques », lorsqu'elles sont faites avec soin. L'avantage des « méthodes numériques » est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement.

Dans une expérimentation, l'obtention de ces quantités physiques en tout point du champ est souvent impossible ou très difficile en pratique. Les méthodes CFD (Computational Fluid Dynamics) ont l'avantage de mettre en œuvre les équations générales de la mécanique des fluides avec un minimum des hypothèses. Elles résolvent notamment les équations non-linéaires instationnaires et compressibles. La discrétisation des équations de Navier-Stokes et de conservation de la masse est faite sur des éléments quadrilatéraux ou triangulaires, réguliers ou non selon la complexité de la géométrie.

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à la nature de l'écoulement. En particulier, le maillage doit être fin dans les zones où l'on atteint des gradients physiques très importants.

Les équations régissant l'écoulement sont résumées dans le tableau qui suit :

*Tableau IV.1. Récapitulatif des équations régissant l'écoulement [40].*

Conservation de la masse	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho.V) = 0$
Quantité de mouvement (Navier-stokes)	$\frac{D}{Dt}(\rho.V) = \rho F - \text{grad}(p) + \eta \Delta V + \frac{1}{3}\eta \text{grad}[\text{div}(V)]$
Energie	$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \Delta(K T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \eta \phi$

Avant d'entamer la résolution de ces équations, nous devons identifier le régime de l'écoulement laminaire ou turbulent. Il est donné par la valeur du nombre de Reynolds.

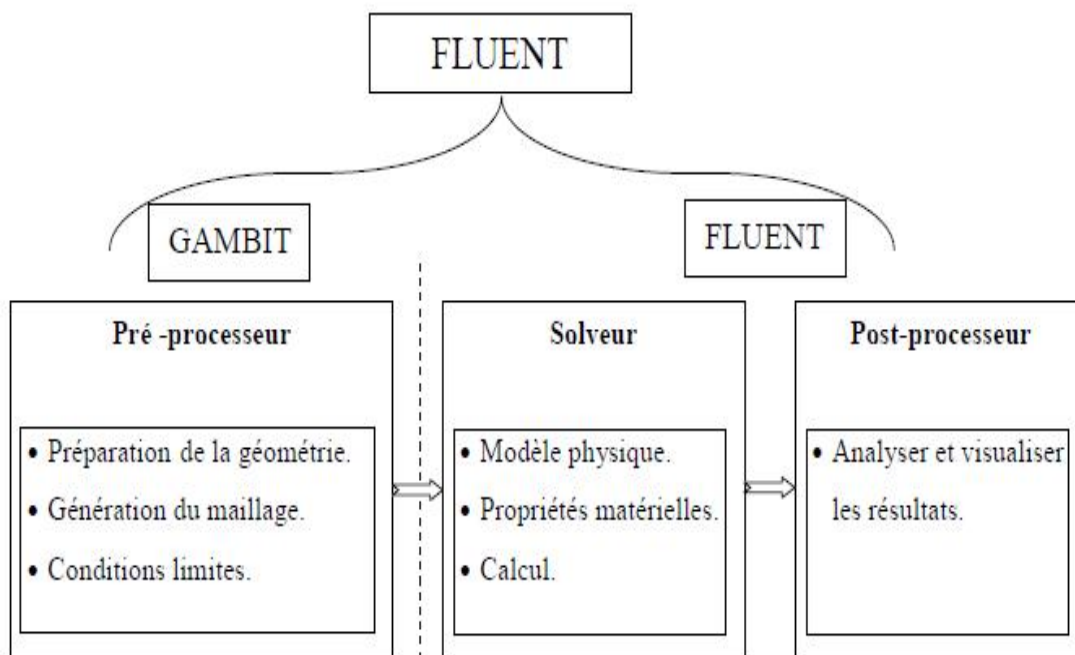
## IV.3. Présentation du code de calcul :

### IV.3.1. Différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique par fluent :

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessitent la connaissance de certaines notions théoriques de base. Ces notions, concernent notamment, les définitions des principales équations régissant l'écoulement.

La résolution numérique par FLUENT d'une manière générale, suit les étapes suivantes :

1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
5. Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
6. Analyse des résultats obtenus.



*Figure IV.2. Structure de base du code "FLUENT "*

### IV.3.2. Présentation de GAMBIT :

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

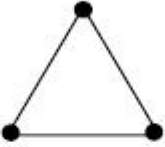
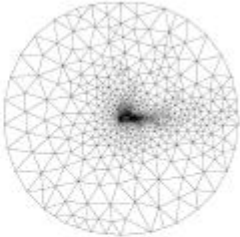
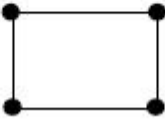
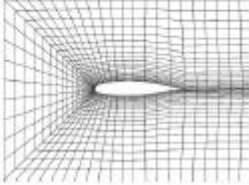
### IV.3.2.1. Choix du maillage :

Le maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées éléments [18]. Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- le nombre de mailles ;
- la distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- la forme de la maille ;
- les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Les différentes formes de maillage des faces montré dans le tableau suivant :

*Tableau IV.2. Les différentes formes de maillage.*

Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		
Quadrilatérale		

Aussi il permet de choisir le type de maillage des faces selon les options suivantes :

*Tableau IV.3. Description des types de maillages des faces.*

Option	Description
Map	Créé une grille régulière et structurée des éléments du maillage.
Sub map	Divise une face en plusieurs régions de façon à ce qu'on puisse leur appliquer Map.
Pave	Créé une grille non structurée des éléments du maillage.
Tri primitive	Divise une face en trois régions quadrilatérales et créé un maillage dans chaque région de la face.

### IV.3.2. Présentation de code FLUENT :

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont:

- Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- Des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- Des mailles (hybrides) mixtes.

FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes :

- Ecoulements 2D ou 3D ;
- Ecoulement stationnaire ou instationnaire ;
- Ecoulements incompressibles ou compressibles (subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) ;
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents ;
- Fluide Newtonien ou non ;
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ;
- Ecoulements avec changements de phases ;
- Ecoulements en milieu poreux.

FLUENT emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "FLUENT" passe par les étapes suivantes :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures.
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour tenir compte des effets turbulents.

### IV.3.3. Choix des paramètres de FLUENT :

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite le choix des paramètres essentiels :

#### IV.3.3.1. Procédure sous FLUENT:

Une fois le chargement du fichier de maillage (réalisé avec le logiciel GAMBIT) effectué sous "FLUENT", nous devons mettre à l'échelle de la géométrie. Le logiciel "FLUENT" permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire et cela pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité d'accès à la mémoire (Grid\Reorder).

#### IV.3.3.2. Simple précision ou double précision :

"FLUENT" offre deux modes de calcul : le mode "double précision" et le mode "simple précision". Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "double précision" est préconisé, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates, comme dans le cas d'un canal très long et mince.

#### IV3.3.3. Choix de la formulation du solveur :

Sous "FLUENT", on peut choisir entre plusieurs formulations du solveur :

- La formulation "Segregated", ou isolée (implicite) : Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (implicite par défaut). Le solveur isolé est classiquement employé pour les écoulements incompressibles à modérément compressibles.
- La formulation "Coupled", ou couplée (implicite ou explicite) : Cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres. Cependant, les autres scalaires, tels que les quantités de la turbulence, sont traités isolément. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses. Ceci lui donne un avantage pour le traitement des écoulements hautement couplés (forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments) avec des forces de volumes (par exemple flottabilité et forces de rotation). Il faut signaler que le solveur couplé implicite requiert presque le double de la mémoire qu'utiliserait le solveur isolé, alors que le solveur couplé explicite vient

au milieu, en terme de besoins en ressources, mais converge plus lentement que la formulation implicite et n'est conseillé que pour les écoulements instationnaire.

#### **IV.3.3.4. Schémas de discrétisation :**

Sous "FLUENT", les variables stockées au centre de la cellule doivent être interpolées aux faces du volume de contrôle. Il est possible de choisir entre différents schémas de discrétisation pour les termes convectifs des équations gouvernantes, alors que les termes visqueux sont automatiquement discrétisés au second ordre pour plus de précision. Il reste que la discrétisation au premier ordre procure une meilleure convergence, alors que le "Second Order Upwind Scheme" est de rigueur pour les écoulements non alignés au maillage.

Aussi, il existe d'autres schémas de discrétisation :

- Le schéma "QUICK" (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics) : il procure une meilleure précision que le schéma au second ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (Swirling) avec un maillage régulier. Cependant, il ne pas recommandé par un maillage triangulaire. Ce schéma utilisé dans notre étude.
- Le schéma à loi de puissance "Power Law" : il est plus précis que le "First Order Upwind Scheme" pour les écoulements à très bas nombres de Reynolds.
- Le schéma "third-order MUSCL" : il donne plus de précision que les autres schémas.

#### **IV.3.3.5. Choix du schéma d'interpolation de la pression :**

Dans la plupart des cas, le schéma "Standard" est acceptable pour des écoulements spécifiques. On peut choisir parmi les options suivantes :

- Le schéma force de volume pondéré "Body-Force-Weighted" est recommandé pour les écoulements impliquant d'importantes forces de volume (par exemple convection naturelle à haut nombre de Rayleigh).
- Le schéma "PRESTO" (Pressure Staggering Option) est approprié pour les écoulements hautement tourbillonnaires à grande vitesse de rotation, ou les écoulements dans des domaines fortement courbés.
- Le schéma au "Second Ordre" est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.
- Le schéma linéaire "Linear" est disponible comme alternative dans le cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.



#### IV.3.3.6. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse :

Si les vitesses sont définies aux nœuds d'un volume de contrôle ordinaire (comme les autres scalaires: pression, température), il est démontré qu'un champ de pression hautement non uniforme agira comme un champ uniforme sur les équations de quantité de mouvement discrétisées. La solution passe par la définition des vitesses sur une grille décalée "Staggered grid" et l'emploi d'algorithmes tels que "SIMPLE" pour résoudre ce lien ou couplage entre la pression et la vitesse. La famille des algorithmes "SIMPLE" est essentiellement une procédure "d'estimation et de correction" pour le calcul de la pression sur la "grille décalée" des composantes de la vitesse.

"FLUENT" propose trois méthodes pour le couplage pression-vitesse (seulement avec la formulation "Segregated") :

- Les deux premières, très similaires, sont la méthode "SIMPLE" (Semi-Implicit Method for a Pressure Linked Equations) et la méthode "SIMPLEC" (SIMPLE Consistent). Cette dernière méthode se différencie de la première par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (correction) de pression proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution.
- Méthode "PISO" (Pressure-Implicit with Splitting of Operators): Cette méthode fait partie des algorithmes de la famille "SIMPLE". Elle est recommandée pour les écoulements instationnaires ou pour les maillages contenant des cellules très obliques "highly skewed".

Après avoir choisi les différents paramètres de FLUENT, on passe à l'étape suivante qui est le lancement des calculs, et l'analyse et l'interprétation des résultats.

#### IV.3.4. Forme linéaire de l'équation discrétise :

L'équation du transport contient la variable inconnue  $\phi$  au centre de la cellule ainsi que les valeurs des cellules voisines, en réalité l'équation du transport pour ces inconnues est non linéaire mais elle prend la forme linéaire suivante pour plus de simplification :

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (\text{IV.16})$$

Où (nb) réfère aux cellules voisines et  $a_p$  et  $a_{nb}$  sont les coefficients linéaires pour  $\phi$  et  $\phi_{nb}$  le nombre des cellules voisines pour chaque cellule dépend de la topologie de la maille; en général il est égal au nombre des faces qui entourent la cellule.

Pour chaque cellule on aura des équations similaires, ces équations linéaires qui diffèrent par les coefficients  $a_p$  et  $a_{nb}$  sont résolues comme système linéaire par la méthode implicite itérative de (Gauss Seidel) avec la conjonction d'une méthode appelée (AMG) (algebraic multi Grid).

#### IV.3.5. Sous relaxation :

A cause de la nature non linéaire de l'équation qui doit être résolue par FLUENT, il est nécessaire de contrôler le changement de variable  $\phi$ . On peut atteindre ce but par la sous relaxation, qui réduit le changement de  $\phi$  produit durant chaque itération. En simple forme, la valeur nouvelle de  $\phi$  pour une cellule définie dépend de la valeur ancienne  $\phi_{old}$ , le changement de  $\phi$  est  $\Delta\phi$  et  $\alpha$  est le facteur de sous relaxation :

$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta\phi \quad (IV.17)$$

#### IV.3.6. Conditions aux limites :

La résolution par une méthode analytique ou numérique de l'équation de transport convecto-diffusif nécessite la détermination de ses conditions initiales et aux limites.

Pour le code Fluent les types disponibles des conditions aux limites sont classés comme suite :

**a) Conditions d'entrée et de sortie de l'écoulement :** pression d'entrée (pressure inlet), vitesse de l'entrée (velocity inlet), débit massique à l'entrée (mass flow inlet), admission (intake), pression de sortie (pressure outlet) ; sortie (outflow), champ de pression lointain (pressure far-field), échappement (exhaust).

**b) Mur et conditions du pôle :** mur (wall), axe de symétrie (axis), conditions périodique, plan de symétrie (symétrie).

**c) Cellules des zones internes :** fluide ou solide (de différent type).

**d) Condition des faces internes :** ventilation, radiation, mur intérieur. Mais si on parle d'une façon plus générale nous aurons quatre types de conditions aux limites ou chacun d'eux nécessite une étude approfondie :

❖ **à l'entrée du domaine :** la valeur du variable est connue.

❖ **à la sortie du domaine :** soit qu'en connaît la valeur du variable donné ou on suppose que le régime est établi.

- ❖ **à la paroi** : soit on connaît la valeur de la variable posée (la vitesse ou la température par exemple), soit on connaît d'autres grandeurs physiques (gradient de vitesse, flux thermique).
- ❖ **Sur l'axe de symétrie** : où le gradient de la variable posé suivant la direction perpendiculaire à l'axe de symétrie est nul.

#### **IV.4. Conclusion :**

A travers ce chapitre, nous avons présenté brièvement le code de calcul FLUENT, la méthode de volume fini, le choix de différents modèles d'interpolations puis les différentes types de conditions aux limites offert ce code de calcul.

# Chapitre IV

*Résultats Numérique*

*Et Discussions*

## V.1.Introduction :

La plus logique des démarches nous conduit à résoudre le problème en 2D vu la géométrie complexe du canal à étudier. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à l'étude numérique de l'écoulement d'un fluide non-newtonien à travers un canal représentant des singularités apparaissant dans plusieurs applications industrielles. Il est important de bien connaître le mouvement de particule fluide dans tels tunnels, notamment la trajectoire du fluide non-newtonien issu du jet d'un convergent.

Le présent travail est relatif à une conduite présentant un rétrécissement local de section, avec une pente douce.

- Le fluide utilisé est un fluide à comportement rhéofluidifiant, dans notre cas c'est le Pétrole Brut De La Mer Du Nord : Dont la simulation obéit à la loi de Herschel-Bulkley

L'objectif de ce chapitre est de prédire le comportement de ce type de fluide en écoulement à travers une étude de simulation numérique.

## V.2.Présentation Du Cas Etudié :

L'étude consiste à déterminer principalement l'influence sur les conditions géométriques de grandeurs physiques déterminantes telles que la pression dynamique, la vitesse au voisinage et au sein du rétrécissement et l'influence des paramètres rhéologiques telle que l'indice de comportement.

Le fluide simulé est le pétrole brut de la Mer du Nord qui suit soit la loi d'Herschel-Bulkley :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (\text{V.1})$$

Avec :  $\tau_c = 0.85$  Pa,  $K = 0.076$  et  $n = 0.86$  [15]

- Densité : 0,806
- Masse volumique :  $\rho = 806$  kg/m<sup>3</sup>
- Chaleur massique :  $C_p = 2.1$  kJ/kg.k
- Conductivité thermique :  $\lambda = 0.12$  W/m<sup>2</sup>.k [45]

### V.3.Hypothèse du Problème :

Considérons un convergent d'axe horizontal, visualisé sur la figure (V.1). Il est important de choisir convenablement les grandeurs de longueur pour donner une bonne approche numérique.  $L_1 = 200\text{cm}$ ,  $L_2 = 100\text{cm}$ , ces distances sont suffisamment longues pour assurer un écoulement pleinement développé à l'entrée et un jet unidirectionnel à la sortie du canal.

Le régime d'écoulement est laminaire et permanent dans le conduit suivant la direction Ox. On étudie l'écoulement supposé bidimensionnel, dans celui-ci.

On définit, pour un fluide pseudoplastique, le nombre de Reynolds généralisé.

$$\text{Re}_g = \frac{\rho U_e^{2-n} h^n}{K} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{-n} 8^{1-n}$$

Où  $U_e$  est la vitesse d'entrée avec une valeur  $U_e = 0.00258 \text{ m/s}$

Nous admettons aussi que les forces d'inertie et gravitationnelles ainsi que les transferts thermique sont négligeables. La masse volumique est constante dans un régime stationnaire.

#### V.3.1.Modèle Géométrique et Maillage :

##### a) Modèle géométrique :

Le domaine d'étude se limite à une conduite présentant un rétrécissement local de section, avec une pente douce

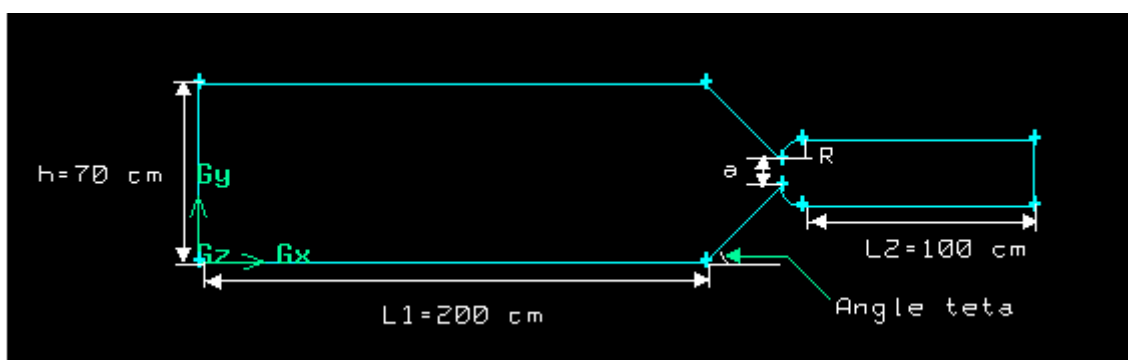


Figure V.1 : Modèle géométrique simulé.

Le débit fluide issu de telle configuration géométrique est fortement affecté par le rapport de contraction ( $S$ ). Si  $S$  est petit, son influence est négligeable, et devient analogue à un système des plaques planes parallèles. Par contre, si  $S$  augmente, l'effet de conduit sur l'expansion du jet sera important. Mais il existe une valeur critique au-delà du quelle l'accroissance du  $S$  ne

traduit aucun changement, en fait, on peut effectuer une série de tests numériques pour bien déterminer cette valeur  $Sc$  correspondante à chaque modèle de fluides.

Le rapport de contraction ( $S$ ) est donné par la relation :

$$S = \frac{h}{a} \quad (\text{V.2})$$

Avec

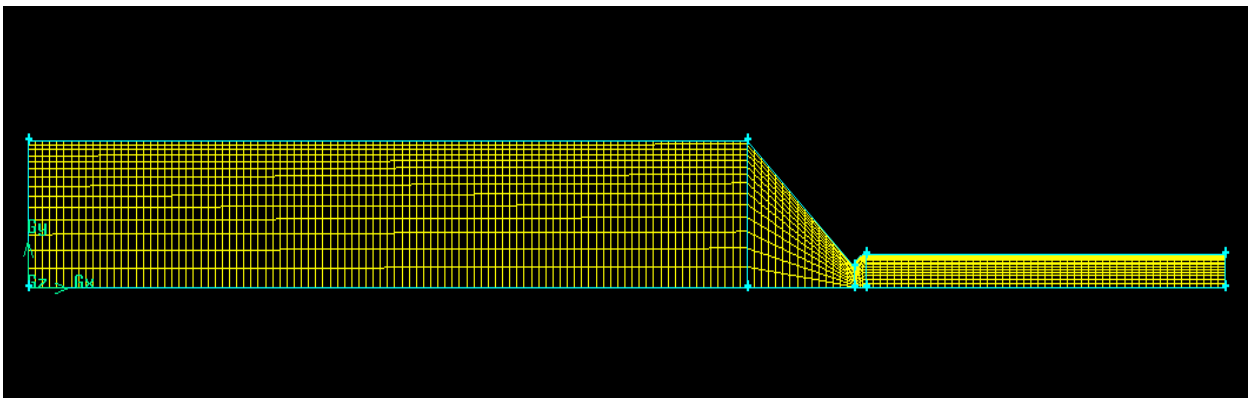
Où :  $h$  est la hauteur de la section d'entrée du canal et  $a$  est la hauteur minimale de la section convergent.

Les gammes de variation des paramètres étudiés sont comme le suivant :

- Indice de comportement :  $0.1 \leq n \leq 1$
- Le rapport de contraction :  $2.33 \leq S \leq 7$
- Angle de convergence :  $30 \leq \theta \leq 90$
- Le rayon d'élargissement :  $10 \leq R \leq 120$  (mm). [45]

#### b) Maillage de la Géométrie :

La génération du maillage (2D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie et du code de simulation utilisé.



*Figure V.2 : Maillage de la Géométrie*

Le maillage utilisé pour notre géométrie est un maillage de face, de type quadrilatéral.

Le premier travail à accomplir dans la réalisation d'une simulation numérique est la définition d'un maillage adapté à l'écoulement, dont la qualité infecte directement la précision des calculs.

Un nombre de mailles insuffisant fera diverger les calculs ou sera responsable d'une diffusion numérique trop importante. Il faut trouver un compromis entre le nombre de mailles et le temps de calcul qui augmente considérablement avec le raffinement de la discrétisation du domaine.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais) Sortie.
- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ...etc.)

Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

### V.3.2. Conditions Aux Limites :

Afin de définir un problème pour une solution unique, on doit fournir des informations sur les variables aux frontières du domaine. Dans ce contexte, les conditions aux limites définissent la valeur des paramètres hydrauliques (vitesse, pression...).

Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés dans le code Fluent. Nous en utilisons essentiellement trois : vitesse d'entrée, pression de sortie imposée à la surface libre, et la condition de paroi.

La première condition aux limites «**velocity-inlet**» correspond à une vitesse imposée. La deuxième condition «**pressure-outlet**» (pression de sortie) est appliquée au niveau de la sortie du canal et à la surface libre (pression atmosphérique). La troisième «**Wall**» est une condition de flux nul. Elle est appliquée au niveau des parois ou des seuils. La vitesse est tangente à la paroi pour les cellules du voisinage (condition de non glissement). Enfin la dernière c'est l'axe «**symetry**».

Les conditions aux limites appliquées pour notre modèle sont récapitulées dans le tableau Suivant :

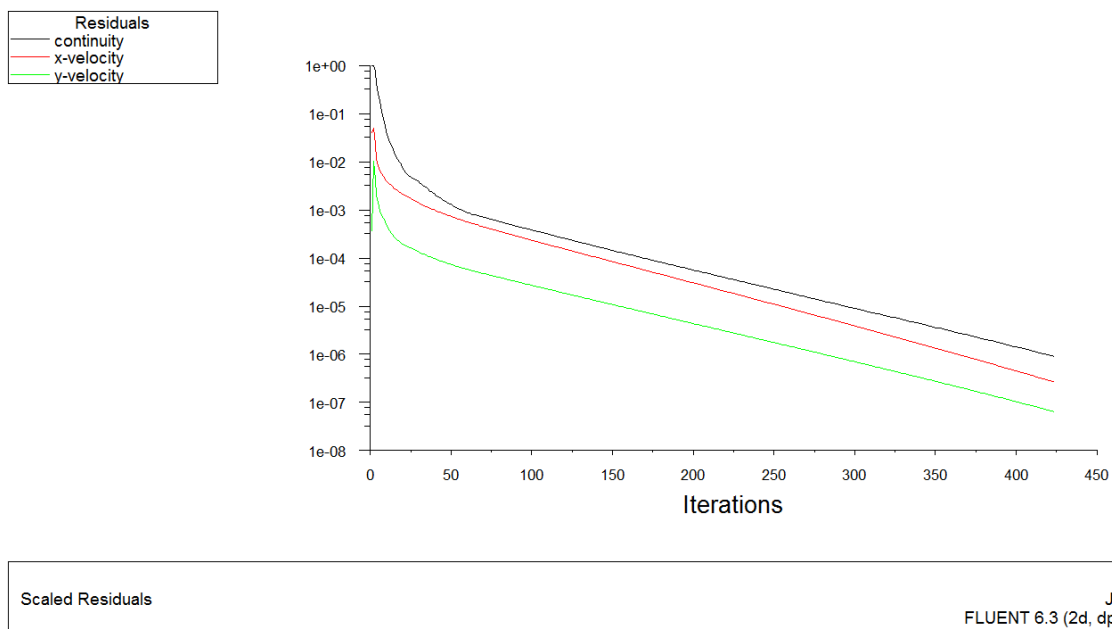


**Tableau V.1 : Conditions aux limites appliquées pour notre modèle**

Géométrie	Type de condition limite	Observation Entrée
Entrée	Velocity inlet	Vitesse initiale
Sortie	Pressure outlet	Pression atmosphérique
Paroi	Wall	Mur (non-glissement)
Axe	Symetry	Suivant l'axe ox

### V.3.3 .Résolution sur Fluent :

Dans la simulation, nous avons obtenir une stabilité et convergence de modèle étudié pour chaque maillage imposé.

**Figure V.3 : Allure de l'évolution des résidus de calcul**

On utilise la méthode SIMPLE pour le couplage vitesse-pression, et une discrétisation d'Upwind de 2eme ordre. On conserve les valeurs par défaut des coefficients de sous relaxation. On utilise le modèle Laminar pour la résolution de cet écoulement. On a itéré jusqu'à 1000 pour un critère de convergence de  $10^{-6}$ .

### V.4. Résultats numériques et Discussions :

Dans cette partie nous déterminons principalement l'influence des paramètres rhéologiques, hydrodynamiques et géométriques sur les répartitions de grandeurs physiques déterminantes telles que les vitesses au voisinage et au sein du rétrécissement. on s'intéresse

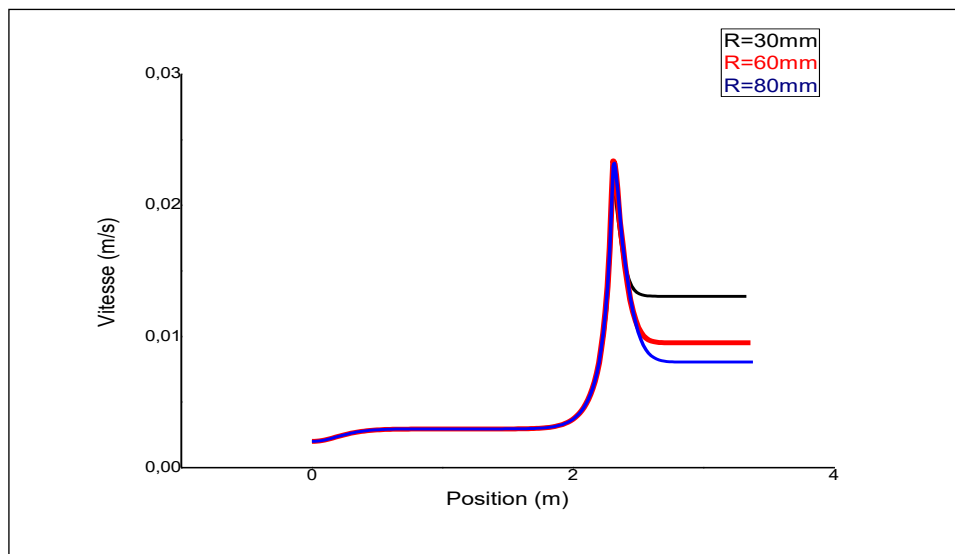
seulement à la simulation de l'écoulement du pétrole brut obéit à la loi de Herschel-Bulkley et qui a été cité dans le paragraphe (IV....).

#### V.4.1. Influence des conditions géométriques :

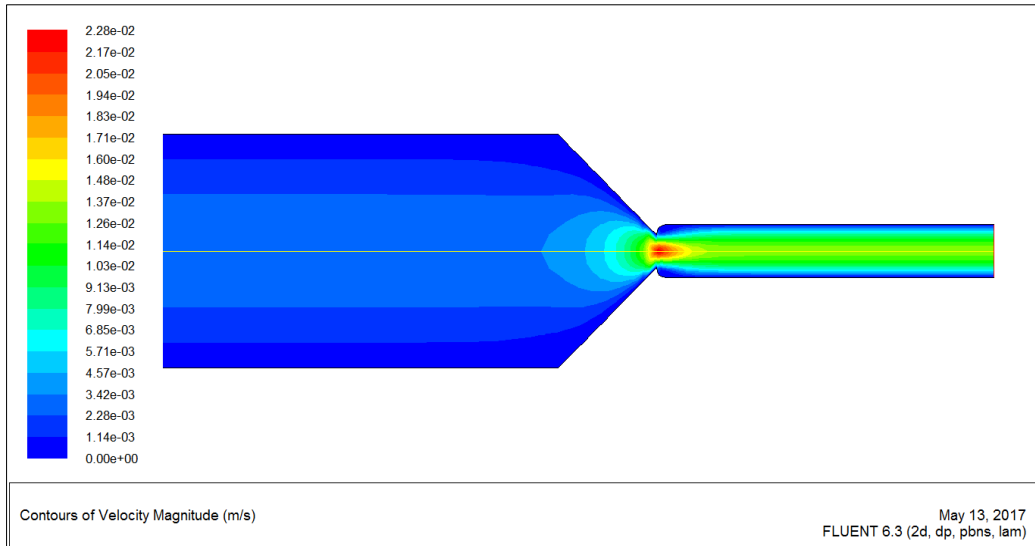
Divers facteurs pouvant toucher la structure des écoulements induits, commençant d'abord par la configuration géométrique. L'influence de trois paramètres a été vérifiée : rayon de courbure de la ponte, rapport d'aspect et angle de convergence.

##### V.4.1.1. Influence du rayon de courbure R :

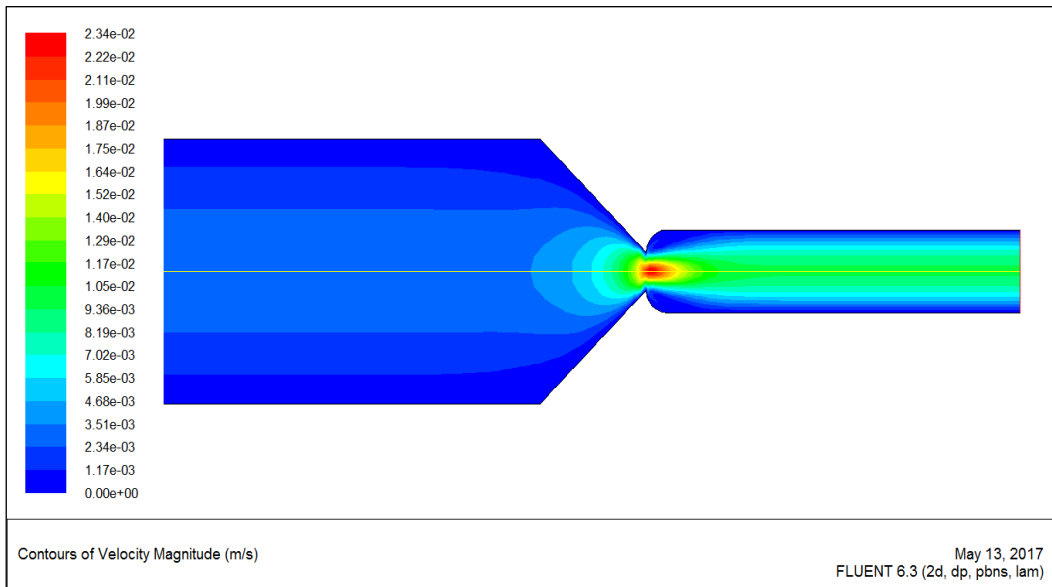
La présence d'une ponte douce au point de rattachement avec le convergent provoque un fort gradient de pression dans cette zone : les particules fluides viennent de changer de direction pour former ainsi un tourbillon. Le rayon de courbure de cette ponte présente des effets considérables. Il est clair que l'intensité maximale est prise pour  $R=30$  et la décroissance est plus rapide avec l'augmentation de rayon, ce qui nous ramène à dire que la présence d'une forte fait accélérer l'écoulement.



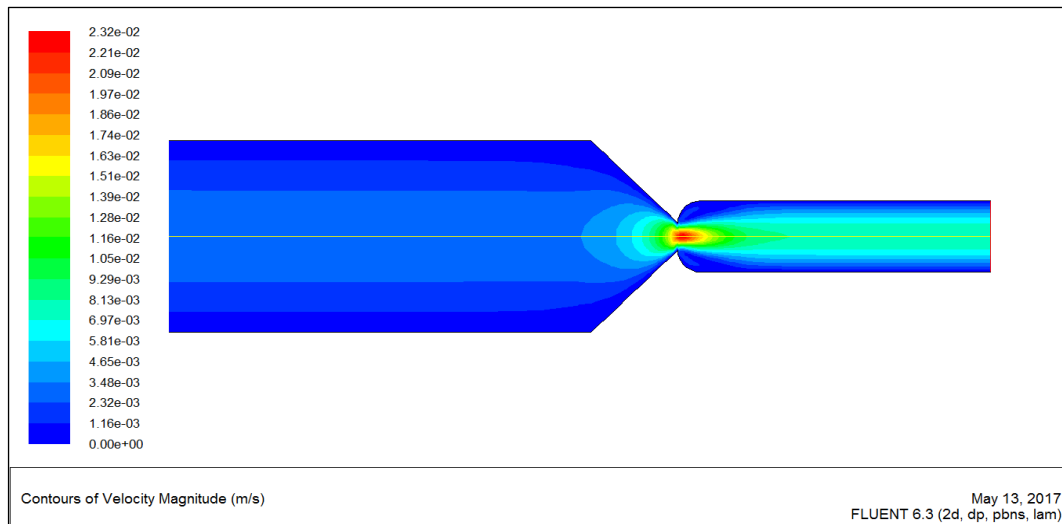
*Figure.V.4. Variation de la vitesse sur l'axe de symétrie en fonction de la position*



*Figure V.5 .Conteurs de vitesse pour :  $\theta = 45^\circ$   $S=7$  et  $R = 30mm$*



*Figure V.6. Conteurs de vitesse pour :  $\theta = 45^\circ$  ,  $S=7$  et  $R=60mm$*



*Figure V.7 .Contours de vitesse pour :  $\theta = 45^\circ$  ,  $S= 7$  et  $R = 80$  mm*

Les planches (V.4, 5,6) confirment la conclusion tirée précédemment : avec une pente très forte, les contraintes de cisaillement sont plus accentuées, ce qui engendre des tourbillons de tailles plus amples, le point de rétablissement de l'écoulement est plus éloigné, et la longueur du jet est plus remarquable

#### **V.4.1.2 .Influence du rapport de contraction S**

Le débit fluide issu de telle configuration géométrique est fortement affecté par le rapport de contraction S, si S est petit, alors son influence est négligeable, et qui devient analogue à un système des plaques planes parallèles. Par contre, si S augmente, l'effet de conduite sur l'expansion du jet sera important. Mais il existe une valeur critique au-delà du quelle l'accroissance du S ne traduit aucun changement, en fait, on peut effectuer une série de tests numériques pour bien déterminer cette valeur  $S_c$  correspondante à chaque modèle de fluides. Par une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis, Huang et al [...] ont mis l'accent sur  $S_c$  : pour les fluides Ostwaldiens elle est égale à 6, mais pour le modèle de Bingham est supérieur ( $S_c=7$ ).

Pour notre étude, S est varié de 3.5 jusqu'à 7.

Le suivi de la variation de la vitesse (figure V.8), montre une forte augmentation de l'intensité de l'écoulement avec la diminution de S.

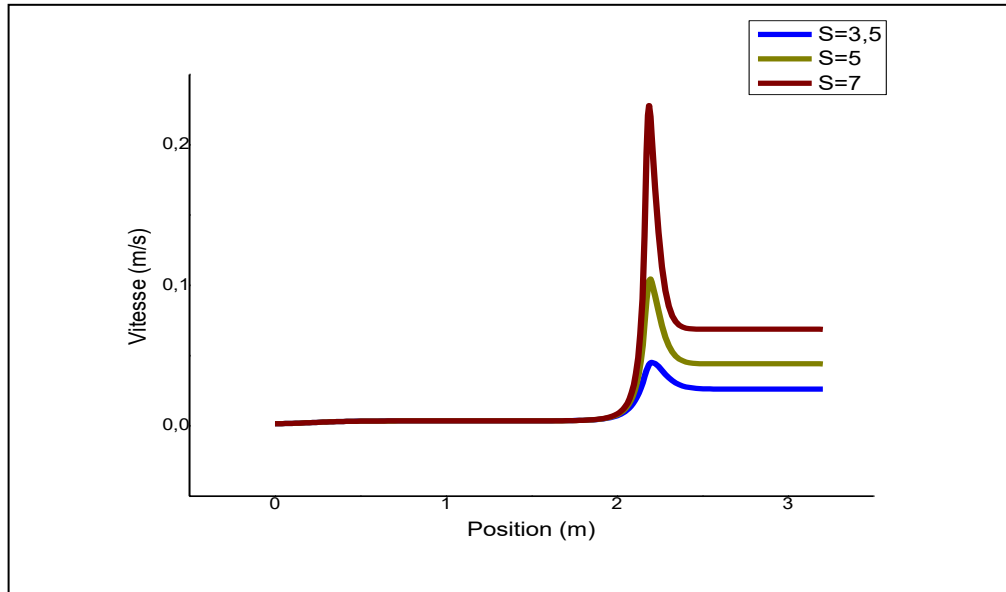


Figure .V.8. Profils des vitesses sur l'axe de symétrie en fonction de la position

L'augmentation du rapport de convergence S (figure (V.8)) fait la motivation de l'écoulement du pétrole brute (phénomène illustré par la décroissance rapide du profil de vitesse)

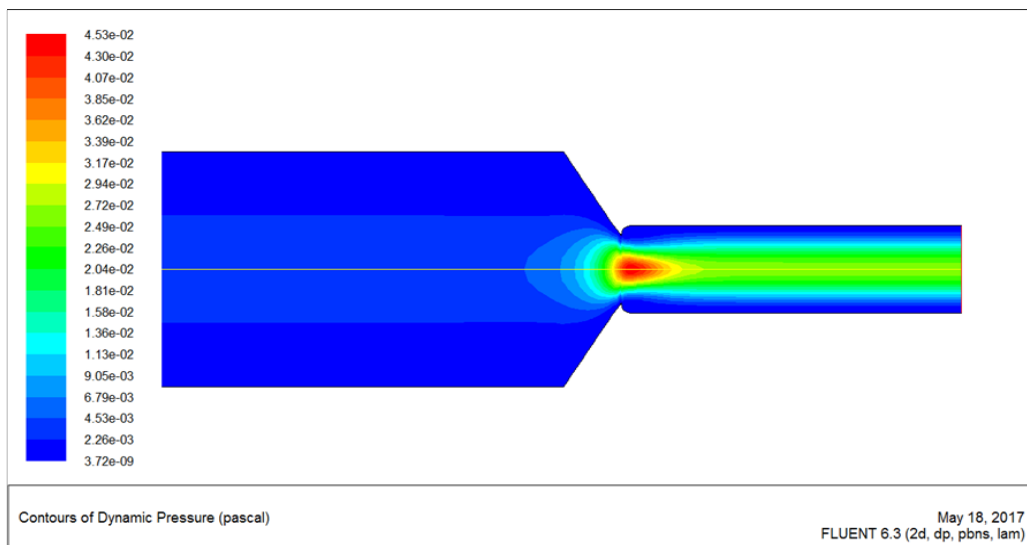
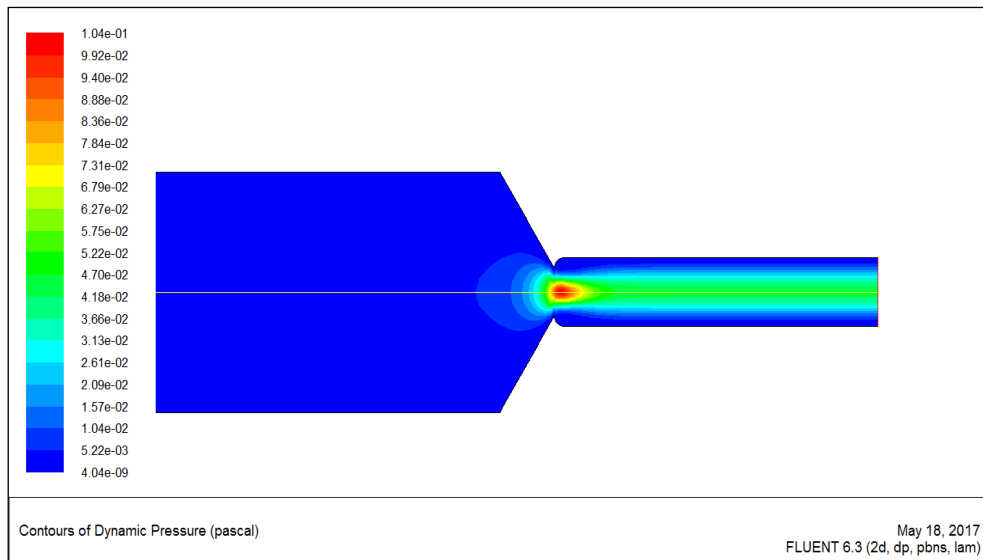
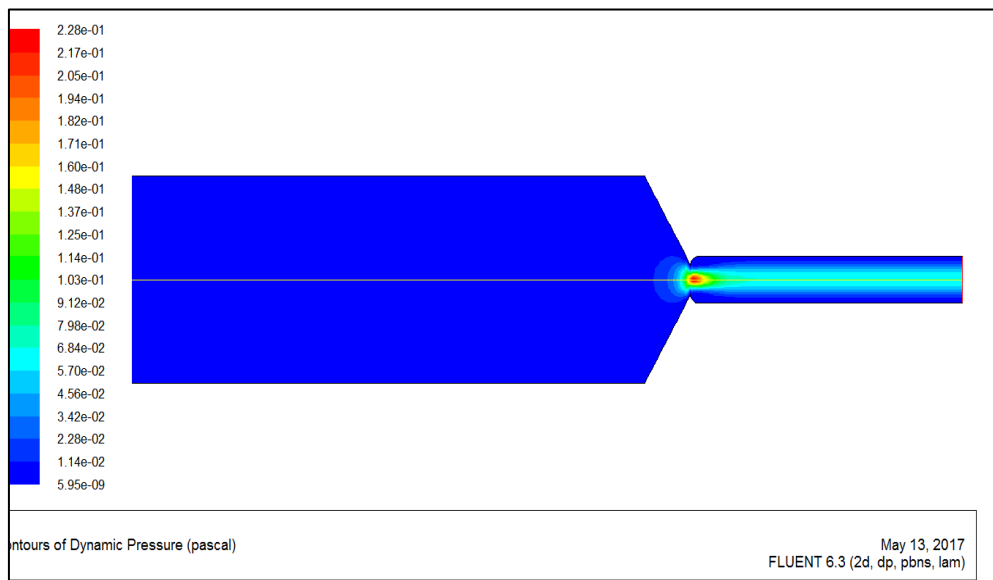


Figure.V.9. Conteurs de pression dynamique avec :  $\theta = 60^\circ$  ,  $S=3.5$ ,  $R=30mm$ ,  $S=3.5$



**Figure .V.10.** Conteurs de pression dynamique avec :  $\theta=60^\circ$ ,  $R=30\text{mm}$   $S=5$



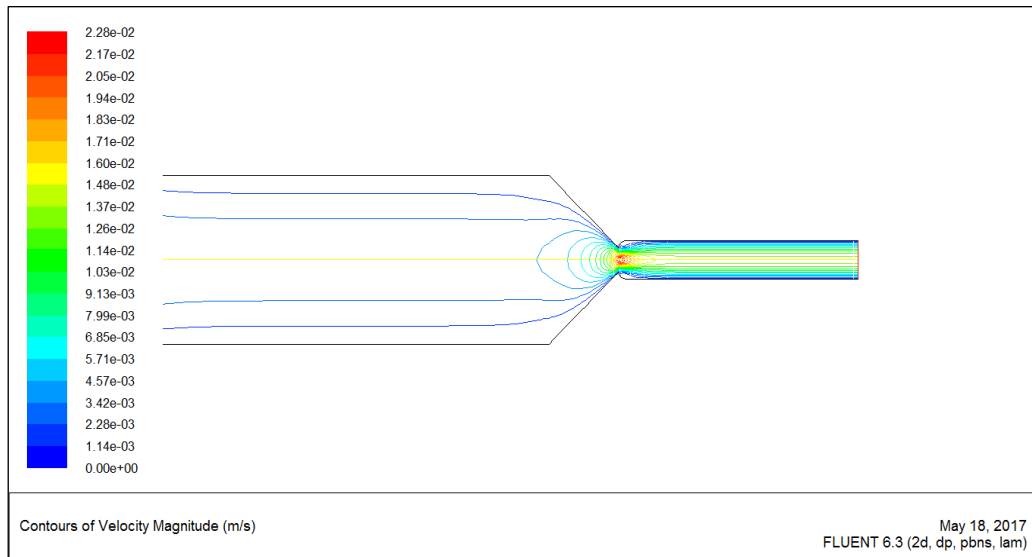
**Figure.V.11.** Conteurs de pression dynamique avec :  $\theta = 60^\circ$ ,  $S=7$ ,  $R=30\text{mm}$   $S=7$

Les figures .V. (9, 10,11) montrent la structure d'écoulement du pétrole brut à travers l'axe de symétrie de la géométrie considérée. Cette structure d'écoulement va influencer considérablement la répartition de la pression dynamique. la valeur de la pression dynamique est plus importante au niveau de la contraction (rétrécissement) et diminue légèrement jusqu'à la sortie de la section contractée.

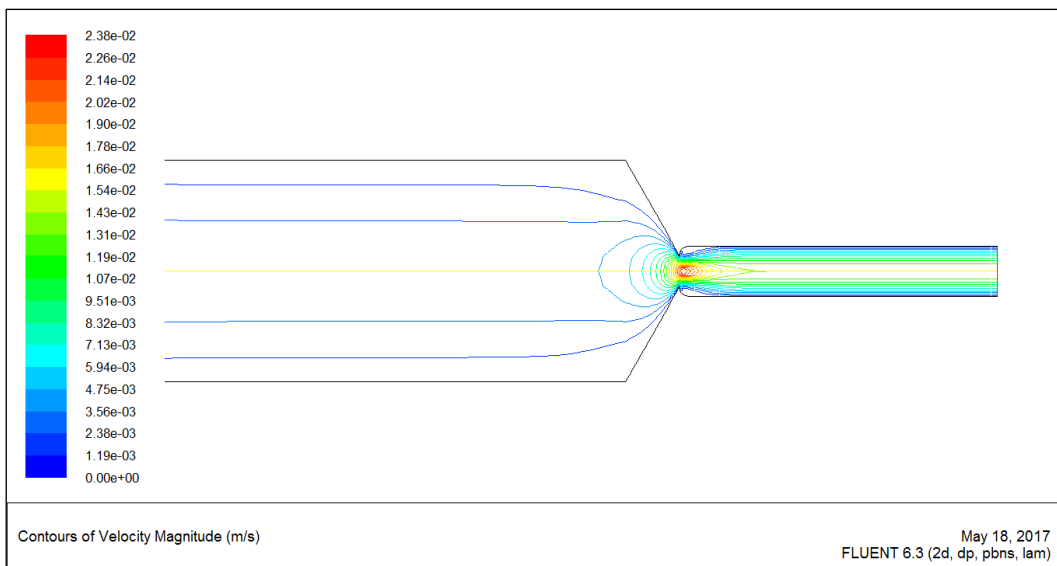
**V.4.1.3 : Influence de l'angle de convergence  $\theta$  :**

On démontre l'effet de l'angle de convergence  $\theta$  sur l'expansion du jet pour le pétrole brut régi par la loi de Herschel-Belkley.

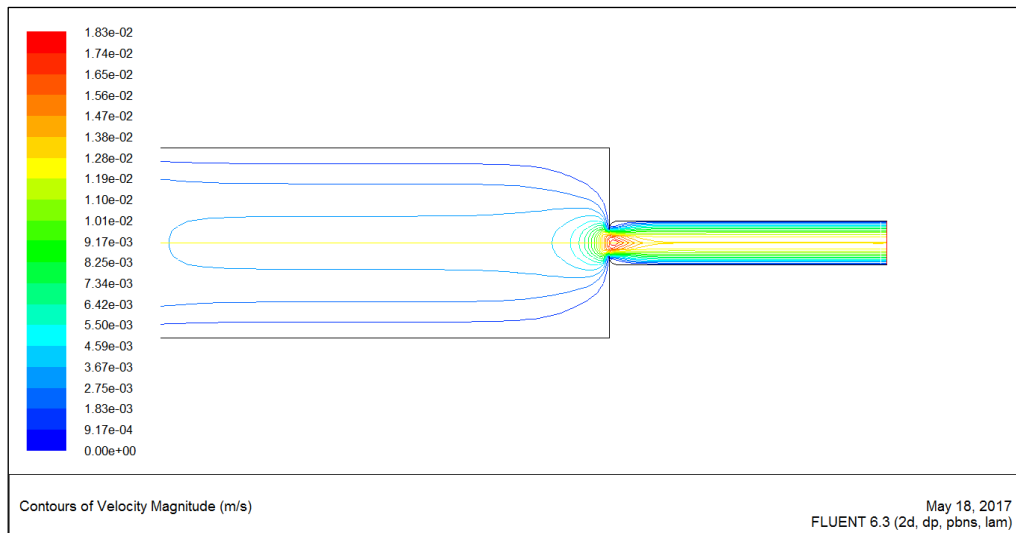
Les figures suivantes représentent l'influence de l'angle du rétrécissement sur les lignes de courant en amont et en aval de la singularité.



*Figure V.12. Lignes de courant pour :  $S= 7, R= 30\text{ mm}, \theta = 45^\circ$*

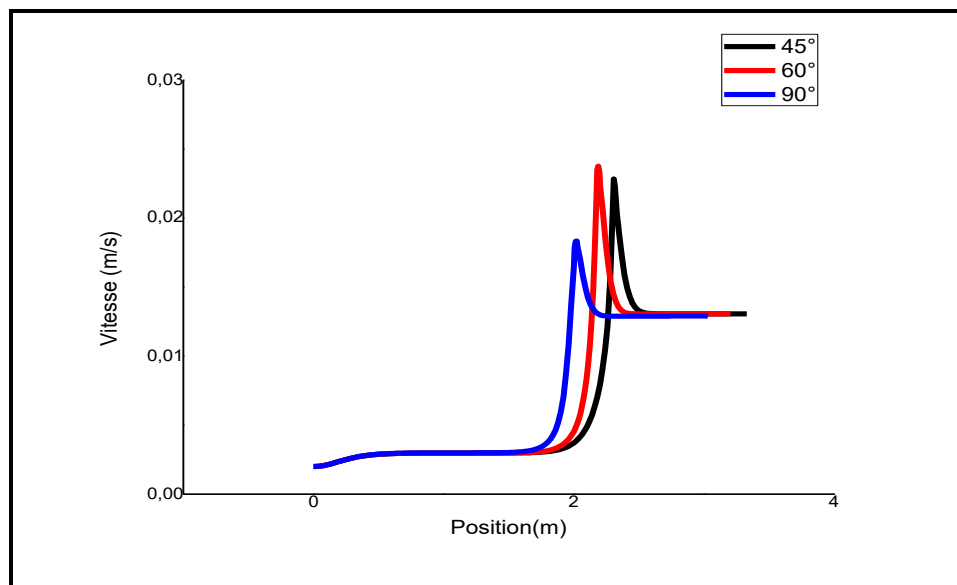


*Figure .V.13..Lignes de courant :  $S= 7, R= 30\text{ mm}, \theta = 60^\circ$*



**Figure .V.14.** Lignes de courant :  $S=7$ ,  $R=60$  mm,  $\theta = 90^\circ$

Pour l'écoulement d'un fluide plastique obeit à la loi de Herschel-Bulkley dans le convergent, il est intéressant de remarquer qu'il y a un gonflement du jet lorsque l'angle de convergence augmente. Ce gonflement du jet est à cause de l'effet de relaxation qui varie proportionnellement par la variation de l'angle  $\theta$ .



**Figure .V.15.** Variation de la vitesse en fonction de la position

De la figure V.15.on observe les courbes qui représentent la variation de l'angle de convergence  $\theta$  sur l'expansion du jet, cette variation de l'angle a une influence importante sur l'écoulement du fluide, en suivant l'évolution de l'allure des courbes on remarque que l'augmentation l'angle de convergence entraine une augmentation de la vitesse au niveau de la contraction ; tandis que sa diminution entraine une baisse de la vitesse. Un cas particulier a été



observé sur l'angle de convergence égal à  $90^\circ$ , à cette valeur bien qu'elle est grande mais sa vitesse est faible en comparant à celui de  $\theta = 60^\circ$ .

### V.4.2. Influence du paramètre rhéologique

#### Influence de l'indice de comportement $n$ :

Les figures (16) et (17) représentent les contours de vitesse de cisaillement en fonction de la position, on constate que la valeur maximale de la vitesse de cisaillement est obtenue au niveau de la contraction, diminue au niveau de la section rétrécie et très faible près de la paroi. On observe aussi la formation des vortex qui augmente en fonction de l'indice  $n$  de comportement

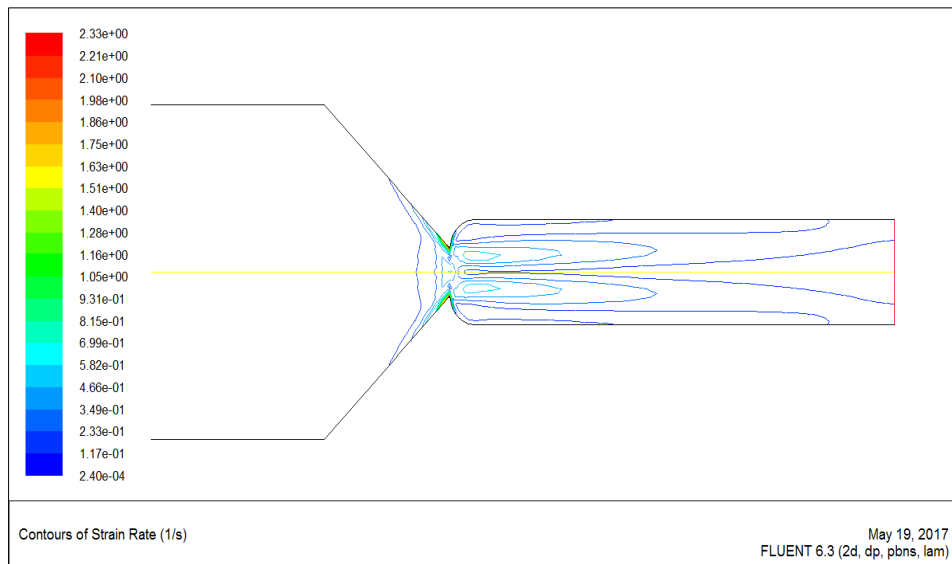


Figure.V.16. Les lignes de courant pour :  $S=7, R=60mm, \theta = 45^\circ, n=0.7$

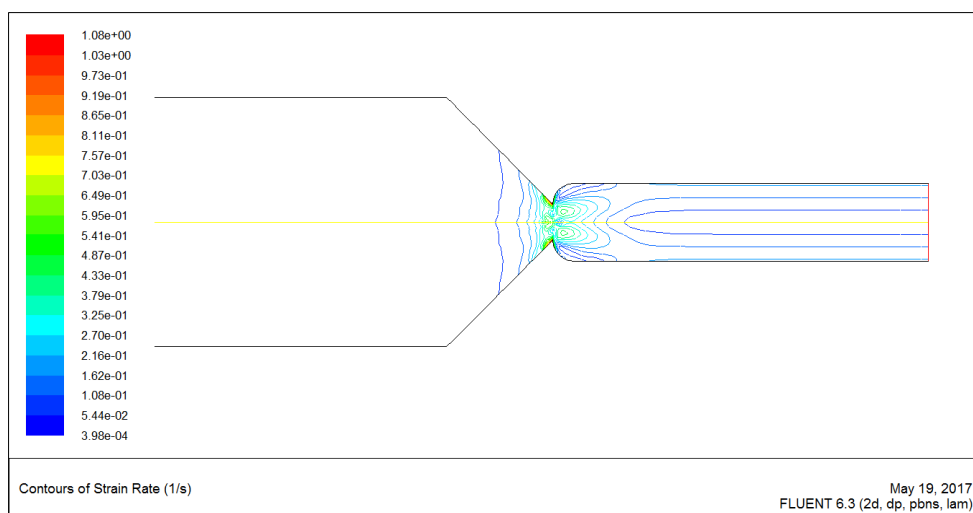
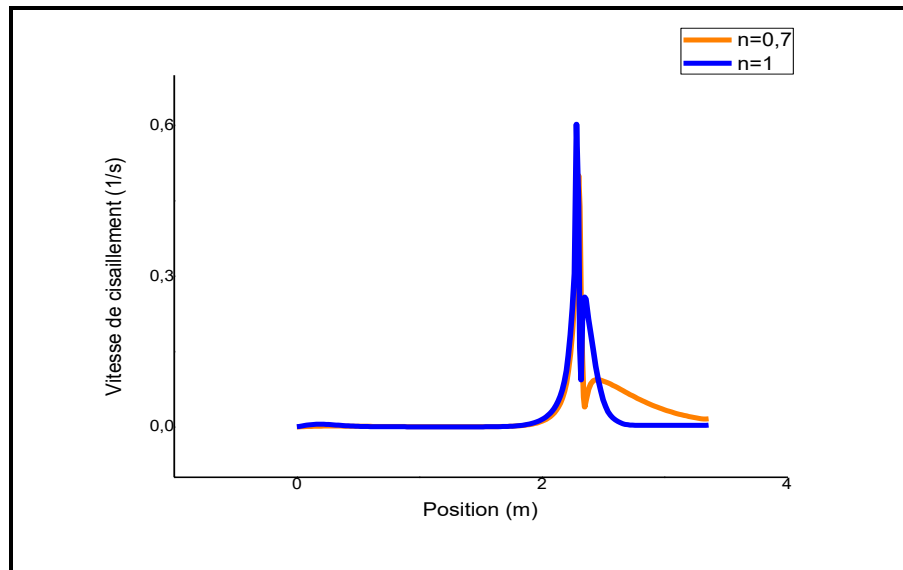


Figure.V.17. Les lignes de courant pour :  $S=7, R=60mm, \theta=45^\circ, n=1$



*Figure.V.18. Variation de la vitesse de cisaillement en fonction de la position*

La figure V.18, montre les graphes de la variation du taux de cisaillement en fonction de la position, environ suivant l'évolution des courbes on remarque un pic important du taux de cisaillement à la position 2,3m et une diminution de ce pic à la position environ 3,4m. nous remarquons aussi l'influence de l'indice de comportement  $n$ , sur le taux de cisaillement, pour  $n=0.7$  la valeur du taux de cisaillement à la position 3,4 m est supérieure à celui de  $n=1$ .

#### **V.4. Validation des résultats**

Sachant que dans chaque étude réalisée, la validation est un moyen de vérifier l'exactitude des résultats numériques obtenus.

Dans notre travail effectuer il n'ya pas question de la validation car cette étude menée a pour objectif de comprendre et de prédire le comportement du pétrole brut de la Mer du Nord dont les caractéristiques a été prisent dans la référence [15], avec un changement de la géométrie d'étude, ce qui rend impossible la comparaison des résultats expérimentales à celui des résultats numériques.

## V.5.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une simulation sur le modèle de Herschel-Bulkley, pour un écoulement a régime laminaire, permanent et l'écoulement est supposé bidimensionnel .Cela se fait dans une conduite représentant une singularité (changement de section : rétrécissement brusque).

Afin d'avoir une idée sur le comportement de l'écoulement et ces différents phénomènes résultants dans ce type de géométrie et en particulier les profiles des vitesses, le modèle est simulé avec des conditions aux limites établies sur le préprocesseur GAMBIT, les calculs et la visualisation des résultats sont effectués sur le solveur et post processeur FLUENT.

Les résultats issus de cette simulation sont satisfaisants, ils décrivent l'écoulement du fluide étudié avec beaucoup de logique, et s'avèrent assez convaincants suivant les lois de comportement des fluides non-newtoniens.

*Conclusion Générale*  
*Et Perspectives*

Dans ce mémoire, une étude de simulation numérique de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une conduite présentant un rétrécissement de section. -Application au pétrole brut, a été présentée. Nous avons présenté des définitions générales, sur la rhéologie des fluides newtoniens et non -newtoniens, du pétrole brut, de ses différents types, de ses travaux antérieurs et sa modélisation ; des différents types d'écoulements de fluide ainsi que les différentes types d'équations dynamiques des fluides et en finissant par une étude des travaux antérieurs d'écoulements dans les conduites présentant des singularités ( élargissement ,rétrécissement).

Dans le cas d'un fluide newtonien, il est facile d'augmentation la vitesse d'un écoulement, avec la conservation de débit, il suffit de diminuer la section de sortie et la vitesse de jet est importante. Par contre pour les fluides non newtonien, le choix de rapport d'aspect est difficile, car si on diminue la section la vitesse augmente jusqu'à un certain degré ou commence l'influence de la viscosité qui augmente aussi ce qui a tendance à freiner l'écoulement. Donc le choix de la vitesse de sortie de fluide doit être au choix judicieux qui prend considérablement en plus du débit (vitesse, section, Reynolds).

Pour concrétiser notre approche, nous avons fait appel au code numérique dédié aux simulations des différents fluides nommé FLUENT qui utilise la méthode des volumes finis comme base de résolution.

Cette analyse a été faite à température constante. Dans la suite de ce travail nous envisageons de faire une analyse à différents gradients de thermique afin de tenter de dégager une loi thermorhéologique susceptible de représenter le comportement des fluides utilisés dans l'industrie.

Enfin, nous dirons que ce travail nous a permis de maîtriser, surtout pour les fluides non newtonien et leurs propriétés rhéologiques, un code de calcul plus qu'utile et d'entrevoir les immenses possibilités qu'il offre aux ingénieurs et aux industriels pour faire des recherches à moindres coûts.

*Bibliographie &  
Webographie*

## Bibliographie Et Webographie

- [1] [www.reynaldrollet.wordpress.com](http://www.reynaldrollet.wordpress.com) ; Initiation à la rhéologie (article scientifique 11 Aout 2014). « Consulter le 5 juin 2017 à 12h30 »
- [2] [www.techniques-ingénieur.fr/base....th7/...de.../viscosité-bm6012niv10002](http://www.techniques-ingénieur.fr/base....th7/...de.../viscosité-bm6012niv10002).(Fluide hydraulique-Facteur d'influence-Viscosité) Article/Référence : BM6012V1, auteurs **Gérard Dallemagne**  
Publié le 10 janvier 1999. « Consulter le 7 juin 2017 à 19h15 »
- [3] [web.univ-usto.dz/archit/cours\\_Rhéologie\\_chapitre2](http://web.univ-usto.dz/archit/cours_Rhéologie_chapitre2) (document de cours). « Consulter 3 mars 2017 à 12h36 »
- [4] **Guy Couarraze, Grossiord Jean Louis, Huang Nicolas** : Initiation à la rhéologie (4<sup>ème</sup> Edition) ; Bases théoriques et applications expérimentales (ISBN 2743065680 ,9782743065683) Lavoisier 2014.
- [5] **M .Nouredine Kheloufi** : Elaboration d'une méthodologie optique pour la caractérisation rhéologique d'un matériau : Application à la mesure de la viscosité d'un fluide (thèse de doctorat : Université d'Oran Mohamed Boudiaf 2016).
- [6] [www.dms.umontreal.ca/~mat6150/Notes\\_de\\_cours/Pages79a99deMAT6150.pdf](http://www.dms.umontreal.ca/~mat6150/Notes_de_cours/Pages79a99deMAT6150.pdf) (8 Fluides non-newtonien). « Consulter le 5 juin 2017 à 14h30 »
- [7] **Jiie Y Et Jingu H**: Paleo environmental determination using visual kerogen analysis (a study of the Neogene sediments around the Tsugaru Peninsula Chishitsugaku ronshù), Vol.37, pp.207-217, 1992.
- [8] **Gourlay C**: Biodisponibilité des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les écosystèmes aquatiques (influence de la matière organique naturelle et anthropique, Thèse, Géosciences et Ressources naturelles, Ecole nationale du Génie rural, des eaux et forêts centre de paris) 2004.
- [9] **Rouichi S**: From Organic Geochemistry to Statistical Thermodynamics (the development of simulation methods for the petroleum industry) Rev .IFP, Vol.58, 2003, No.2, pp.271-297.
- [10] **Aycard M** : Géochimie des sédiments du bassin de Cariacou « Venezuela » dans le contexte de la transition glaciaire-interglaciaire Processus de sédimentation et préservation de la matière organique (Thèse de doctorat, Université LILLE I, 2004).
- [11] **Moiseeva L.S Et Aisin A.E**: Comparative tests of corrosion inhibitors in simulated media of the samaraneftegaz Oil Fields, Protection of Metals, Vol.43, No, pp.84-86, 2007.

- [12] **Aomari N., Gaudu R., Cabioch F et Omari A:** Rheology of water in crude oil emulsions (colloid and surfaces A), physicochemical and Engineering Aspect, Vol.139, pp.13- 20, 1998.
- [13] **Vinacy G., Wachs A., Agassant J-F.:** Numerical simulation of non-isothermal viscoplastic waxy crude oil flows .J. Non-Newtonian Fluid Mech, Vol.128, pp. 144-162, 2005.
- [14] **Merien Benziane M., Liazid A., Bonneau O.:** Crude oil flow modeling with the MPTT model, Mécanique & Industries 9, pp.59-70, 2008.
- [15] **Liazid Abdelkrim, Moudjeber et Djamel-Eddine :** Modélisation de l'écoulement des fluides complexes cas du pétrole brut (VIème journée d'étude Techniques 2010, the international congress for applied mechanics : cas d'un séminaire scientifique).
- [16] **Boukerma Karima :** Etude de l'écoulement laminaire accompagner du Transfert de chaleur dans une conduite rectangulaire représentant un changement de section, (Mémoire de magister : Université20 Août55, Skida ,2007).
- [17] **Ramla Mohamed :** Simulation d'un écoulement non-newtonien dans une conduite rectangulaire avec contraction brusque 4 :1 , (Mémoire de magister : Université d'Oran Mohamed Boudiaf 2014)
- [18] [www.mddelcc.gouv.qcca/eau/pluviales/chapitre7.pdf](http://www.mddelcc.gouv.qcca/eau/pluviales/chapitre7.pdf) (document de cours). « Consulter le 7 mai 2017 à 12h16 »
- [19] [Fr.viadeo.com >groups>detailldiscussion](http://fr.viadeo.com/groups/detailldiscussion) (Forum de discussion). « Consulter 13 mai 2017 à 22h10 »
- [20] [pf-mh.uvt.rnu.tn>notions-mécaniques-des-fluides](http://pf-mh.uvt.rnu.tn/notions-mécaniques-des-fluides). « Mécanique des fluides cours ». (document de cours). « Consulter 13 mai 2017 à 22h33 »
- [21] **Bekkouche Mohamed, Trari Mansour :** Etude numérique comparative entre deux conditions thermiques symétriques (Flux, Température) appliquée dans les échangeurs de chaleur. (Université de Tlemcen 2013).
- [22] **B. S. Ridley et R. J. Poole:** The Development Lengths of Laminar Pipe and channel Flows, Fluids Eng.,127,pp.1154-1160;Vol.129/1281, 2007.
- [23] **Adélio S. Cavadas, Fernando T. Pinchot, João B.L.M. Campos:** Flow Filed Of Non-Newtonian Fluids In Impinging Jets Confined By Slopping Plane Walls (14th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal, 07-10 July, 2008).
- [24] **Fu-Shu Wu et Karsten Pruess:** A numerical method for simulating non-Newtonian fluid flows and displacement in porous media, Advances in water resources, Vol .21(1998) 351-362.



- [25] **Sami Yilbas, Muhammet Yürüsoy et Mehmet Pakdemirli:** Entropy Analysis for Non-Newtonian Fluid Flow in Annular Pipe: Constant Viscosity Case, *Entropy* 2004, 6, 304-315(ISSN 1099-4300 [www.mdpi.org/entropy](http://www.mdpi.org/entropy))
- [26] **Alouche. (2000), Wielage-Burchard et Frigaard :** Pressure-Driven Displacement Flow of a Non-Newtonian Fluid by a Newtonian Fluid (A Thesis Submitted to Indian Institute of Technology Hyderabad in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Technology in Faculty of Engineering) 2013.
- [27] **T.G. Myers, J. Low:** Extensional flow of nematic liquid crystal with an applied electric field. Volume 25, issue 4, august 2014, pp.397-423.
- [28] **P. Townsend et K. Walters :** Expansion Flows Of Non-Newtonian Liquids , *Chemical Engineering Science*, Vol. 49, No. 5, pp. 149-763, 1994.
- [29] **Bockchoon Pak, Youngi. Cho et Stephen U.S. Choi:** Separation And Reattachment Of Non-Newtonian Fluid Flows In A Sudden Expansion Pipe, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 37 (1990) 175-199 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- [30] **Panagiotis Neofytou et Dimitris Drikakis:** Non-Newtonian flow instability in a channel with a sudden expansion, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 111 (2003) 127–150.
- [31] **Primož Ternik, Jure Marn, Zoran Zuni:** Non-Newtonian fluid flow through a planar symmetric expansion (Shear –thickening fluids), *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 135 (2006) 136–148.
- [32] **Paulo J. Oliveira:** Asymmetric flows of viscoelastic fluids in symmetric planar expansion geometries, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 114 (2003) 33–63.
- [33] **I.J. Keshtiban, F. Belblidia, M.F. Webster:** Numerical simulation of compressible viscoelastic liquids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 122 (2004) 131–146.
- [34] **Jonathan P. Rothstein, Gareth H. McKinley:** The axisymmetric contraction–expansion: the role of extensional rheology on vortex growth dynamics and the enhanced pressure drop, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 98 (2001) 33–63.
- [35] **S. Nigen, K. Walters:** Viscoelastic contraction flows: comparison of axisymmetric and planar configurations, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 102 (2002) 343–359.
- [36] **Manuel A. Alves, Paulo J. Oliveira, Fernando T. Pinho:** On the effect of contraction ratio in viscoelastic flow through abrupt contractions, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 122 (2004) 117–130.

- [37] **Lee-May Huang, Chin-Chin Tsai, Ta-Jo Liu** : Theoretical Analysis Of Non-Newtonian Jets Emanating From A Converging Channel , Computers & Fluids Vol. 27, No. 2, pp. 255±271,
- [38] **Kouadio Angora Trésor Wilfried** : Etude et simulation numérique des caractéristiques d'un jet d'eau abrasive dans un procédé de coupe. (mémoire de Master : Université Ibn-Khaldoun, 2016)
- [39] **Patankar**: Spalding Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. (1980).
- [40] **Guestal M.** : Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement (mémoire de Magister, Université de Mentouri, Constantine, 2010).
- [41] **T.H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu**: A new - eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation, Computers Fluids, 24(3), pp. 227-238, (1995).
- [42] **D.B. Kothe and W.J. Rider**: Practical considerations for interface tracking methods, In Sixth Intern. Symposium on C.F.D., Lake Tahoe (Nevada), A Collection of Technical Papers, pp. 628-632, (1995).
- [43] **Khaled Bilal** : Modélisation de la convection Naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi munie d'un bloc (Mémoire magister : Université Kasdi Merbah Ouargla ; 2012).
- [44] [www.djaafer.fedala@paris.ensam.fr](mailto:www.djaafer.fedala@paris.ensam.fr) « Simulation numérique des écoulements internes dans les Turbomachines, Initiation à la CFD, manuel de maillage sous Gambit et la simulation sous fluent-applications », PFE-Octobre 2007. (Consulter 7 juin 2017 à 22h30)
- [45] **Toumi Mohamed Et Siabelhadi Nasreddine** : Simulation numérique de l'écoulement des fluides non newtoniens à travers un élargissement brusque « application au pétrole brut » (Mémoire de master : Université Ibn-Khaldoun de Tiaret 2014-2015).

# *Annexes*

## Annexe

### Utilisation sommaire de FLUENT

#### 1. Préliminaire

Choisir 2 ddp  $\Longrightarrow$  Run

#### 2. Récupérer

Il s'agit de récupérer le fichier de maillage :

Menu  $\Longrightarrow$  File  $\Longrightarrow$  Read  $\Longrightarrow$  Case

Il s'agit de sélectionner le fichier de maillage obtenu sur Gambit (mesh).

- Vérifier le maillage :

Grid  $\Longrightarrow$  Check

- Afficher les dimensions de la grille :

Grid  $\Longrightarrow$  info  $\Longrightarrow$  Size

Grid Size				
Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	2366	4915	2550	1

1 cell zone, 5 face zones.

- Vérifier l'échelle :

Grid  $\Longrightarrow$  Scale

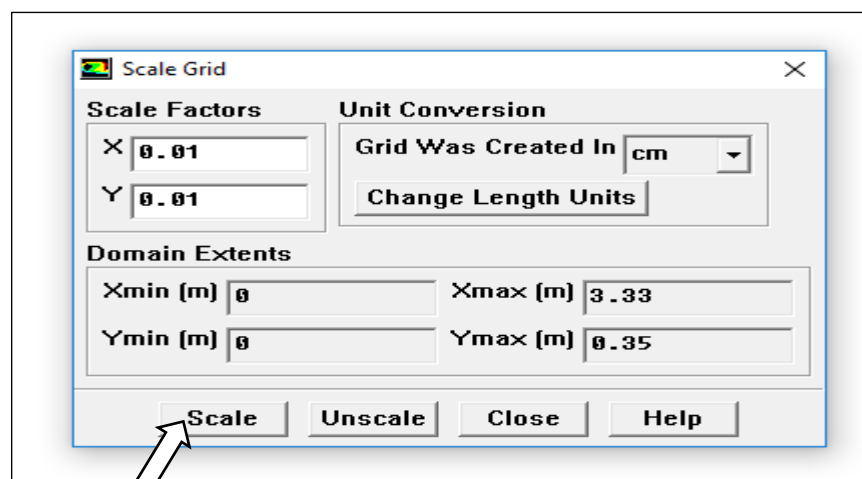


Figure .1 . Boite de dialogue pour la vérification de l'échelle

### 3. Définition du modèle :

- Choix du modèle physique :

Define  $\longrightarrow$  Models  $\longrightarrow$  Solver

Cocher les caractéristiques générales : 2D, stationnaire (Steady), pression Based et finir l'action par OK.

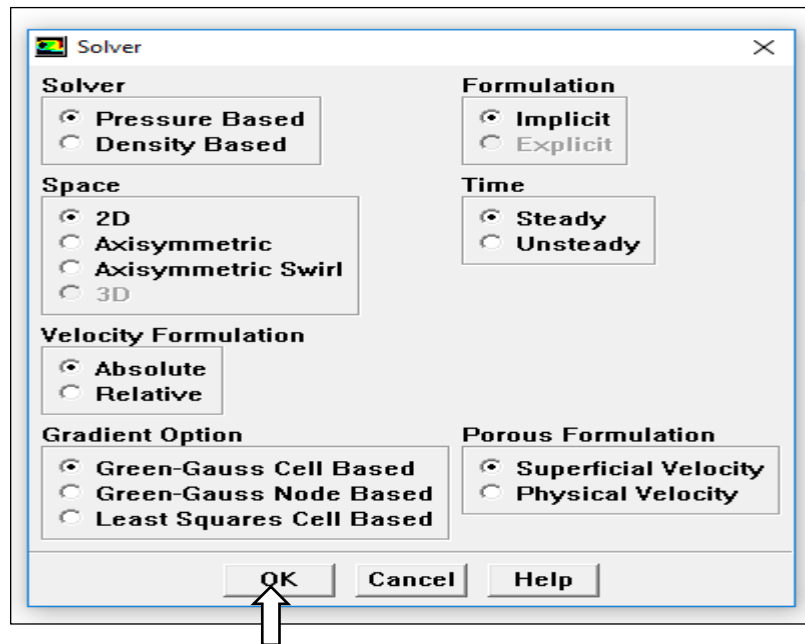


Figure.2. Boite de dialogue pour le solveur

Define  $\longrightarrow$  Models  $\longrightarrow$  Viscous

On utilise le modèle Laminar pour la résolution de cet écoulement suivit d'un OK

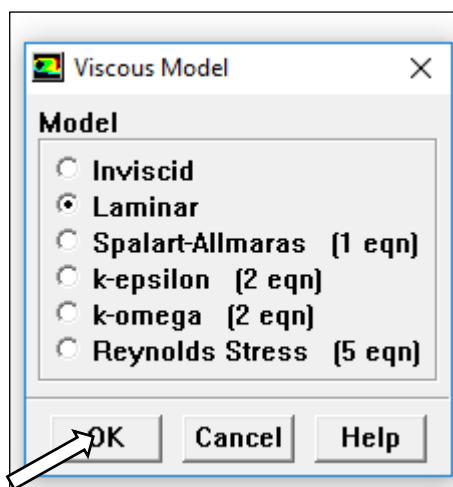


Figure.3. Boite de dialogue pour le modèle utilisé

➤ Choix des caractéristiques du fluide

Define  $\Longrightarrow$  Materials

On peut changer la viscosité et la densité du fluide (les propriétés du fluide si elle n'est pas enregistré dans les données de Fluent) pour ce faire en clique sur **User-Defined Database**. Cela vous permettra d'introduire vos données en commençant par le nom du fluide

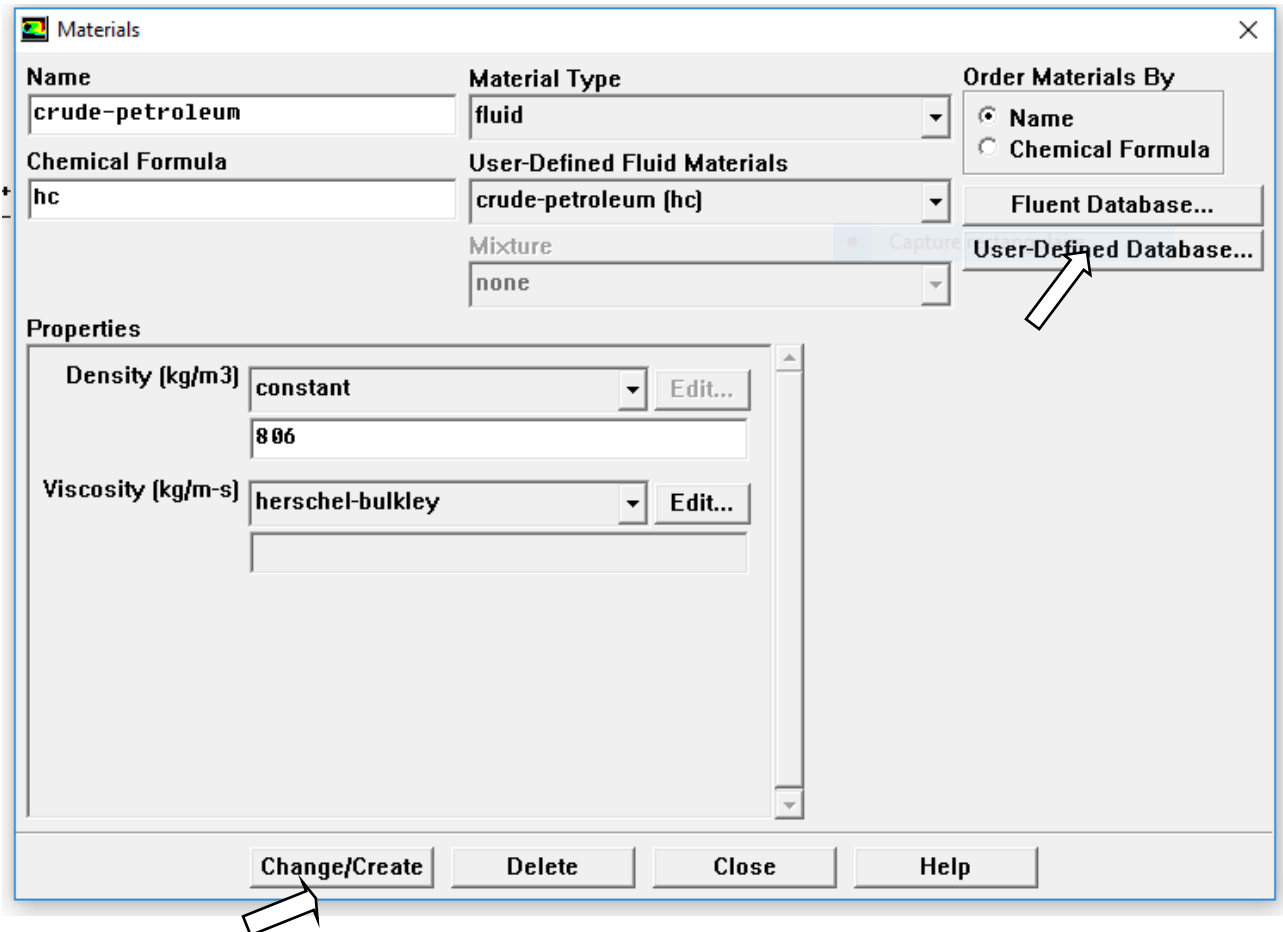


Figure .4. Boite dialogue pour le fluide utilisé

Suivit d'un ok, par la suite choisir le fluide (type Matériel) finir l'action par new et cela va te conduire sur une nouvelle boite qui te permettra d'insérer les propriétés.

A chaque opération : Edit  $\Longrightarrow$  OK

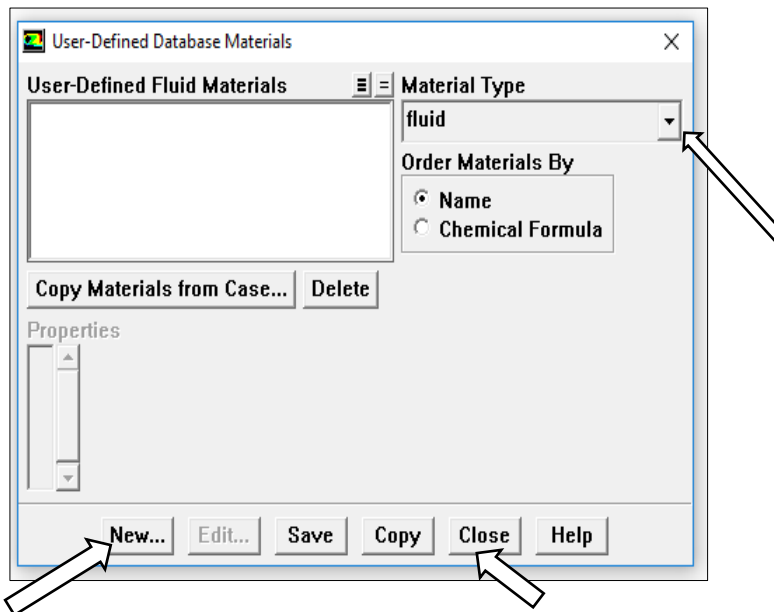


Figure .5. Boite de dialogue pour User-Database Materials

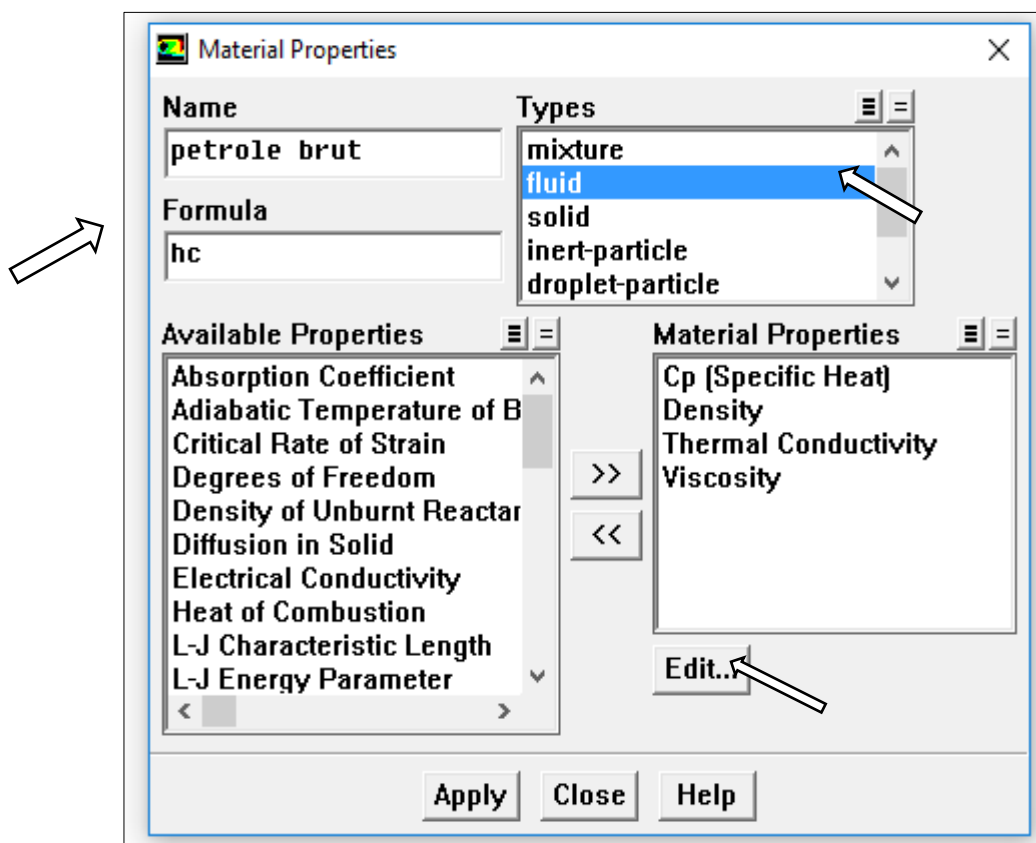


Figure.6. Boite de dialogue pour Material Properties

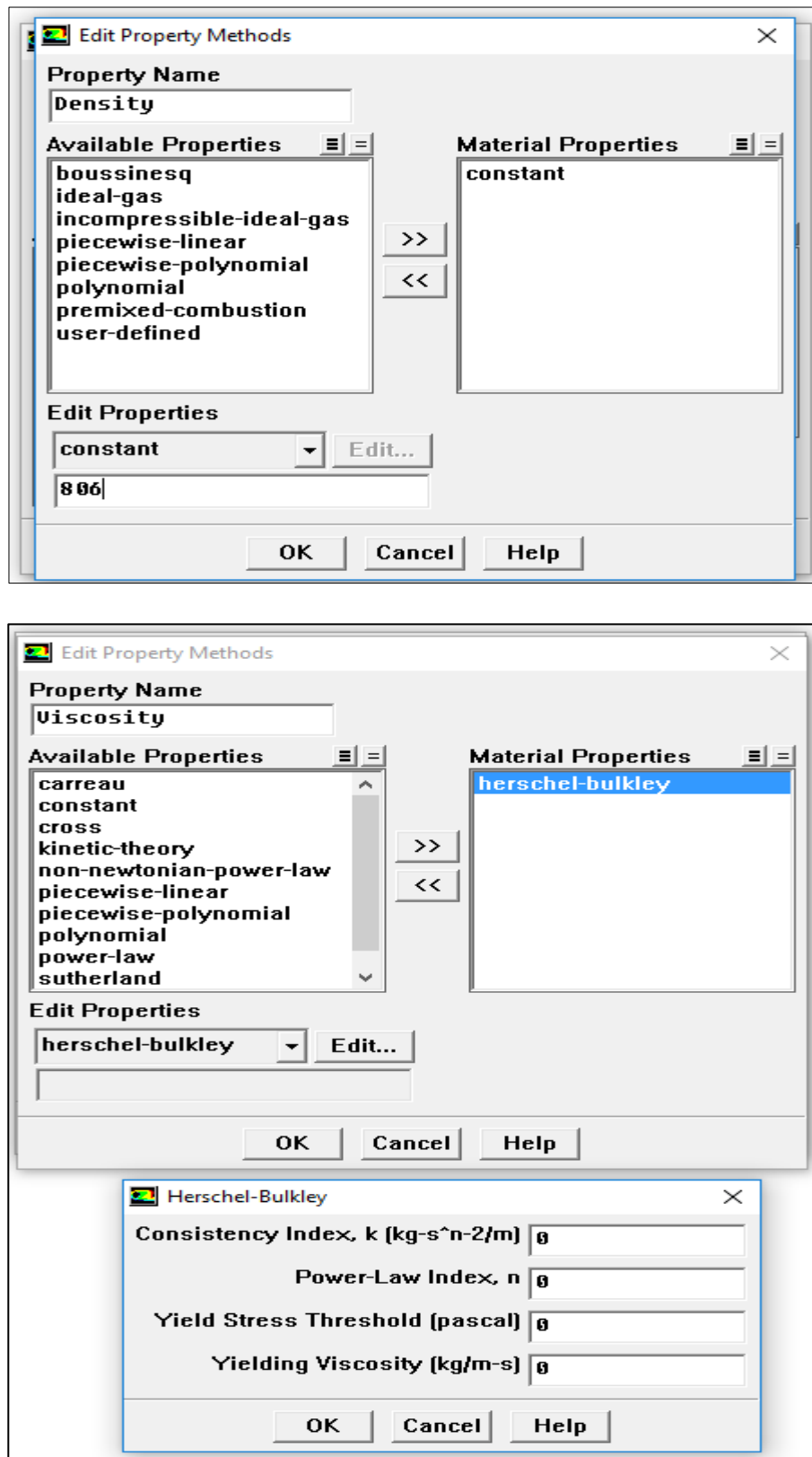


Figure .7. Boite de dialogue pour Edit Property Methods



- Choix des conditions aux limites :

Define  $\longrightarrow$  Boundary Conditions

On peut vérifier le type dans la fenêtre graphique en cliquant sur le segment désiré

$\longrightarrow$  Close

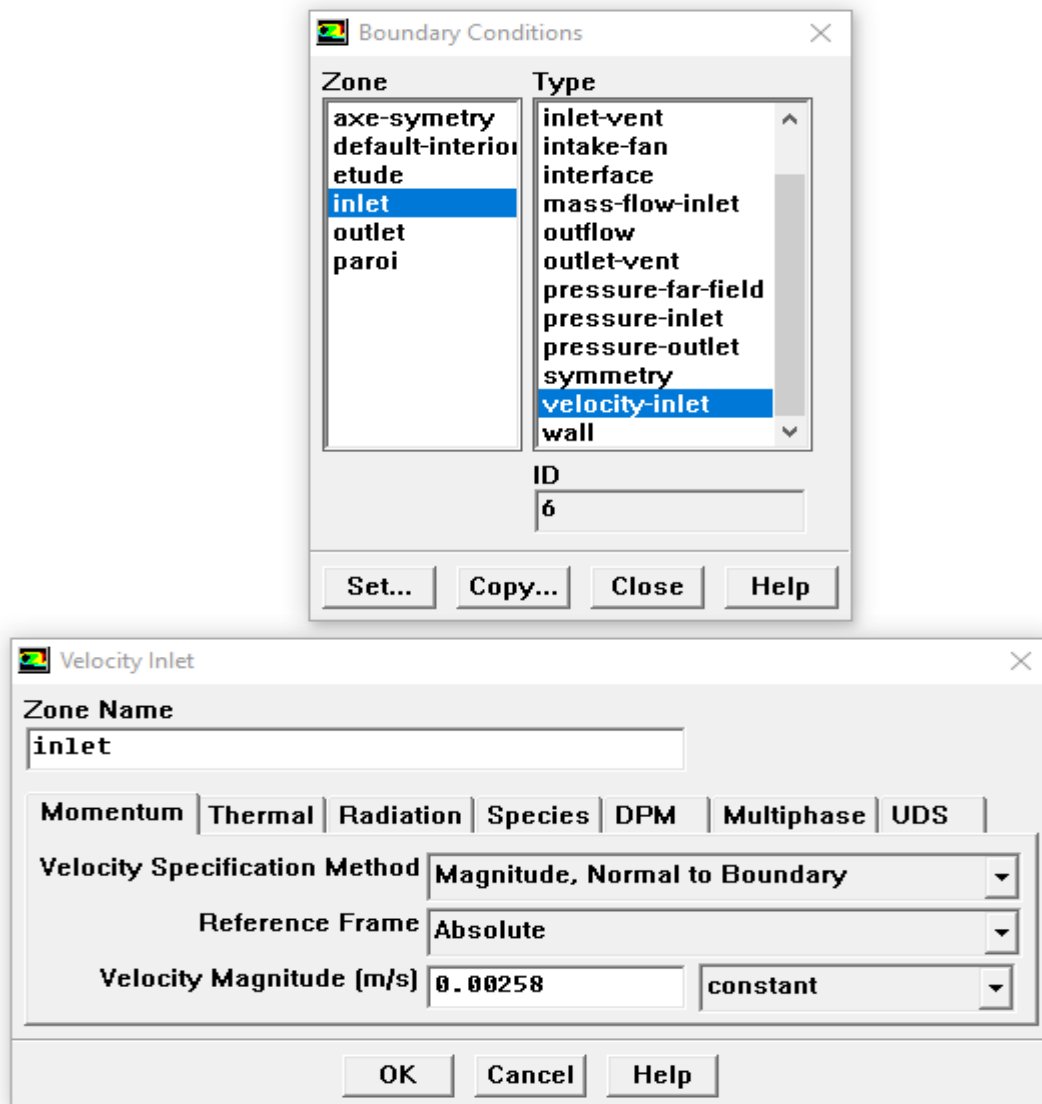


Figure.8. Boite de dialogue pour les conditions aux limites

- Choix des modèles de discrétisation :

Solve  $\longrightarrow$  Controls  $\longrightarrow$  Solution

- Choisir les modèles pour les différentes équations.

On utilise la méthode SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) pour le couplage vitesse-pression, et une discrétisation d'Upwind de 2<sup>ème</sup> ordre. On conserve les valeurs par défaut des coefficients de sous relaxation.

→ Ok

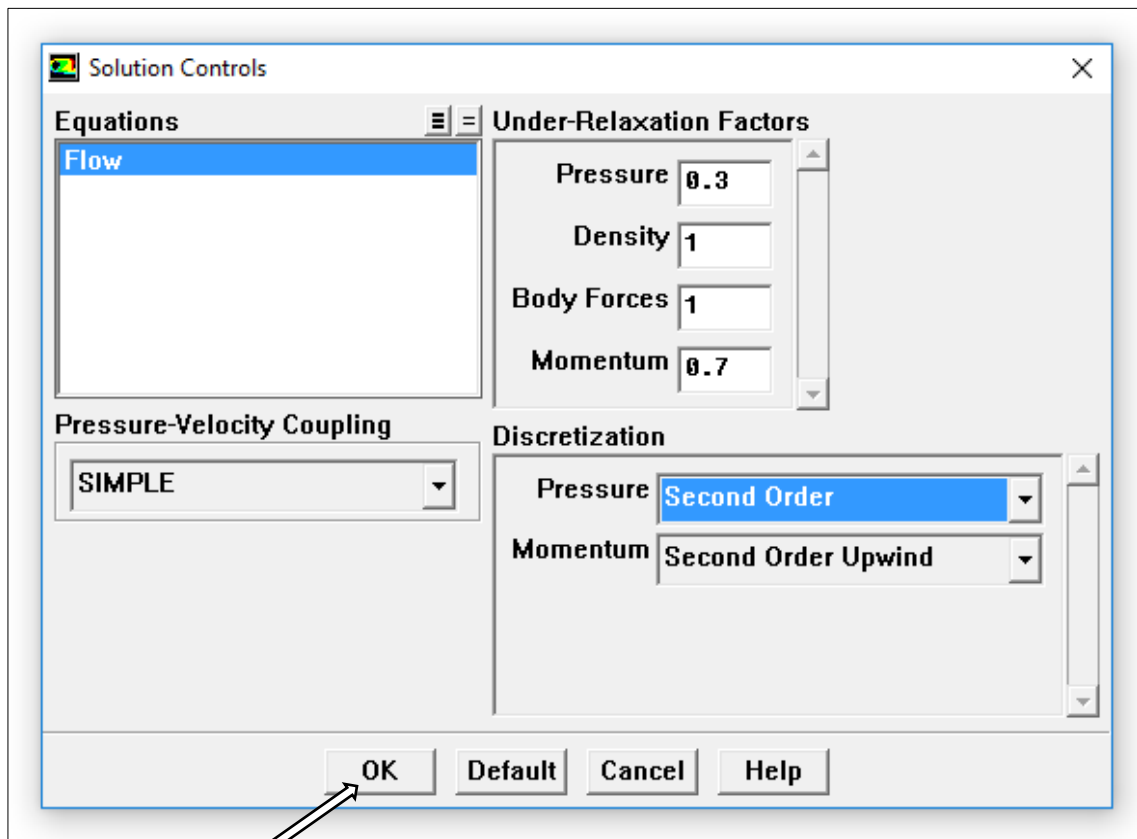


Figure.9. Boite de dialogue pour Solution Controls

#### 4. Contrôle de la convergence :

- Afficher les résidus :

Solve → Monitors → Residual

Le critère de convergence par défaut est de  $10^{-3}$ , cette valeur est généralement insuffisante pour assurer une bonne convergence. Dans notre cas, la valeur de  $10^{-6}$  a été prise.

Plot → OK

- Résolution:

Initialiser :

Solve → Initialize → Initialize

On initialise le calcul à l'entrée « Inlet »

Init → Apply → Close

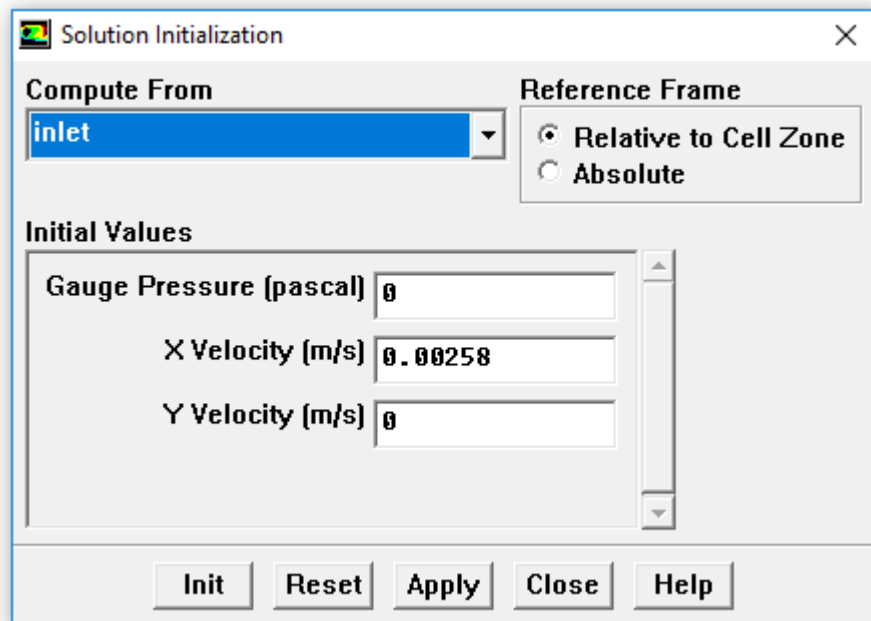


Figure.10. Boite de dialogue pour Solution Initialisation

➤ Residual :

Solve  $\rightleftharpoons$  Iterate

On donne le nombre nécessaire d'iteration, dans notre cas 1000

$\rightleftharpoons$  Iterate.

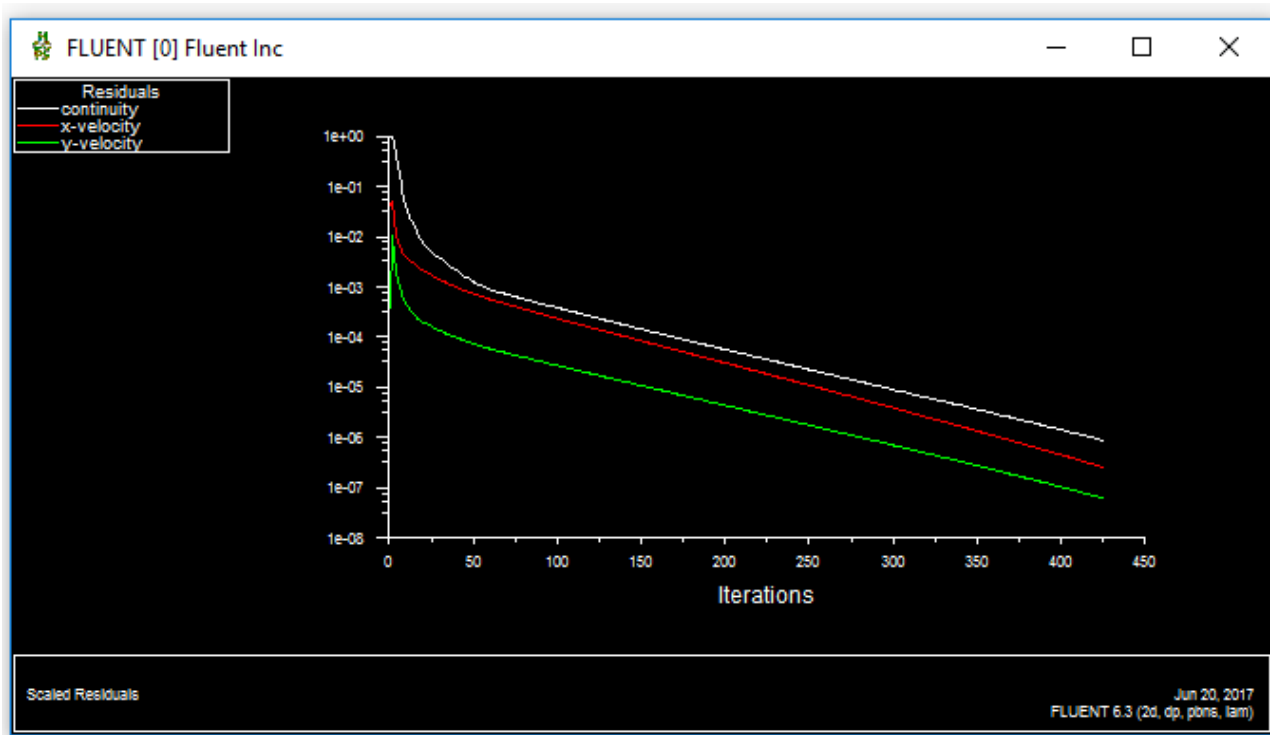


Figure.11. Courbes des résiduels

## 5. Résultats :

- Afficher des tracés :

Display  $\Longrightarrow$  ...

Choisir la caractéristique à visualiser.

- Création des lignes :

Surface  $\Longrightarrow$  Line/Rake

- Afficher des courbes :

Plot  $\Longrightarrow$  XY Plot

## 6. Sauvegarde:

File  $\Longrightarrow$  Write  $\Longrightarrow$  Case & Data

Choisir le dossier de destination.  $\Longrightarrow$  OK

## Résumé

Les études de simulations numériques des fluides non-newtoniens dans les conduites présentant des singularités (rétrécissement, élargissement), ont été l'objet de nombreuses études, afin de comprendre une variété de phénomènes qui existent dans beaucoup d'applications de l'ingénierie, telles que les difficultés inhérentes au transport des matières épaisses le cas du pétrole brute. L'objectif principal de ce travail est de prédire la compréhension du comportement rhéologique du pétrole brut de la Mer du Nord dans son écoulement dans une conduite présentant un rétrécissement en faisant recours à la simulation numérique. Dans cette optique nous avons utilisé le code de calcul Fluent pour la simulation numérique pour lequel le modèle choisi pour le pétrole brut est celui de Herschel-Bulkley. Les résultats issus de cette simulation s'avèrent satisfaisants et convaincants.

**Mots clés :** Simulation numérique-Rétrécissement-Rhéologie- Code de calcul Fluent-Pétrole brut.

### ملخص

وكانت دراسات المحاكاة العددية من السوائل غير النيوتونية في الأنابيب مع شخصياته (تضييق، اتساع)، موضوع العديد من الدراسات لفهم مجموعة متنوعة من الظواهر التي توجد في العديد من التطبيقات الهندسية، مثل الصعوبات في نقل المواد الثقيلة حالة من النفط الخام. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التنبؤ فهم سلوك الريولوجية من النفط الخام في بحر الشمال في التدفق في الأنابيب مع تضييق باستخدام المحاكاة العددية. ومن هذا المنطلق البرنامج جيد CFD المحاكاة العددية النموذج المختار للنفط الخام هو هيرشيل-بلكلي. نتائج هذه المحاكاة هي مرضية ومقنعة. كلمات البحث: الرقمية يتقلص Rhéologie-محاكاة كود حساب يجيد خام النفط.

## Abstract

Studies of numerical simulations of non-Newtonian fluids in conduits with singularities (shrinkage, widening) have been the subject of numerous studies in order to understand a variety of phenomena that exist in many applications of engineering, Such as the difficulties inherent in the transport of thick materials, the case of crude oil. The main aim of this work is to predict the understanding of the rheological behavior of crude oil from the North Sea in its flow in a shrinkage pipe using numerical simulation.

In this context, we used the Fluent calculation code for the numerical simulation for which the model chosen for crude oil is that of Herschel-Bulkley. The results from this simulation are satisfactory and convincing.

**Key words:** Numerical simulation-Shrinkage-Rheology- Calculation code Fluent-Crude oil.