

République algérienne démocratique et
populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MASTER

Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de L'obtention du Diplôme de Master Académique
Option : énergétique

intitule du sujet

Simulation numérique d'écoulements tridimensionnels non-isothermes de fluide non-newtonien : application mise en forme des Polymères

Encadré par : Chine. A

Présenté par : - Khaldoune Fouad

- Salmi Mourad

Devant le jury :

Encadreur :	Chine. A	Université de M'sila	M.C.A
Président :	Belkhiri.K	Université de M'sila	M.A.A
Examineur :	Berkache.A	Université de M'sila	M.C.B
Examineur :	ihaddadene.N	Université de M'sila	M.C.A

Année universitaire : 2018 /2019

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous'a donné, durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi pour arriver à ce jour.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur de ce mémoire, le Dr. CHINE Adel, Pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire

On dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
A mes très chers parents
À mes frères et mes sœurs et à tous la famille
khaldoune et bey ragued
À tous mes amis sans exception.*

Fouad

*Je dédie ce modeste travail
A mes très chers parents qui m'ont guidé
durant les moments les plus pénibles de ce long
chemin, à la lumière de ma vie Mama qui a été à
mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et
mon chère papa qui a sacrifié toute sa vie afin de
me voir devenir ce que je suis.
A mes sœurs et frères et à toute la famille.*

Mourad

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : généralités et définitions : procédés de mise en forme ; extrusion

1	Introduction	3
2	Description des Procédés de mise en forme de polymère	3
2.1	L'extrusion	3
2.1.1	Principe de fonctionnement d'une extrudeuse.....	4
2.2	Injection	5
2.3	Extrusion soufflage.....	6
3	Machine associée aux procédés d'extrusion	6
3.1	Extrudeuse	6
3.2	Différents types d'extrudeuse	7
3.2.1	Extrudeuse à une vis.....	7
3.2.2	Extrudeuses à deux-vis	7
3.2.3	Sens de rotation des systèmes bi-vis	8
3.2.4	Obtention du rapport de compression.....	9
4	Les filières.....	9
5	Polymères.....	10
5.1	Définition	10
5.2	Différentes classes de polymères.....	10
5.2.1	Classification selon l'origine	11
5.2.2	Classification selon l'architecture	11
5.2.3	Classification selon la structure chimique	14
5.2.4	Classification selon le comportement thermique	14
5.3	Propriétés mécaniques et thermique des polymères.....	15
5.3.1	Elasticité	15
5.3.2	Plasticité.....	16
5.3.3	Viscosité.....	16
5.3.4	Viscoplasticité	16
5.3.5	Conductivité thermique	17
5.4	Avantages et inconvénients de polymères	17
5.4.1	Avantages	17
5.4.2	Inconvénients	17

5.5	Statistiques sur la consommation annuelle des polymères	18
6	Polyéthylènes	18
6.1	Définition	18
6.2	Différents procédés de polymérisation	19
6.3	Propriétés mécaniques et thermiques de polyéthylène (PEBDL)....	19
6.3.1	Propriétés mécaniques	19
6.3.2	Propriétés thermiques	20
6.4	Utilisation industrielle	20
6.5	Taux de consommation mondiale.....	20

Chapitre II : rhéologie et lois de comportement

1	Définition de la rhéologie	21
2	Types des fluides de point de vue rhéologique	22
2.1	Fluides newtoniens	22
2.2	Fluides Non-newtoniens	22
2.2.1	Fluides rhéofluidifiants	22
2.2.2	Fluides rhéoépaississants.....	23
2.2.3	Fluides viscoélastiques	23
2.2.4	Fluides thixotropiques	23
3	Lois de comportement rhéologique.....	24
3.1	Modèle newtonien	24
3.2	Modèle loi de puissance	25
3.3	Modèle de Cross.....	26
3.4	Modèle de carreau.....	26
3.5	Modèle de Bingham	27
3.6	Modèle de Herschel-Bulkley	28
4	Lois de comportement rhéologique pour un fluide viscoélastique (<i>loi intégrale</i>)	28
5	Ecoulements des fluides	30
5.1	Ecoulements laminaires	30
5.2	Ecoulements turbulents.....	31

Chapitre III : modélisation mathématique et numérique

1 Introduction	32
2 géométries de domaine	33
3 Formulation mathématique	34
3.1 Equations gouvernantes	34
3.1.1 Équation de continuité.....	34
3.1.2 Équations de quantité de mouvement	35
3.1.3 Conservation d'énergie.....	35
4 conditions aux limites.....	36
5 discrétisation des équations gouvernantes	37
5-1 discrétisation de l'équation de transport pour le cas 2D	37
6 Description de la méthode de résolution par le code Fluent et gambit..	40
6.1 Préprocesseur GAMBIT.....	41
6.2 Code FLUENT.....	41
7 algorithmes de résolution	42
8 Conclusion.....	42

Chapitre IV : Résultats et discussions

1 Introduction	43
2 Résultats pour les cas isothermes	43
2.1 Caractéristiques des maillages des domaines d'études.....	43
2.2 Résultats dynamiques.....	44
2.2.1 Influence de la taille de la filière sur le comportement dynamique de l'écoulement	44
2.2.2 influence de la taille de le filière sur le comportement dynamique de l'écoulement ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ$ et 90°).....	46
2.2.3 Influence de la forme de la filière de sortie sur le comportement dynamique de l'écoulement.....	50
3 Résultats pour le cas Non-isotherme	51
4 Conclusion.....	54

Symboles

τ : Le tenseur des extra-contraintes

μ : La viscosité dynamique

ρ : La conservation de la masse

∇ : L'opérateur nabla

\vec{V} : Le vecteur vitesse

$\tau : D$: La trace (τ, D)

D : Le tenseur des taux de déformation

∇^2 : L'aplacien

τ : Le tenseur des extra-contraintes

T : terme transitoire.

C : terme de convection.

D : terme de diffusion.

S : terme source.

J_i : le flux total évalué sur chaque face du volume de contrôle

T : Le champ de température

φ : Terme de source

C_p : Capacité thermique du fluide

k_f : Conductivité thermique

η_0 : Viscosité à taux de cisaillement nul.

η_∞ : Viscosité à taux de cisaillement infinie.

$\dot{\gamma}$: Le taux de cisaillement apparent.

λ : Un paramètre matériel de temps (constant).

n : Indice de la loi en puissance.

K_i : La tenseur cinématique.

I : l'invariant généralisé de wanger.

β : désigne un paramètre lié aux propriétés du matériau.

ρ : La masse volumique.

$\eta_0(T)$: désigné la viscosité à la température de référence T_0 .

T : La température du fluide en écoulement.

T_0 : La température de référence.

Γ : indique le coefficient de diffusion.

u_i : Les composantes du vecteur de vitesse.

n : L'indice d'écoulement (*indice de rhéofluidification*).

k : L'indice de consistance.

II_D : Le deuxième invariant du tenseur de taux de déformation.

a, b : Les constantes liés au fluide.

τ_0 : La contrainte seuil du fluide de Binham.

$m(t - t')$: correspond à la fonction mémoire du fluide.

$C_t^{-1}(t')$: désigné le tenseur de Finger (*inverse du tenseur de Cauchy*).

Liste des figures

Chapitre I :

Fig. (I.1) : procédé d'extrusion

Fig. (I.2) : Schéma représente l'opération de l'extrusion

Fig. (I.3) : Exemple de procédé d'injection

Fig. (I.4) : Exemple de procédé d'extrusion-soufflage

Fig. (I.5) : Vue globale d'une vis sans fin d'une extrudeuse

Fig. (I.6) : Classification des systèmes bi-vis

Fig. (I.7) : Schéma descriptif d'une extrudeuse bi-vis

Fig. (I.8) : Vis sans fin à étages de diamètres différents

Fig. (I.9) : Organe malaxeur à vis conique

Fig. (I.10) : schéma d'une filière

Fig. (I.11) : Classification des architectures macromoléculaires

Fig. (I.12) : polymères linéaires

Fig. (I.13) : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

Fig. (I.14) : Polymère réticulé avec ponts disulfure reliant deux chaînes

Fig. (I.15) : Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin

Fig. (I.16) : Comportement élastique linéaire représenté schématiquement par un ressort

Fig. (I. 17) : Comportement élastique et plastique parfait

Fig. (I. 18) : Comportement visqueux linéaire représenté schématiquement par un amortisseur

Fig. (I.19) : consommation mondiale de polymères biodégradables par région en 2018

Fig. (I.20) : Différents types de polyéthylène

Fig. (I.21) : consommation de PDEL en 2016

Chapitre II :

Fig. (II.1) : Classification des comportements

Fig. (II.2) : Profils de contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement pour certains fluides rhéoépaississants.

Fig. (II.3) : Courbe d'hystérésis pour fluides Non-newtonien : (a) fluide thixotrope rhéofluidifiant, (b) fluide thixotrope à seuil de contrainte (plastique).

Fig. (II.5) : Courbe de viscosité pour le fluide de carreau

Fig. (II.4) : Vue des lignes de courant, (a) : écoulement laminaire, (b) : écoulement turbulent.

Chapitre III :

Fig. (III.1) : domaine d'étude concernant la conduite cylindrique

Fig. (III.2) : domaine d'étude concernant la conduite a contraction angulaire

Fig. (III.3) : domaine d'étude concernant la conduite triangulaire

Chapitre IV :

Fig. (IV.1) : Vue globale du maillage M1 adopté pour les simulations en conduite cylindrique à contraction brusque.

Fig. (IV.2) : Isovaleurs de la composante axiale de la vitesse V_z à la sortie de la conduite cylindrique à contraction brusque pour différentes tailles de la filière de sortie.

Fig. (IV.3) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement pariétale τ_{rz} à la sortie de la conduite cylindrique à contraction brusque pour différentes tailles de la filière de sortie.

Fig. (IV.4) : Allure des lignes de courant au niveau de la contraction brusque pour différentes rapport de contraction.

Fig. (IV.5) : Isovaleurs des composantes axiales V_x de la vitesse le long de la direction d'écoulement pour différentes angles de convergent

Fig. (IV.6) : Isovaleurs de la contrainte pariétale τ_{rz} le long de la direction d'écoulement Z pour différentes angles de convergent

Fig. (IV.7) : Isovaleurs de la pression effective p_{eff} le long de la direction d'écoulement z pour différentes angles de convergent.

Fig. (IV.8) : Isovaleurs de la composante axiale V_z de la vitesse le long de la direction d'écoulement pour différentes formes géométriques de la filière de sortie.

Fig. (IV.9) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement pariétale τ_{rz} le long de a conduite cylindrique à contraction brusque : (a) filière triangulaire, (b) : filière cylindrique de sortie.

Fig. (IV.10) : Isovaleurs de la composante axiale V_z de la vitesse le long de la direction d'écoulement. (a) Cas Non-isotherme, (b) : Cas isotherme.

Fig. (IV.11) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} le long de la conduite cylindrique à contraction brusque : (a) Cas Non-isotherme, (b) : Cas isotherme.

Fig. (IV.12) : Isovaleurs de la Température pour différentes positions z le long de la direction d'écoulement.

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Paramètres de fonction mémoire du PEBDL (modèle de Wagner), D'après Carreau et al (2001)

Tableau IV.1 : Test de maillage (conduite cylindrique à contraction brusque).

Introduction générale

L'écoulement des polymères fluides dans des géométries à sections complexes est connu dans plusieurs domaines, notamment le domaine pétrolier, celui de mise en forme et agroalimentaire, etc., où la variation de la géométrie entraîne des modifications considérables sur les caractéristiques physiques et dynamiques des fluides. Les conduites cylindriques occupent une place prépondérante dans les procédés de mise en forme des matières plastique, notamment les procédés d'extrusion, dans lequel la majorité des produits plastiques utilisés quotidiennement sont faits par ce procédé.

Le procédé de l'extrusion a un grand impact dans le domaine de la mise en forme des thermoplastiques, spécialement les polymères fondus. Ce procédé, introduit dans le domaine industriel dans la deuxième guerre mondiale, a été évoluée avec l'évolution des besoins quotidiens de l'être humain.

L'exigence de la vie moderne a conduit les chercheurs à améliorer continuellement ces procédés, afin de répondre mieux aux exigences du marché industriel, notamment la qualité des produits finis. Une des solutions pour l'amélioration de la qualité de ces produits est la maîtrise du comportement de ces fluides en écoulement durant le procédé de mise en forme.

L'étude expérimentale et analytique de l'écoulement des fluides devient compliquée avec la complexité de l'écoulement et les relations mathématiques qui interprètent leurs états physiques. Donc l'utilisation de la modélisation numérique devient un outil important et indispensable pour la réalisation de cette étude et la compréhension de ces phénomènes.

L'objectif de la présente étude est la compréhension par voie numérique du comportement en écoulement de fluide Non-newtonien, à travers de conduites cylindriques à géométries complexes. Les caractéristiques physiques et thermiques du fluide adopté pour nos simulations sont ceux du polyéthylène Basse Densité Linéaire PEBDL, mesurées à 433 [K].

Le présent travail a été structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre a été réservé à des généralités et définitions en relation avec les procédés de mise en forme des polymères fondus. La description du polymère adopté pour nos simulations a été aussi présentée, afin de clarifier l'importance de cette matière dans l'industrie de mise en forme des matières plastiques.

Dans le deuxième chapitre nous avons présente les notions de base associées à la discipline rhéologie, science de la matière en écoulement. Une brève présentation des lois régissant le comportement rhéologique du fluide en écoulement a été aussi présenté. Ce chapitre a été terminé par une brève discussion sur les types d'écoulement rencontrés dans le domaine industriel.

Le troisième chapitre a été réservé à la formulation mathématique et numérique du problème à étudié. Une brève présentation du code Fluent et du meilleur automatique GAMBIT a été aussi exposée.

Les résultats numériques obtenus par nos simulations, ainsi que leurs discussions, ont été présentés dans le dernier chapitre (*chapitre quatre*). Ce dernier a été clôturé par une conclusion résumant l'essentiel des résultats obtenus.

Ce travail a été finalisé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

1 Introduction

Le procédé de l'extrusion a un impact fondamental dans le domaine de la mise en forme des thermoplastiques, spécialement les polymères fondus. Ce procédé, introduit dans le domaine industriel dans la deuxième guerre mondiale, a été évoluée avec l'évolution des besoins quotidiens de l'être humain. L'exigence de la vie moderne a conduit les chercheurs d'améliorés continuellement ces procédés, afin de répondre mieux aux exigences du marché industriel, notamment la qualité des produits finis.

Le problème de décollement de la couche limite dans la filière de l'extrudeuse (*filière à contraction brusque*), est l'un des problèmes majeurs influant de manière directe sur la qualité des produits finis. Les recherches entamées pour la compréhension de ce genre de problème, nous révèlent que ce dernier est d'origine moléculaire. Autrement dit, le comportement physico-chimique des molécules, constituant la matière fondu (*polymère*), représente la clé principale du déclenchement de ce phénomène. Une fois ce problème est déclenché dans un écoulement confiné, la qualité des produits finis est certainement ça va dégradée (*création des zones des recirculations, endroit d'accumulation des imputées et source de perturbation pour l'écoulement*). Donc la maîtrise des conditions d'apparition de ce problème rendre facile l'élimination de ce dernier durant la production.

Les moyens expérimentales et numériques devenues actuellement les moyens préférés des scientifiques pour l'interprétation des phénomènes physiques. Le coût généralement élevé du premier, rend le moyen numérique, malgré la qualité des résultant devant l'expérimentale, le plus utilisé.

2 Description des Procédés de mise en forme de polymère

Il existe différent type de mise en forme de polymère on cite les suivants :

2.1 L'extrusion

L'extrusion des polymères est un des procédés essentiels pour former les matériaux thermoplastiques disponibles en granulés ou en poudre, l'extrusion consiste à convoyer le polymère solide puis à le fondre et à le soumettre à une

pression grâce à l'action d'une vis qui tourne à l'intérieur d'un fourreau chauffé (voir figure I.1). Le polymère est ensuite forcé dans une filière d'extrusion puis refroidi, ce qui définit le type d'extrusion.

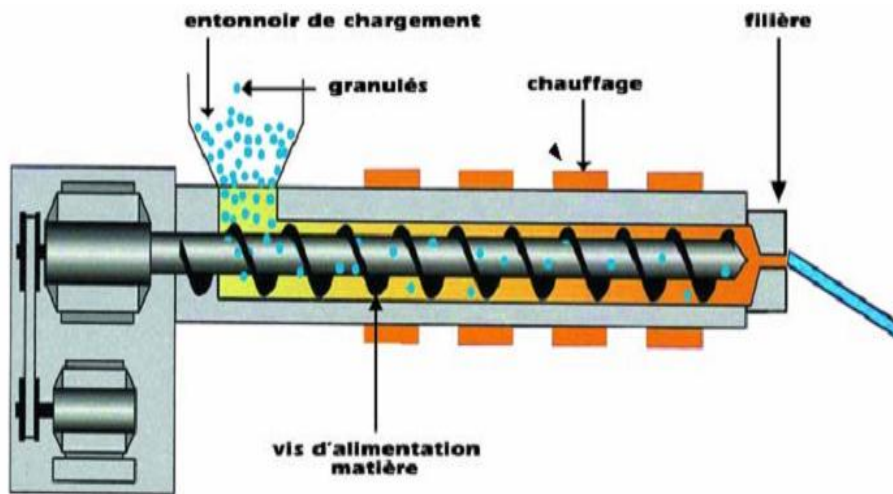


Fig. (I.1) : procédé d'extrusion

2.1.1 Principe de fonctionnement d'une extrudeuse

La principale méthode utilisée consiste à introduire la matière à la partie arrière d'une ou plusieurs vis, qui tournent dans un fourreau chauffé et remplissent la double fonction de malaxer la matière et de la forcer à travers l'outillage (*filière*) [1]. Les machines qui réalisent cette opération sont appelées extrudeuses. L'ancienne appellation "boudineuse" n'est plus utilisée. Le principe de l'extrudeuse était déjà matérialisé par les machines de fabrication des pâtes alimentaires, avant d'en arriver au boudinage du caoutchouc, qui précède de peu l'extrusion des thermoplastiques. Fondamentalement, une extrudeuse comprend une chambre chauffée, généralement horizontale, appelée fourreau, dans laquelle tournent une ou plusieurs vis entraînées par un réducteur motorisé. Ces vis, qui tournent dans une chemise en acier durci avec un jeu intérieur à quelques dixièmes de millimètres, provoquent un mélange, une chaleur de friction et une homogénéisation. Elles forcent la matière à travers des zones de chauffage graduelles, soigneusement contrôlées. À l'entrée du fourreau, située une trémie qui permet l'alimentation de la machine en matière à extruder. Cette matière peut être amenée réchauffée ou non soit sous forme de granulés, soit sous forme de poudre, préparés à l'avance. À la sortie du fourreau se trouve une tête qui permet le raccordement de la filière. À la sortie de la filière le profilé obtenu est chaud et déformable. Il doit être maintenu et refroidi pendant sa mise en forme définitive,

opérations pour lesquelles des systèmes différents sont utilisés, le profilé est souvent calibré lors de son refroidissement pour assurer le respect des formes et des cotes imposées. Le profilé refroidi est entraîné au moyen d'un dispositif de tirage à vitesse réglable, puis réceptionné en rouleaux ou en longueurs (*après sectionnement*).

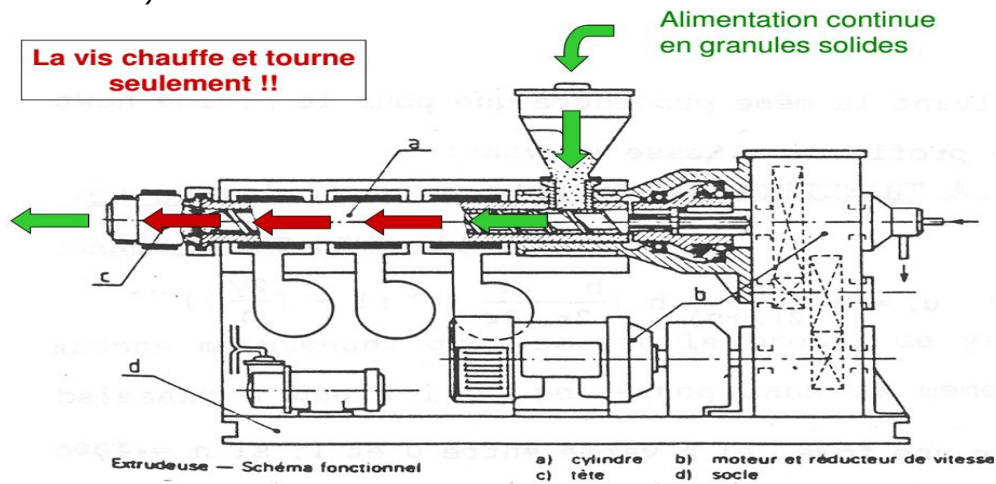


Fig. (I.2) : Schéma représente l'opération de l'extrusion

2.2 Injection

La matière première sous forme de poudre ou de granules entre dans un cylindre chauffé au milieu duquel tourne une vis sans fin, qui l'homogénéise. La matière ramollie accumulée devant la vis est poussée dans un moule fermé qui va ensuite s'ouvrir et éjecter la pièce. Cette technique est utilisée pour la fabrication de coupelles, gobelets, jouets, semelles pour chaussures, etc.

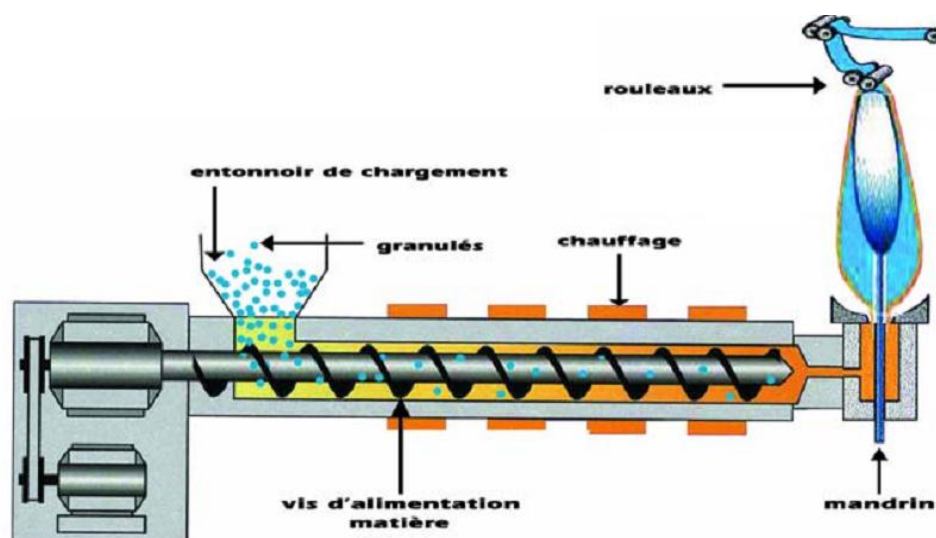


Fig. (I.3) : Exemple de procédé d'injection

2.3 Extrusion soufflage

Cette technique est généralement utilisée pour la production de flacons et bouteilles opaques (bouteille de lait, flacon de détergent). La première étape consiste à extruder un tube de matière chaude au travers d'un moule ouvert. Ensuite, le moule creux se referme sur une section de ce tube et le coupe. De l'air sous pression est alors insufflé dans le tube encore chaud, lui faisant épouser les parois du moule. Après refroidissement, le moule libère le produit fini, un corps creux.

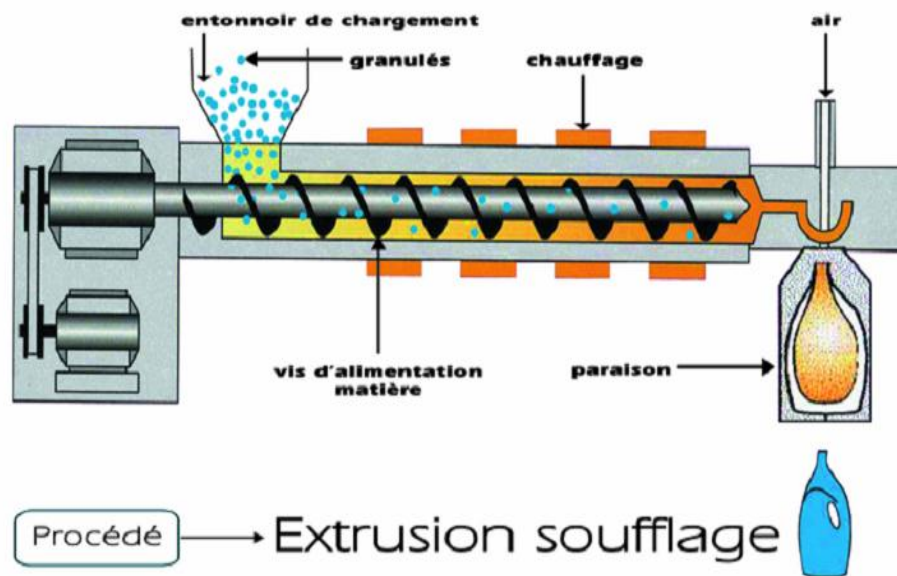


Fig. (I.4) : Exemple de procédé d'extrusion-soufflage

3 Machine associée aux procédés d'extrusion

3.1 Extrudeuse

Une extrudeuse est une machine utilisée principalement dans le domaine de mise en forme des polymères, son rôle important dans ce secteur la rendue une machine indispensable dans la fabrication plastique, cette machine est constituée essentiellement de :

- Vis sans fin ;
- Foureau ;
- Réservoir d'alimentation en matière première (*grains de polymère*) ;
- Filière ;
- Moteurs électrique assurant la rotation de la vis sans fin.

3.2 Différents types d'extrudeuse

3.2.1 Extrudeuse à une vis

Les extrudeuses mono vis sont caractérisées par le diamètre et la longueur de la vis. Cette longueur est exprimée en multiples du diamètre. Habituellement, les longueurs de vis se situent entre 15 et 30 diamètres.

Les extrudeuses font appel à une source de chaleur extérieure. La chaleur nécessaire à la gélification est fournie par le frottement de la matière plastique sur la vis et le fourreau, ainsi que par la compression et la friction des particules de matières plastiques entre elles sous l'effet de cisaillement et de compression de la vis en rotation.

Il faut noter que ces extrudeuses se comportent également dans une certaine mesure en extrudeuses adiabatiques. En effet, les calories nécessaires à la gélification sont apportées dans une proportion variable par l'énergie thermique extérieure et par les frictions internes [3].

Les vis sont généralement percées dans le sens de leur longueur, ce perçage ne débouchant pas du côté sortie matière. Ce forage permet la thermorégulation de la vis.

Les vis des mono vis sont interchangeables en fonction de la nature et des caractéristiques des matières thermoplastiques.

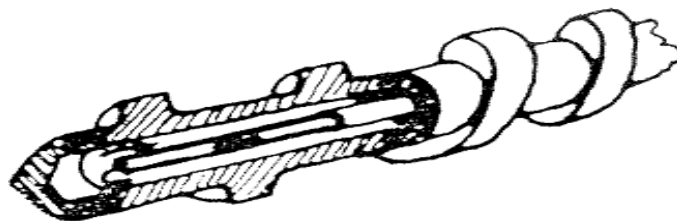


Fig. (I.5) : Vue globale d'une vis sans fin d'une extrudeuse

3.2.2 Extrudeuses à deux-vis

Les extrudeuses double-vis sont particulièrement bien adaptées à la transformation de matières thermoplastiques pulvérulentes. La double vis à filets interpénétrant agit alors comme une pompe à vis.

Les double-vis sont d'un usage de plus en plus répandu, en particulier pour la transformation du PVC rigide.

À capacité équivalente la puissance-moteur est moins importante sur les double-vis que sur les mono vis, du fait que les frictions internes sur la matière sont moins élevées. Par contre, l'apport thermique du chauffage est supérieur pour assurer une même gélification [3].

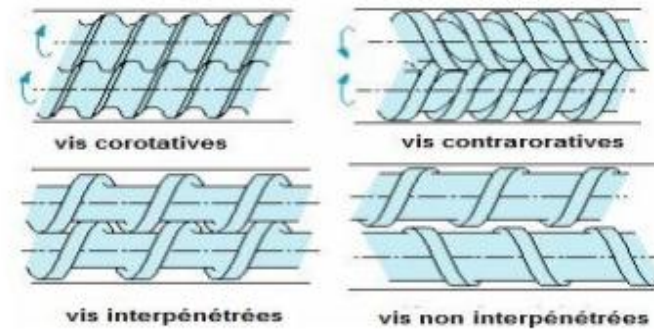


Fig. (I.6) : Classification des systèmes bi-vis

3.2.3 Sens de rotation des systèmes bi-vis

a) Les deux vis tournent dans le même sens. La matière a tendance à parcourir un chemin en huit, mais sans passer par le point de contact des vis. L'avantage se traduit par une augmentation du chemin parcouru par la matière. L'échauffement est plus régulier.

b) Les deux vis tournent en sens inverse (*contre-rotation*). La matière passe entre les deux vis et subit de ce fait un malaxage très important qui facilite la gélification.

Dans l'état actuel des techniques une seule conception est à retenir pour les double-vis coniques, c'est le principe de la contre-rotation.

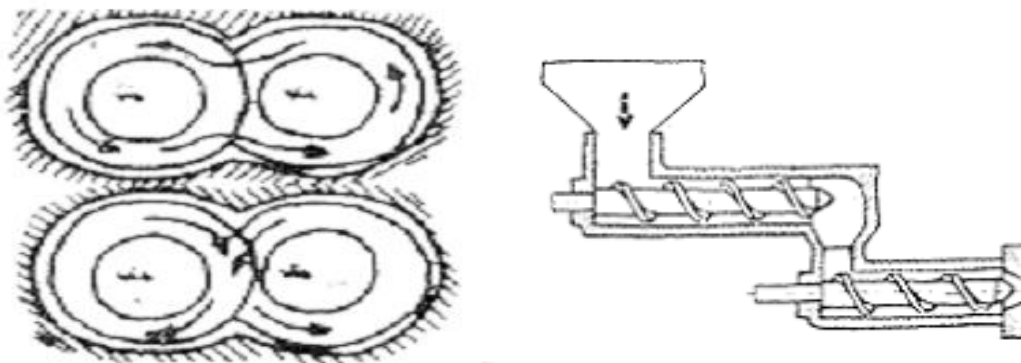


Fig. (I.7) : Schéma descriptif d'une extrudeuse bi-vis

3.2.4 Obtention du rapport de compression

Chaque constructeur propose sa méthode pour obtenir ce rapport sur la profondeur, et par la forme des filets. On trouve aussi des vis à étages de diamètres différents et d'autres coniques à axes convergents.



Fig. (I.8) : Vis sans fin à étages de diamètres différents

Plusieurs constructeurs prévoient maintenant des vis à différentes zones et intercalent parfois entre celles-ci des disques ou cylindres, lisses ou entaillés, qui agissent comme organe malaxeur ou créent des zones de décompression et de dégazage.



Fig. (I.9) : Organe malaxeur à vis conique

4 Les filières

La filière est une pièce placée à la sortie de l'extrudeuse comportant un ou plusieurs orifices par lesquels la matière s'écoule sous l'action de la pression. La géométrie des filières est définie par des paramètres procédés : matière première, recette, débit, dimensions produits...

La filière permet de réaliser des produits de différentes formes, tailles et structures. Elles peuvent être de conceptions différentes selon le type de produit voulu.

Elle est amovible et doit se démonter facilement pour être nettoyée ou changée. On peut classer les filières de la façon suivante :

- Filières sans poinçon pour les profils pleins (joncs, fils, plaques)
- Filières avec poinçon pour les profils creux (tube à section circulaire, rectangulaire, paraisons, gaines).

- Filières avec poinçon monté sur tête d'équerre pour la réalisation de gainage de câbles, de gaines gonflées.
- Filières pour la Co extrusion (à entrées multiples pour les profils pleins, pour le gainage et pour l'extrusion de films).

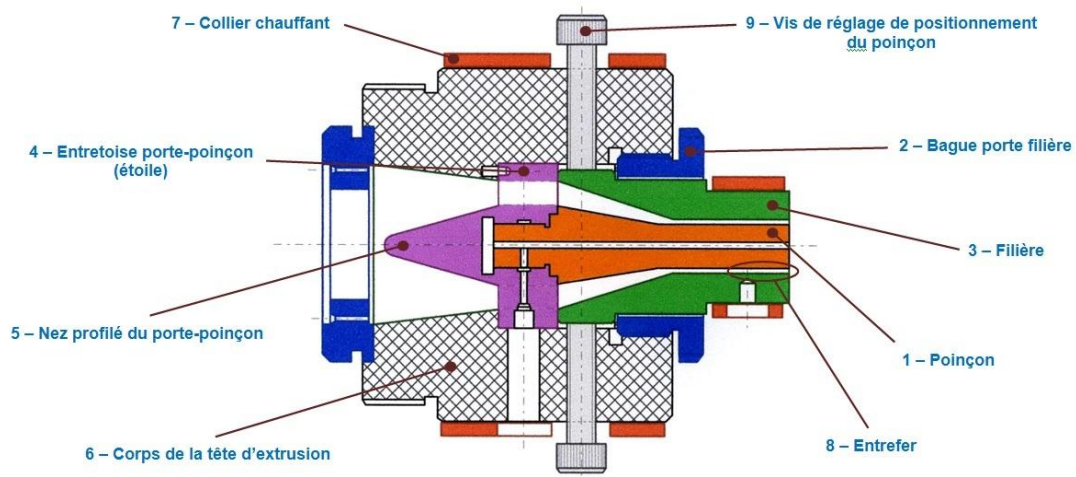


Fig. (I.10) : schéma d'une filière

5 Polymères

5.1 Définition

Le terme polymère (du grec polus qui signifie « nombreux, plusieurs » et mēros qui signifie « unité, partie ») ; est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition (exemple : Polyéthylène $(C_2H_4)_n$, Polystyrène $(CH_2)_n$, avec n représente le nombre d'unités de répétition), qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (*qui sont également appelés motifs*) et préparée à partir de molécules appelées monomères.

5.2 Différentes classes de polymères

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le type de polymérisation, comme base de la classification [2].

5.2.1 Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être :

- des polymères naturels : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine... ;
- des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple : méthyl cellulose ;
- des polymères synthétiques : ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs

5.2.2 Classification selon l'architecture

Les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.

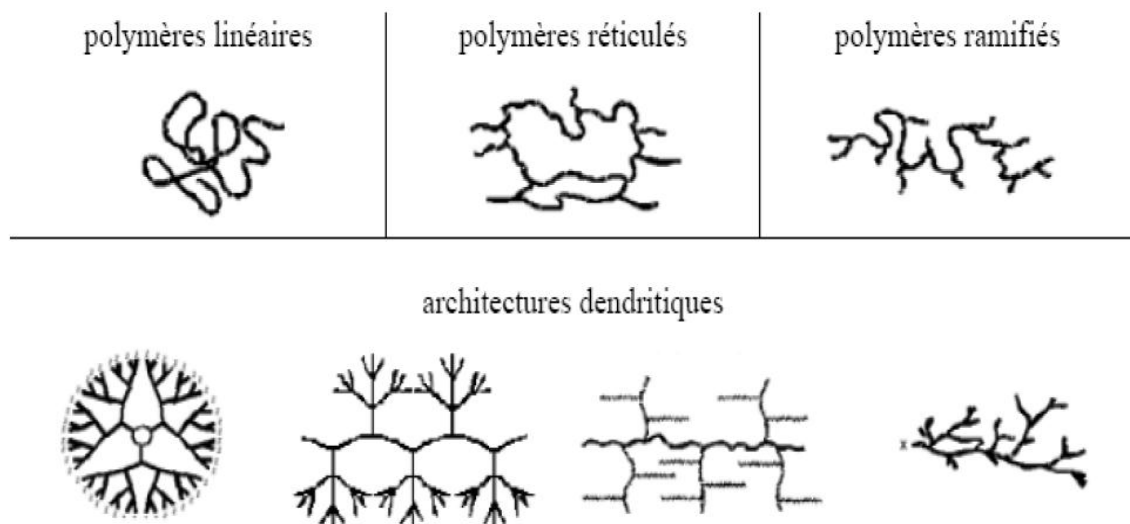


Fig. (I. 11) : Classification des architectures macromoléculaires.

a) Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces

liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de **Van der Waals**. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. La température à laquelle se produit cette évolution s'appelle la température de transition vitreuse.

La transition vitreuse correspond à l'apparition de mouvements de longs segments de chaîne et marque le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. La figure I.11 donne les différents exemples de polymères linéaires.

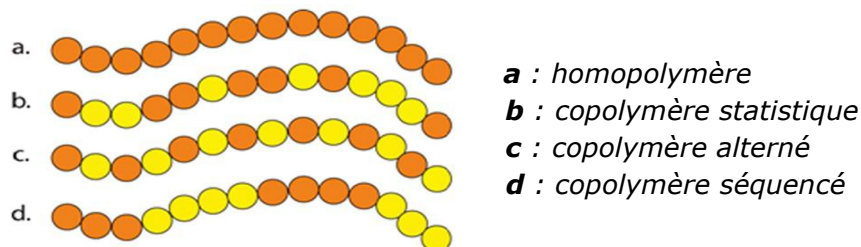


Fig. (I. 12) : polymères linéaires

Les propriétés mécaniques des copolymères varient en fonction du type et de la disposition des monomères. Les rotations de la chaîne sont facilitées ou au contraire rendues plus difficiles en fonction de la nature, de la disposition et de l'encombrement de chacun des monomères.

b) Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires.

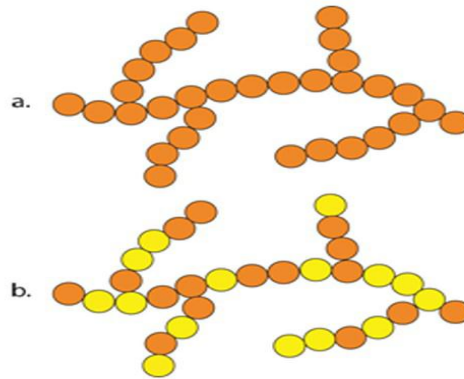


Fig. (I. 13) : Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b)

c) Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau.

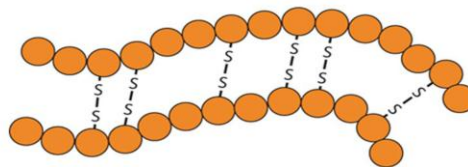


Fig. (I. 14) : Polymère réticulé avec ponts disulfure reliant deux chaînes

d) Polymères amorphes et polymères cristallisés (dendritiques)

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide figé, sans ordre moléculaire à grande distance. Il existe néanmoins des orientations macromoléculaires préférentielles. Elles peuvent être rangées régulièrement avec la constitution d'un ordre responsable d'une propriété caractéristique de l'état cristallin : l'aptitude du matériau à diffracter les rayons X selon des angles définis. Ces structures peuvent aussi être objectivables en lumière polarisée.

Dans un polymère, les deux états ordonnés et désordonnés peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline.

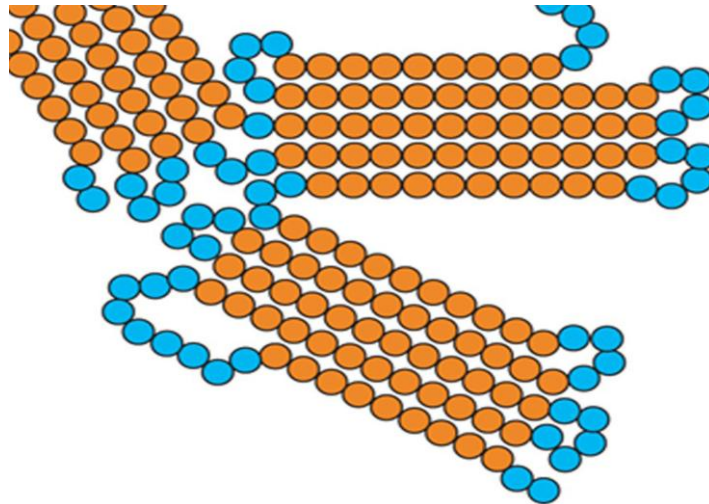


Fig. (I. 15) : Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin

5.2.3 Classification selon la structure chimique

La structure chimique des motifs permet de classer les composés macromoléculaires en deux classes, les homopolymères et les copolymères.

A) Homopolymères

Ce sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère (*une seule unité*), leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes macromoléculaires. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve : les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

B) Copolymères

Ce sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons : le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

5.2.4 Classification selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types :

A) Thermoplastiques

Ramollissent sous l'effet de la chaleur, ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables.

B) Thermodurcissables

Les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermo durcies ou thermo rigides.

C) Elastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes macromoléculaires repliées sur elles même. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent se glisser les unes par rapport aux autres et se déformer.

5.3 Propriétés mécaniques et thermique des polymères

5.3.1 Elasticité

Comportement réversible sans dissipation d'énergie, c'est-à-dire, l'énergie fournie pour déformer le matériau est totalement restituée au déchargement. On peut considérer une relation contrainte déformation linéaire aux petites déformations. Pour les caoutchoucs et élastomères le comportement élastique peut être non linéaire aux grandes déformations, typiquement au-delà de 20 % de déformation.

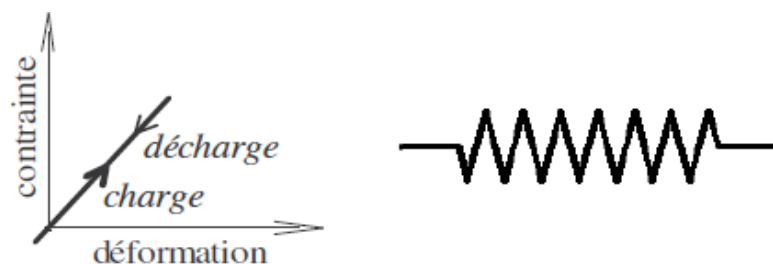


Fig. (I. 16) : Comportement élastique linéaire représenté schématiquement par un ressort

5.3.2 Plasticité

Comportement irréversible avec dissipation d'énergie mécanique, ne dépendant pas de la vitesse de sollicitation ou de sa durée d'application. Il y a une déformation résiduelle lorsque la sollicitation mécanique est supprimée.

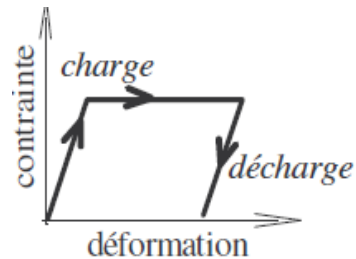


Fig. (I. 17) : Comportement élastique et plastique parfait

5.3.3 Viscosité

Comportement de type fluide avec dissipation d'énergie mécanique. L'application d'une contrainte induit une vitesse de déformation et réciproquement. En d'autres termes, si la déformation imposée ne varie plus au cours du temps, toute contrainte tend à disparaître, avec déformation irréversible.

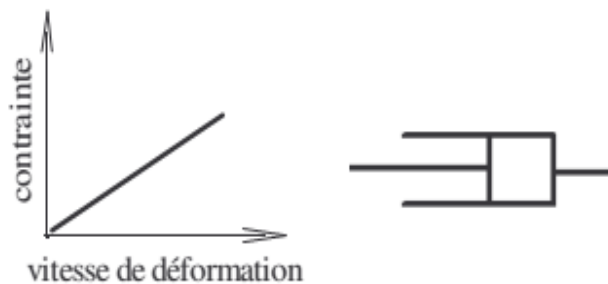


Fig. (I. 18) : Comportement visqueux linéaire représenté schématiquement par un amortisseur

5.3.4 Viscoplasticité

Comportement irréversible avec dissipation d'énergie mécanique dépendant de la vitesse de sollicitation ou de sa durée d'application. Il y a une déformation résiduelle lorsque la sollicitation mécanique est supprimée. Cette déformation résiduelle dépend de l'histoire du chargement.

5.3.5 Conductivité thermique

La conductivité thermique des polymères est faible, de l'ordre de 0.1 W.m^{-1} , le transport de la chaleur est assuré uniquement par les phonons dans une structure relativement désorganisée, l'énergie de cohésion n'étant pas suffisamment forte. Pour un amorphe, le maximum de conductivité se situe à la température de transition vitreuse. Pour un semi cristalline, on observe une conductivité plus forte de la phase cristalline.

5.4 Avantages et inconvénients de polymères

5.4.1 Avantages

1. Basse densité.
2. En faisant varier les liaisons des atomes de carbone, on peut une variété infinie de matière plastique.
3. Généralement inertes
4. Facilité de mise en forme et de moulage
5. Bon isolant thermique

5.4.2 Inconvénients

1. Détérioration par UV
2. Sensible à la température
3. Mou (bas module d'élasticité)
4. Matière première limitée
5. Susceptible au feu

5.5 Statistiques sur la consommation annuelle des polymères

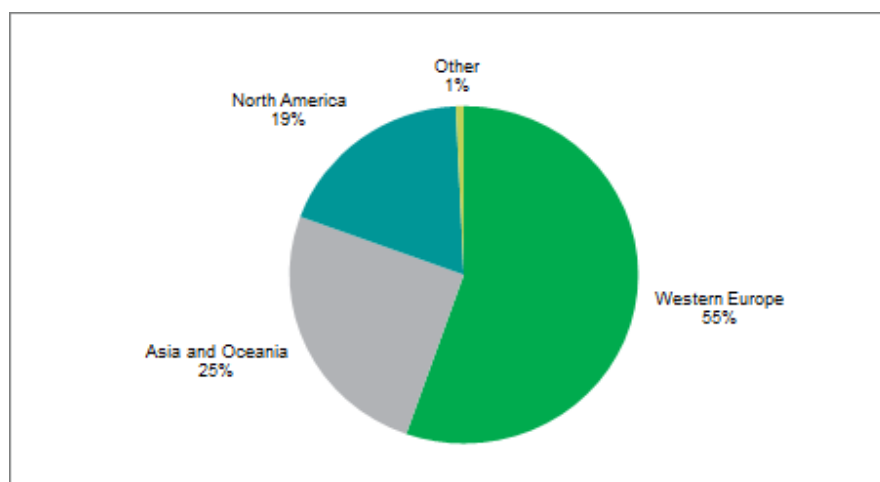


Fig. (I.19) : consommation mondiale de polymères biodégradables par région en 2018

6 Polyéthylènes

6.1 Définition

Polyéthylène est un nom générique utilisé afin de décrire les polyoléfines issues de la polymérisation de l'éthylène. Ce sont probablement les polymères les plus couramment utilisés, en effet ils sont employés pour la fabrication des sacs plastiques, des bouteilles d'emballage et de certains jouets. Il en existe de nombreux types mais ceux-ci sont généralement classés dans deux grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- polyéthylènes basse densité ou PE-BD : $0,92 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,94 \text{ g/cm}^3$.
- polyéthylènes haute densité ou PE-HD : $0,95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$.

Le polyéthylène possède également d'excellentes propriétés d'isolation électrique et de résistance aux chocs et présente une grande inertie chimique et biologique (contact alimentaire).

Il est un matériau thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène (C_2H_4) menant à des macromolécules composées par la répétition du motif $-(\text{CH}_2)-$

6.2 Différents procédés de polymérisation

Ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation :

- A partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié voire (*Figure I.20*) appelé le polyéthylène basse-densité PEbd ;
- A l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haute densité PEhd (*linéaire donc plus compact que le précédent d'où son nom*).

Il existe par ailleurs un autre type de PE, le PEmd (*moyenne densité*), mais c'est en réalité un intermédiaire entre les 2 formes, et n'a pas de caractéristique particulière ou intéressante qui mérite d'être développée. Il semble juste convenable de voir la répartition entre ces différentes formes sur la figure suivantes :

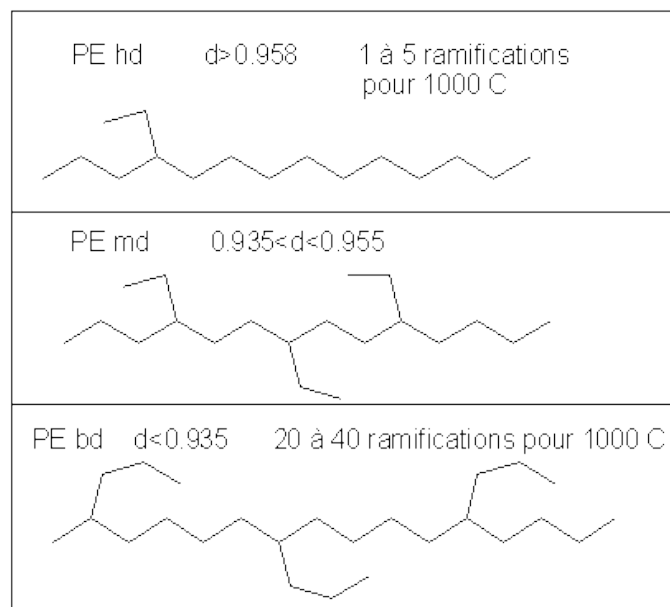


Fig. (I.20) : Différents types de polyéthylène

6.3 Propriétés mécaniques et thermiques de polyéthylène (PEBDL)

6.3.1 Propriétés mécaniques

- Contrainte à la rupture : 9-12 MPa
- Déformation à la rupture : 400-600%
- Module d'élasticité : 200-300 MPa

6.3.2 Propriétés thermiques

- Température de fusion : 110-125 °C
- Transition vitreuse (Tg) : -110 °C

6.4 Utilisation industrielle

Le PEBD est utilisé sous différentes formes à savoir :

- Films, sacs et sachets : Sacs grande contenance, Films agricoles,...
- Tuyaux et tubes
- Câblerie : Câbles d'énergie
- Corps creux : jouets 8
- Récipients ménagers ou industriels : cuvettes, pots, bouteilles ...

6.5 Taux de consommation mondiale

En Europe la consommation de matières plastiques en 2015, en croissance, a atteint 48,8 millions de tonnes". Traditionnellement, l'emballage est le secteur qui consomme le plus de matières plastiques avec 39,5% de la demande globale, suivi de la construction (20,1%), de l'automobile (8,6%) puis des équipements électriques et électroniques (5,7%). La production mondiale des matières plastiques a progressé de 3,4% en 2015, légèrement moins qu'en 2014 (+3,8%).

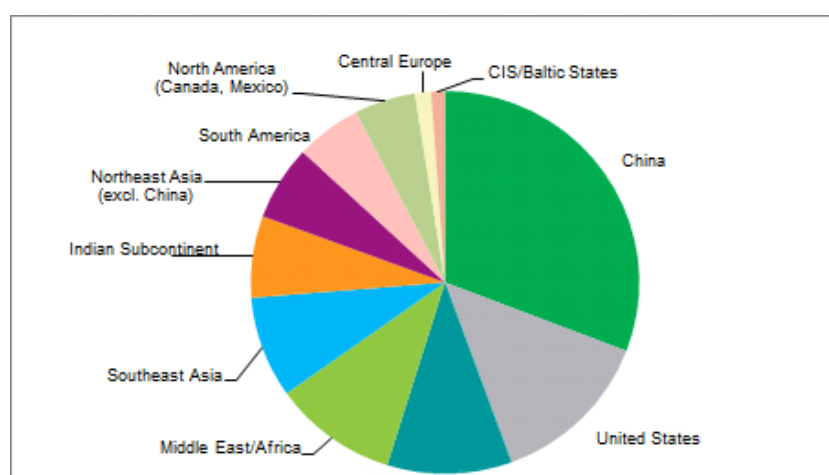


Fig. (I.21) : consommation de PDEL en 2016

“Les matières plastiques ont repris la croissance soutenue qu'elles connaissent depuis 1950 (+8,6% par an en moyenne)”, a commenté Michel Loubry, directeur régional pour l'Europe de l'ouest de Plastics Europe, évoquant "une bonne année pour les industriels".

Chapitre II

1 Définition de la rhéologie

La rhéologie, mot inventé par le professeur américain **Eugene Bingham** en 1929 à partir des mots grec 'rheo' qui veut dire couler et 'golos' étude. Cette discipline est une branche de la mécanique qui étudie la déformation de la matière en écoulement. Autrement dit l'étude des rapports entre les sollicitations et repenses de la matière en écoulement (*ex. relation entre la viscosité, la plasticité et l'élasticité d'une matière viscoplastique en écoulement et son comportement cinématique*), afin d'établir leur loi de comportement. La rhéologie englobe de nombreuses disciplines fondamentales telles que : la résistance des matériaux, la mécanique des fluides, la plasticité, etc. [3]

Dans le domaine de la rhéologie, les matériaux sont souvent classés en fonction de leurs comportements rhéologiques :

- ⇒ Matériaux très déformables ou fluides qui prennent une déformation finie sous l'effet d'une pression hydrostatique, et un écoulement indéfini sous l'effet d'une contrainte de cisaillement même faible (*ex. l'eau*).
- ⇒ Matériaux peu déformables ou solides qui ont une déformation finie quelle que soit la nature de la contrainte, au moins jusqu'à un certain seuil de contrainte (*ex. l'acier*).
- ⇒ Matériaux a comportement compris entre ces deux extrêmes tels que : *les matériaux à comportement élastique, plastique, visqueux, viscoplastique, etc.* [3]

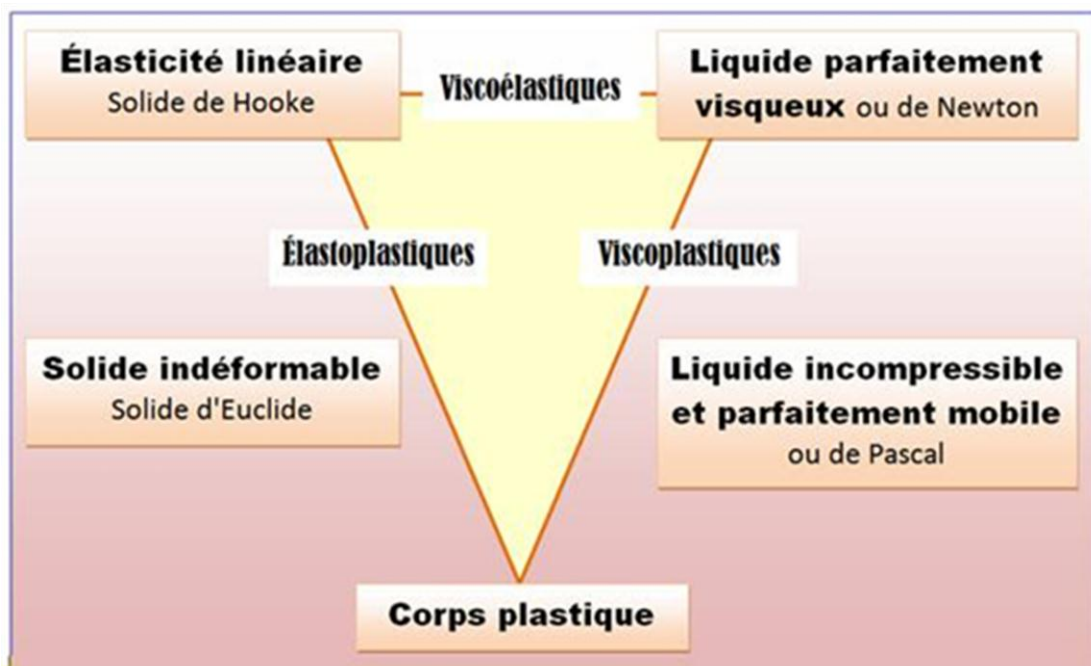


Fig. (II.1) : Classification des comportements rhéologiques.

La figure II.1 illustre les différents comportements rhéologiques des matériaux et son relation avec leurs comportements d'origines (*comportements idéaux*).

2 Types des fluides de point de vue rhéologique

Dans le domaine de la rhéologie, les fluides sont divisés en deux catégories : Fluides newtoniens et Non-newtoniens.

2.1 Fluides newtoniens

Un fluide newtonien est un fluide dont la viscosité ne dépend pas des contraintes qui lui sont appliquées. Autrement dit, sa viscosité reste inchangée au cours de l'écoulement. Elle peut néanmoins dépendre d'autres facteurs tels que la température. Plus le fluide est chaud plus il se fluidifie, car les molécules sont plus agitées et par conséquent les liaisons entre elles sont moins fortes. A l'inverse plus le fluide est froid, plus il se solidifie, car ses molécules se figent et leurs liaisons sont donc plus fortes. La viscosité du fluide newtonien sera donc constante quelques soient les contraintes exercées. [4]

Dans notre vie quotidienne les fluides newtoniens jouent un rôle important. Parmi ces fluides on peut citer : l'eau, l'air, etc.

2.2 Fluides Non-newtoniens

Pour un fluide Non-newtonien, la viscosité de ce dernier ne dépend pas seulement de sa température, mais aussi de son comportement cinématique en écoulement. La viscosité dépend aussi, chez certains types de fluides non newtoniens, de la durée des sollicitations exercées sur ces derniers.

Dans ce qui suit on présente quelques types de fluides Non-newtoniens

2.2.1 Fluides rhéofluidifiants

Pour les fluides rhéofluidifiants (*en anglais : shear-thinning fluids*), la viscosité diminue lorsque le gradient de vitesse (*taux de cisaillement*) augmente. Cela donne un système de plus en plus fluide, ce qui justifie le nom : rhéofluidifiant. Dans la vie quotidienne on peut rencontrer plusieurs fluides rhéofluidifiants, parmi eux on peut citer : la peinture, le miel, l'huile, le jus de fruit, etc. [5]

2.2.2 Fluides rhéoépaississants

Le comportement rhéoépaississant (*en anglais : shear-thickening*), est l'inverse du comportement rhéofluidifiant. Ce comportement rhéologique est assez rare. La viscosité augmente lorsque le taux de cisaillement augmente. Parmi les fluides courants qui présentent de manière flagrante le comportement rhéoépaississant, on peut citer les suspensions concentrées d'amidon de maïs qui présente effectivement cette propriété. [5]

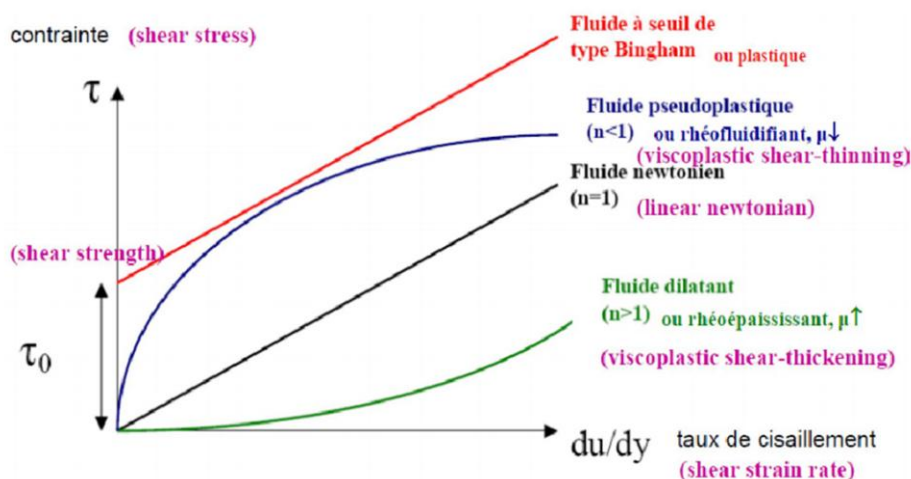


Fig. (II.2) : Profils de contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement pour certains fluides rhéoépaississants.

2.2.3 Fluides viscoélastiques

La viscoélasticité est un comportement Non-newtonien important. Les fluides viscoélastiques (*en anglais : viscoelastic fluids*) se caractérisent par leur capacité à présenter un comportement variable selon le temps de sollicitation auquel le matériau est soumis. La réponse de celui-ci à une sollicitation (*élongation ou cisaillement*) présente à la fois le comportement d'un solide élastique (*déformation instantanée avec stockage d'énergie*) et le comportement d'un fluide visqueux (*déformation continue avec dissipation d'énergie*). [5]

2.2.4 Fluides thixotropiques

La thixotropie est une variation réversible de la viscosité lorsqu'un fluide est soumis à une sollicitation. Cela suppose que la viscosité du fluide thixotrope diminue en appliquant une contrainte constante. En contrepartie, cette viscosité augmente de nouveau jusqu'à atteindre sa valeur d'origine, au bout d'un certain temps, en supprimant cette contrainte. [5]

3 Lois de comportement rhéologique

Le comportement rhéologique des matériaux polymères peut être décrit par plusieurs modèles mathématiques de complexité variable. Parmi ces modèles on peut citer : [5]

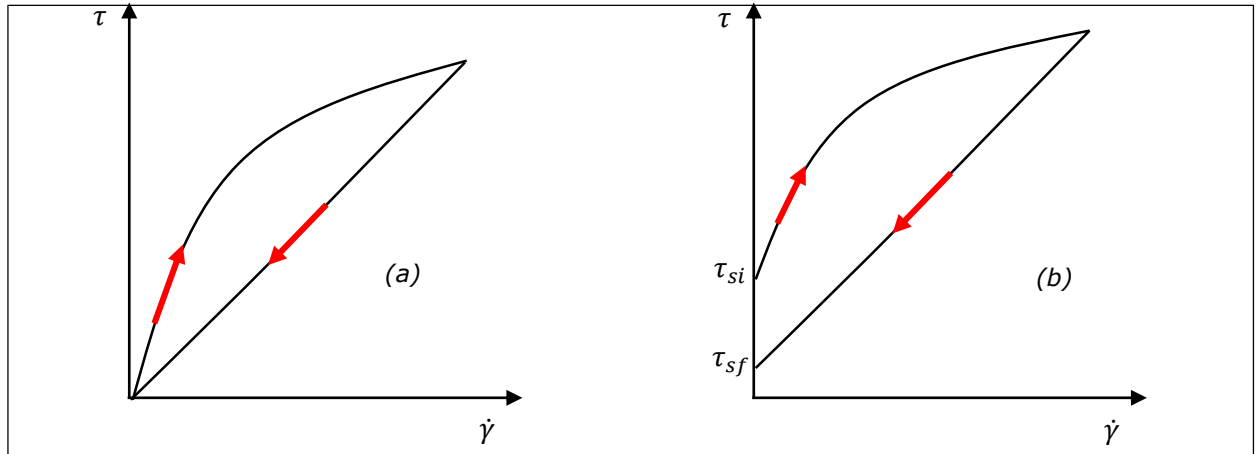


Fig. (II.3) : Courbe d'hystérésis pour fluides Non-newtonien : (a) fluide thixotrope rhéofluidifiant, (b) fluide thixotrope à seuil de contrainte (plastique).

3.1 Modèle newtonien

Le comportement newtonien traduit mathématiquement la relation linéaire entre le tenseur non isotrope $\boldsymbol{\tau}$ de contrainte (*tenseur des extra-contraintes*) et le tenseur taux de déformation (*tenseur gradient de vitesse*) \boldsymbol{D} , soit :

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu\boldsymbol{D} \quad (\text{II.1})$$

Où μ représente la viscosité dynamique (*ou viscosité apparente*) du fluide. Elle est indépendante de la cinématique de l'écoulement. Ce modèle mathématique peut décrire le comportement rhéologique de plusieurs fluides tels que : l'eau, l'air, sang, etc.

Le tenseur gradient de vitesse est exprimé, dans un repère cartésien, par :

$$\boldsymbol{D} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) , \{i, j = (1,2,3) \equiv (x, y, z)\} \quad (\text{II.2})$$

Avec u_i représente les composantes du vecteur de vitesse.

Dans un repère cylindrique ce tenseur devient :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} & r \frac{\partial \left(\frac{v_\theta}{r}\right)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} & \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \\ r \frac{\partial \left(\frac{v_\theta}{r}\right)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} & 2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \\ \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} & \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} & 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons quelques modèles de comportement rhéologique non linéaire implémentés dans le code commercial Fluent.

3.2 Modèle loi de puissance

Aussi appelé modèle d'Ostwald-de Waele, leur comportement rhéologique est décrit par une loi de puissance de type :

$$\boldsymbol{\tau} = \mu(\mathbf{D})\mathbf{D} \quad (\text{II.3})$$

Où $\mu(\mathbf{D})$ représente la viscosité dynamique du fluide, elle est fonction de taux de déformation \mathbf{D} . k Et n sont respectivement l'indice de consistance et l'indice d'écoulement (*indice de rhéofluidification*).

Selon les valeurs de l'indice rhéofluidification n , les fluides modélisés par une loi de puissance peuvent présenter un comportement : rhéofluidifiant si $n < 1$, rhéoépaississant si $n > 1$, ou newtonien pour $n = 1$.

La viscosité dynamique d'un fluide pseudoplastique, dont le comportement rhéologique est gouverné par la loi de puissance, peut s'écrire comme suit :

$$\mu(\mathbf{D}) = k\dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (\text{II.4})$$

Où $\dot{\gamma}$ désigne le taux de cisaillement apparent, il a été traduit mathématiquement par :

$$\dot{\gamma} = \sqrt{|4II_{\mathbf{D}}|} \quad (\text{II.5})$$

Le deuxième invariant du tenseur de taux de déformation $II_{\mathbf{D}}$ s'exprime par :

$$II_{\mathbf{D}} = \frac{1}{2} \left[(\text{tr}(\mathbf{D}))^2 - \text{tr}(\mathbf{D}^2) \right] \quad (\text{II.6})$$

Pour un fluide incompressible $tr(\mathbf{D}) = 0$ suite à la conservation de la masse. Pour cette raison l'équation (II.3) devient :

$$II_D = -\frac{1}{2} tr(\mathbf{D}^2) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 D_{ii}^2 \quad (II.7)$$

3.3 Modèle de Cross

Le modèle de Cross tient compte de la viscosité à cisaillement nul et infini. Il s'écrit mathématiquement comme suit :

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma}^a)^b} \quad (II.8)$$

Où λ désigne un temps caractéristique de relaxation, η_0 et η_∞ sont les viscosités à cisaillements nul et infini, respectivement, et a , b sont des constantes liés au fluide.

Il existe plusieurs modèles dérivés du modèle de Cross, comme par exemple le modèle de Carreau. Pour ce dernier la constante a vaut 2.

3.4 Modèle de carreau

Le modèle de Carreau représente une des relations mathématiques reliant la viscosité avec le comportement cinématique du fluide en écoulement [7]. Cette relation est utilisée pour les comportements visqueux pur de type rhéoépaississant. Elle est donnée par :

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \cdot (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (II.9)$$

Ici :

η_0 : Viscosité à taux de cisaillement nul ;

η_∞ : Viscosité à taux de cisaillement infinie ;

$\dot{\gamma}$: Le taux de cisaillement apparent ;

λ : Un paramètre matériel de temps (constant).

n : Indice de la loi en puissance.

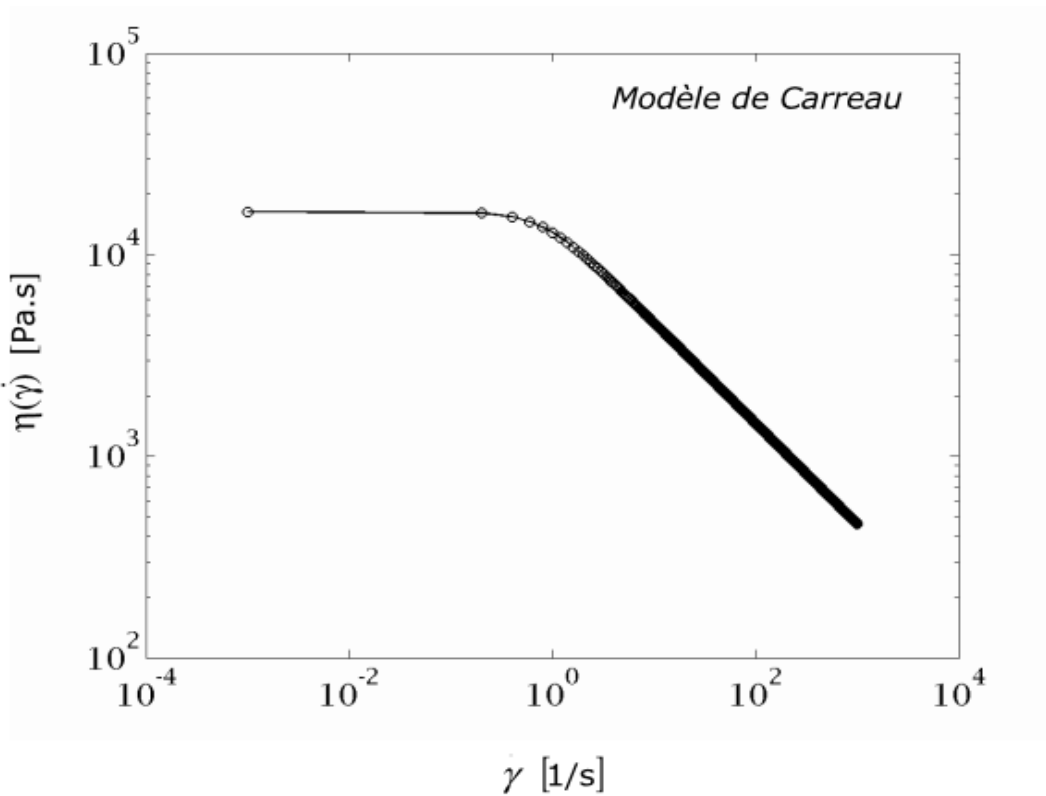


Fig. (II.5) : Courbe de viscosité pour le fluide de Carreau ($\lambda = 0.59[s]$, $n = 0.42$, $\eta_0 = 16325 [Pa.s]$, et $\eta_\infty = 0 [Pa.s]$)

Les paramètres de l'équation (II.9) sont associés à un polyéthylène de basse densité linéaire (PEBDL) à la température de référence $T_0 = 433[K]$.

3.5 Modèle de Bingham

Le modèle de Bingham reste la représentation la plus simple d'un fluide à seuil (*fluide viscoplastique*) dans le cas d'un écoulement à cisaillement pur. Il s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} \tau = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\right) \dot{\gamma} & \text{pour } \tau > \tau_0 \\ \tau = 0 & \text{pour } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Où τ_0 désigne la contrainte seuil du fluide de Bingham.

3.6 Modèle de Herschel-Bulkley

Ce modèle découle d'une simple généralisation du modèle de Bingham. Il est décrit par la loi :

$$\begin{cases} \tau = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \right) \dot{\gamma} & \text{pour } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{pour } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Où k est la consistance du fluide, n son indice d'écoulement et τ_0 la contrainte seuil.

4 Lois de comportement rhéologique pour un fluide viscoélastique (*loi intégrale*)

Ces lois de comportement s'écrivent par une relation explicite de la contrainte [8] :

$$\tau(X, t) = \chi_{t'=\infty}^{t'=t} (K_i(t, t')), \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{II.12})$$

Dans laquelle :

K_i : représente les tenseurs cinématiques.

$\chi_{t'=\infty}^{t'=t}$: désigne une fonctionnelle qui se traduit généralement par une intégrale simple ou multiple.

Ces relations peuvent s'exprimer suivant les arguments cinématiques liés à la tenseur vitesse de déformation ou au tenseur gradient de déformation. Nous choisissons dans ce travail un modèle intégral codéformationnel de Wagner, dans lequel les tenseur cinématiques se rapportent au gradient de déformation (*tenseur de Cauchy et de Finger*), dans le contexte de la description relative du mouvement. Cette loi est un cas particulier du modèle de Rivlin-Sawyers, le modèle intégral de Wagner (II.13), traduit explicitement que la contrainte en un point matériel du corps déformés à l'instant t dépend de l'histoire cinématique associée à ce point matériel aux instant $t' \leq t$, par la relation suivante :

$$\tau = \int_{-\infty}^t m(t - t') h(I_1, I_2) \mathbf{C}_t^{-1}(t') dt' \quad (\text{II.13})$$

$m(t - t')$: correspond à la fonction mémoire du fluide ;

$\mathbf{C}_t^{-1}(t')$: désigné le tenseur de Finger (*inverse du tenseur de Cauchy*).

La fonction de relaxation est le produit de la fonction mémoire m par une fonction h appelée fonction d'amortissement, qui dépend des invariants I_1 et I_2 par les relations suivantes :

$$I_1 = tr(\mathbf{C}_t^{-1}), I_2 = tr(\mathbf{C}_t) \quad (\text{II.14})$$

Dans le modèle que nous adoptons pour nos calculs, la fonction mémoire s'écrit sous la forme d'une série finie où, t désigné le temps, correspondant à un spectre de temps et de module de relaxation, désignés respectivement par λ_i et a_i , telle que :

$$m(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{a_i}{\lambda_i} \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i}\right) \quad (\text{II.15})$$

Dans notre étude, la fonction d'amortissement h est prise sous la forme proposée par Soskey et Winter, soit :

$$h(I_1, I_2) = h(I) = \frac{1}{1+a(I-3)^{\frac{b}{2}}} \quad (\text{II.16})$$

a et b : désignent des paramètres matériels ;

I : l'invariant généralisé de Wagner, donnée par l'expression suivante :

$$I = \beta I_1 + (1 - \beta) I_2 \quad (\text{II.17})$$

β : désigne un paramètre lié aux propriétés du matériau.

Le comportement rhéologique du fluide répond à la loi intégrale de Wagner, et qui correspond à un polyéthylène de basse densité linéaire (PEBDL) dont les caractérisations rhéométriques et de modélisations ont été établies à 160 °C. Les paramètres du modèle de Wagner ont été ajustés avec sept temps de relaxation. Pour ce polyéthylène, l'écriture du modèle de Wagner correspond à celle donnée par la relation (II.18), donc :

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=7} \int_{-\infty}^t \frac{a_i}{\lambda_i} \exp\left(-\frac{(t-t')}{\lambda_i}\right) \frac{\mathbf{C}_t^{-1}(t')}{1+a[\beta tr\mathbf{C}_t^{-1}(t')+(1-\beta)tr\mathbf{C}_t(t')-3]^{\frac{b}{2}}} dt' \quad (\text{II.18})$$

Dans la relation précédant, on a :

$$a = 0.086 ; \beta = 0.02 ; b = 2.56,$$

Les coefficients a_i et λ_i sont indiqués dans le tableau suivant :

i	λ_i [s]	a_i [Pa]
1	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$1.85 \cdot 10^6$
2	$6.12 \cdot 10^{-3}$	$2.20 \cdot 10^5$
3	$4.10 \cdot 10^{-2}$	$8.20 \cdot 10^4$
4	$2.77 \cdot 10^{-1}$	$1.694 \cdot 10^4$
5	$2.01 \cdot 10^0$	$1.85 \cdot 10^3$
6	$1.57 \cdot 10^1$	$1.28 \cdot 10^2$
7	$1.35 \cdot 10^2$	$7.08 \cdot 10^0$

Tableau II.1 : Paramètres de fonction mémoire du PEBDL (modèle de Wagner),
D'après Carreau et al (2001)

5 Ecoulements des fluides

Un fluide peut s'écouler de différentes façons. Lorsque les lignes de courant (*courbes tangentes en tous points au vecteur vitesse*) restent parallèles entre elles et rectilignes, l'écoulement est dit laminaire. Au contraire, quand l'écoulement est désorganisé et elle le siège de tourbillons de différentes tailles, on parle de régime turbulent.

5.1 Ecoulements laminaires

En régime laminaire, les couches de fluide s'écoulent parallèlement les unes aux autres sans qu'il y ait de mélange : il n'existe pas de composante de vitesse normale à la direction de l'écoulement. L'écoulement d'un fluide à seuil dans une conduite cylindrique est caractérisé par la présence d'une zone iso-vitesse au centre de l'écoulement et d'une zone à gradient de vitesse au voisinage de la paroi. Le matériau est considéré comme un solide indéformable dans la première zone et un fluide cisailé dans la seconde.

5.2 Ecoulements turbulents

Le mouvement turbulent d'un fluide représente une condition irrégulière de l'écoulement, dans lequel les diverses grandeurs présentent des variations aléatoires dans l'espace et dans le temps, de telle sorte que des valeurs moyennes statistiquement distinctes puissent être évaluées. Nous retiendrons cette définition pour un écoulement turbulent pleinement développé. Les phénomènes turbulents sont tridimensionnels, les trajectoires sont imprévisibles, des tourbillons de tailles très variées coexistent, la diffusivité des grandeurs physiques (*masse, énergie*) est très élevée et la turbulence est responsable de fortes dissipations.

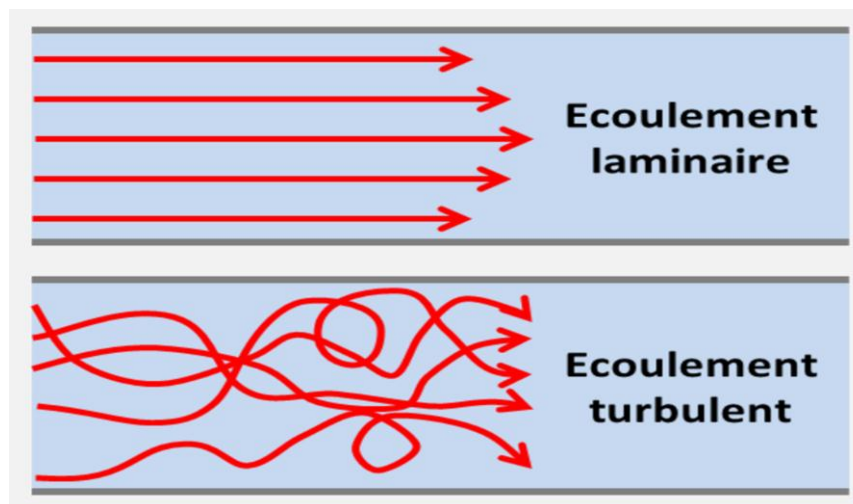


Fig. (II.4) : Vue des lignes de courant, (a) : écoulement laminaire, (b) : écoulement turbulent.

Chapitre

III

1 Introduction

Ce chapitre est réservé à la présentation des techniques numériques employées dans ce travail, afin de résoudre les problèmes d'écoulements non isotherme de fluide non newtonien, à travers des conduites tridimensionnelles. Pour étudier l'effet de la cinématique et la thermique sur le comportement du fluide en écoulement.

Plusieurs études ont montré que la présence des singularités, notamment géométriques, dans le domaine d'étude, constituent une source probable de dégradation des produits finis. La maîtrise de l'écoulement près de ces endroits donne une information sur les conditions d'apparition de ce genre de problème. Autrement dit, une solution pour éviter ce problème.

La bonne formulation du problème à résoudre constitue une étape importante dans le domaine de simulation des écoulement et transferts. Ainsi, une solution optimale liée directement à la formulation adoptée.

Pour le cas du modèle de Carreau, on a utilisé le code Fluent pour effectuer les simulations dans le cas isotherme et non isotherme. Les conditions aux limites cinématique et thermique à l'amont de la conduite tridimensionnelle sont introduites par l'intermédiaire des fonctions écrites en langage C, puis compilés et exécutés sur Fluent (UDF en anglais : User Defined Functions).

Dans ce travail on a choisi la méthode des volumes finis pour résoudre numériquement l'écoulement non isotherme du fluide de Carreau au sein des conduites tridimensionnelles.

2 géométries de domaine

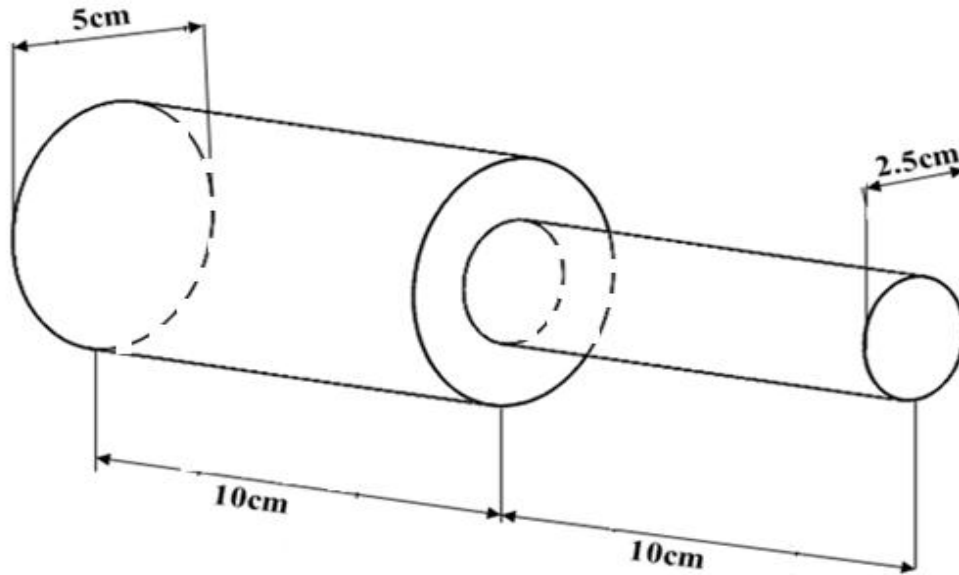


Fig. (III.1) : domaine d'étude concernant la conduite cylindrique

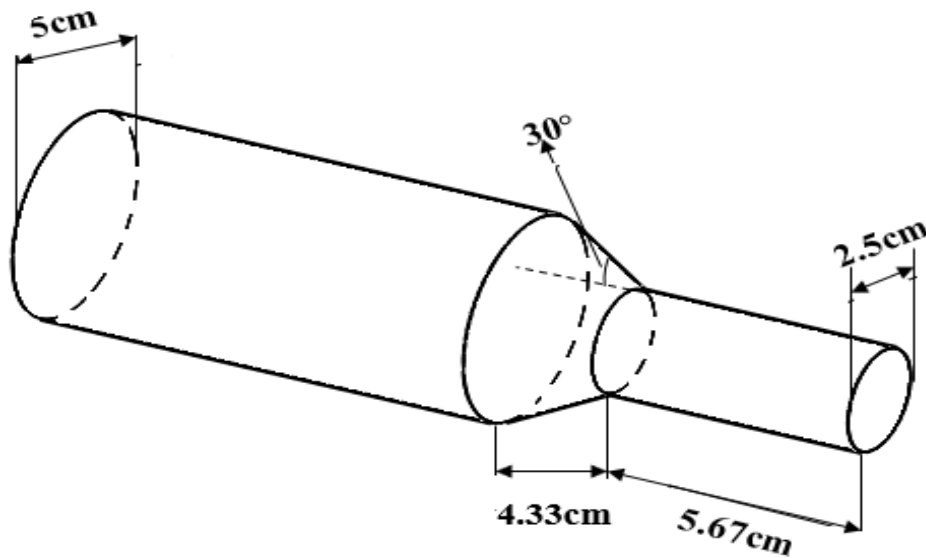


Fig. (III.2) : domaine d'étude concernant la conduite a contraction angulaire

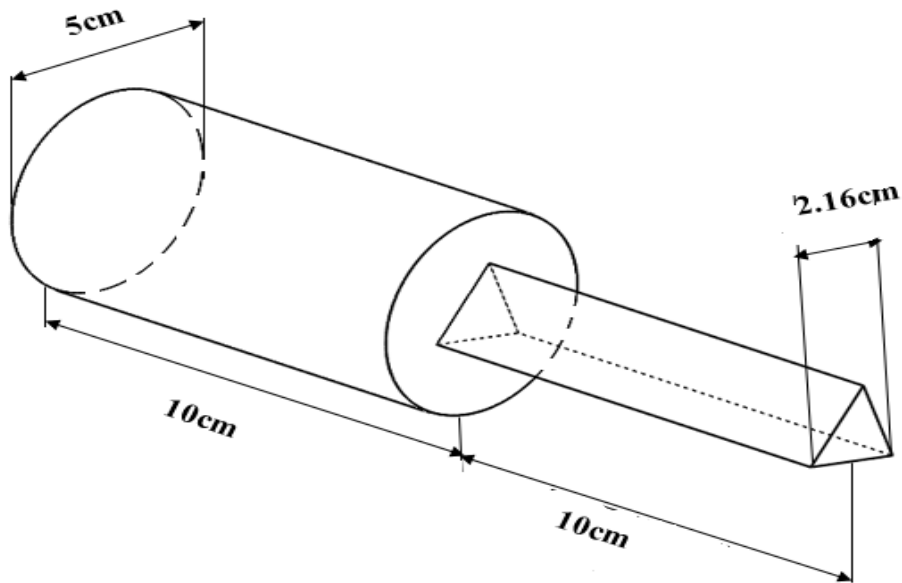


Fig. (III.3) : domaine d'étude concernant la conduite triangulaire

3 Formulation mathématique

3.1 Equations gouvernantes

3.1.1 Équation de continuité

Pour un fluide de masse volumique ρ la conservation de la masse s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Dans le cas stationnaire d'un fluide incompressible, l'équation (III.1) devient :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{III.2})$$

Avec : $\vec{V} = (u(r, z), 0, w(r, z))$ le vecteur vitesse.

∇ : est l'opérateur nabla.

L'expression de l'équation continuité pour le cas tridimensionnel plant est :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.3})$$

3.1.2 Équations de quantité de mouvement [10].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Composant r :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r \quad (\text{III.5})$$

Composant θ :

$$\rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \tau_{r\theta})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) + \rho g_\theta \quad (\text{III.6})$$

Composant z :

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (\text{III.7})$$

3.1.3 Conservation d'énergie

L'équation d'énergie devient une équation gouvernante qu'on doit résoudre avec le système d'équations précédent. Cette équation s'écrit comme suit :

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \varphi(r, \theta, z, t) \quad (\text{III.8})$$

Telle que :

$$\begin{aligned} \varphi = & \tau_{rr} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \tau_{\theta\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) + \tau_{zz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \tau_{r\theta} \left[r \frac{\partial \left(\frac{v_\theta}{r} \right)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] + \\ & \tau_{\theta z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) + \tau_{rz} \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

4 conditions aux limites

Cas isotherme

$$\text{Partie amont : } \begin{cases} u = \begin{cases} 0 & r = R_1 \\ 0.1 & r < R_1 \end{cases} \\ V = 0 \end{cases}$$

$$\text{Partie aval : } \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$P = P_{\text{atm}}$$

$$\text{Paroi : } u = V = 0$$

Cas non-isotherme

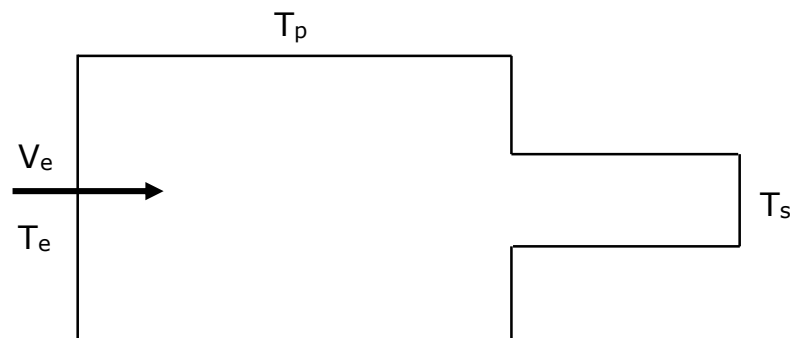
Pour le cas non-isotherme on a adopté les mêmes conditions aux limites qu'on a utilisées pour la situation isotherme. Dans la suite nous présenterons les conditions aux limites en relation avec le comportement thermique pour le traitement de la situation non-isotherme.

$$V_e = 0.01 \text{ m/s}$$

$$T_e = 433 \text{ k,}$$

$$T_p = 423 \text{ k,}$$

$$T_s = T_{\text{atm}} = 300 \text{ k}$$



5 discrétisation des équations gouvernantes

5-1 discrétisation de l'équation de transport pour le cas 2D

Les équations de conservation présentées au chapitre précédent peuvent être écrites sous une forme commune, cette formulation permet de ne pas réitérer le travail de discrétisation pour chaque équation.

Si on not ϕ la variable étudiée, chacun des équations peut être réduite à une seule équation générale selon la forme :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_T + \underbrace{\sum \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi)}_C = \underbrace{\sum \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)}_D + \underbrace{S_\phi}_S \quad (\text{III.10})$$

Avec :

T : terme transitoire.

C : terme de convection.

D : terme de diffusion.

S : terme source.

Nous venons de voir que, pour chaque variable ϕ , l'équation de transport s'écrit dans le cas instationnaire, bidimensionnel :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi \quad (\text{III.11})$$

Où ϕ est la propriété transportée, Γ indique le coefficient de diffusion et S_ϕ le terme source.

L'équation (III.11) peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(J_x) + \frac{\partial}{\partial y}(J_y) = S_\phi \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} J_x = \rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ J_y = \rho v \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{cases}$$

J_x et J_y sont les flux totaux de convection et diffusion dans les directions x et y . La forme instationnaire de l'équation est :

$$(J_e - J_w + J_n - J_s) = (S_e + S_p + \phi_p) \Delta x \Delta y \quad (\text{III.13})$$

Avec

$$J_e = (J_x)_e \Delta y$$

$$J_w = (J_x)_w \Delta y$$

$$J_n = (J_y)_n \Delta x$$

$$J_s = (J_y)_s \Delta x$$

Où j_i ($i=e, w, n, s$) est le flux total évalué sur chaque face du volume de contrôle.

La discrétisation consiste à transformer l'équation différentielle de transport en un système d'équations algébriques.

❖ Suivant X :

-Terme convectif :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u \phi) dV dt = (\rho u \phi) | \cdot \Delta y \Delta t = ((\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w) \Delta y \Delta t = (F_e \phi_e - F_w \phi_w) \Delta t \quad (\text{III.14})$$

Avec

$$F_e = \rho u_e \Delta y, \quad F_w = \rho u_w \Delta y$$

- Terme diffusif :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy dt = \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial x} (\phi) \right) |_w^e \cdot \Delta y \Delta t$$

$$\begin{aligned}
 &= \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e - \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w \right] \Delta y \Delta t \\
 &= \left(\Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta y_{PE}} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta y_{WP}} \right) \Delta y \Delta t \\
 &= \frac{\Gamma_e \Delta y}{\Delta x_{PE}} (\phi_E - \phi_P) - \frac{\Gamma_w \Delta y}{\Delta y_{WP}} (\phi_P - \phi_W) \Delta t \\
 &= (D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W)) \Delta t \tag{III.15}
 \end{aligned}$$

Avec : $D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{\Delta x_{PE}}$, $D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{\Delta x_{WP}}$

❖ Suivant y :

- **Terme convective :**

$$\begin{aligned}
 &\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \right] dV dt \\
 &= (\rho v \phi) \Big|_s^n \Delta x \Delta t \\
 &= [(\rho v \phi)_n - (\rho v \phi)_s] \Delta x \Delta t \\
 &= (F_n \phi_n - F_s \phi_s) \Delta t \tag{III.16}
 \end{aligned}$$

Avec : $F_n = \rho v_n \Delta x$, $F_s = \rho v_s \Delta x$

- **Terme diffusif :**

$$\begin{aligned}
 &\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy dt = \left(\Gamma \frac{\partial}{\partial y} (\phi) \right) \Big|_s^n \cdot \Delta x \Delta t \\
 &= \left[\frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s - \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s \right] \Delta x \Delta t \\
 &= \left(\Gamma_n \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y_{PN}} - \Gamma_s \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y_{SP}} \right) \Delta x \Delta t \\
 &= \frac{\Gamma_n \Delta x}{\Delta y_{PN}} (\phi_N - \phi_P) - \frac{\Gamma_s \Delta x}{\Delta y_{SP}} (\phi_P - \phi_S) \Delta t
 \end{aligned}$$

$$= (D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S)) \Delta t \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Avec : } D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{\Delta y_{PN}} \quad , \quad D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{\Delta y_{SP}}$$

- **Terme source :**

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{V_c} (S_\phi) dV dt = S_\phi \Delta x \Delta y \Delta t = (S_P \phi_P + S_u) \Delta x \Delta y \Delta t$$

(III.18)

6 Description de la méthode de résolution par le code Fluent et gambit

Comme tout logiciel de CFD, il est composé de trois éléments : le préprocesseur, le solveur et le post processeur.

- La définition du problème à résoudre s'effectue à l'aide du préprocesseur GAMBIT.

Il permet de représenter la géométrie du système, de définir le type de conditions limites aux frontières du domaine, de spécifier le type de matériau (fluide ou solide). Il fournit aussi la possibilité de discrétiser le domaine.

- Le solveur permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression) dans lesquelles est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites. Enfin, il permet de choisir le processus itératif, en proposant notamment plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de la vitesse et de la pression. Il offre également une interface permettant de contrôler à tout moment l'état d'avancement des calculs.

- Le post processeur est l'élément qui permet de visualiser la géométrie et le maillage du domaine, mais surtout d'afficher les résultats obtenus. Il est ainsi possible de visualiser les champs du vecteur de vitesse, les champs de pression, de turbulence ainsi que toutes les autres grandeurs calculées sur un segment, une section du domaine ou sur tout le volume. Il offre aussi la possibilité de tracer des courbes et de visualiser les lignes de courant ou la trajectoire de particules.

6.1 Préprocesseur GAMBIT

C'est un préprocesseur intégré pour l'analyse en CFD (Computational Fluid Dynamics). Il peut être utilisé pour construire une géométrie et lui générer un maillage. Eventuellement, une géométrie d'un autre logiciel de CAO peut être importée dans ce préprocesseur.

Les options de génération de maillage de gambit offrent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré. Sinon, gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Avec les outils de vérification du maillage, les défauts sont facilement détectés.

6.2 Code FLUENT

Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes. Il présente une grande flexibilité d'adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cela est très utile dans les régions à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre). Fluent est écrit en langage C. il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage.

Il a une architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines. Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme.

7 algorithmes de résolution

L'algorithme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) a été créé par Patankar et Spalding en 1972 [9]. C'est une procédure itérative pour calculer la pression, en utilisant le maillage décalé.

La discrétisation de l'équation de transport sur le volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes. Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (*sans avoir effectué l'interpolation*). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes, du

fait qu'une répartition de pression ou de vitesse est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés, on préfère utiliser des grilles décalées, l'une vers la droite et l'autre vers le haut pour le calcul des vitesses horizontale et verticale. (*L'équation de la méthode simple à l'annexe*).

8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la formulation mathématique de nos problèmes traités dans ce modeste travail. La formulation traduit mathématiquement l'écoulement isotherme et non isotherme de polyéthylène à travers une conduite à convergent.

Une résolution numérique des équations de quantité de mouvement et d'équation de continuité et de l'énergie a été mise en œuvre pour simuler le déplacement de fluide polyéthylène dans la tuyère de la filière à l'extrudeuse et le champ de température avec isotherme et non isotherme

Les conditions aux limites, l'identité mathématique du problème à résoudre, est aussi présente dans ce chapitre. Ces conditions concernant particulièrement les simulations effectuées sur le comportement viscoélastique. Un bon choix des conditions aux limites ce traduit par une bonne solution numérique.

1 Introduction

Le présent chapitre a pour objectif la présentation et la discussion de l'ensemble des résultats numériques obtenus par des simulations d'écoulements de fluide Non-newtonien à travers des conduites cylindriques à géométries complexes. Les propriétés physiques du fluide en question (*fluide Non-newtonien*) sont ceux du polyéthylène basse densité linéaire (*PEBDL*), mesurées à la température de références $T_0 = 433$ [K], de plus son comportement rhéologique a été modélisé par la loi non linéaire de Carreau. La résolution de l'ensemble des équations gouvernant l'écoulement du fluide en écoulement a été effectué par le biais du logiciel commercial Fluent (*version 6.3.26*), où la génération du maillage (*points de discrétisation*) a été réalisée par le remaillleur automatique Gambit (*version 2.2.30*).

2 Résultats pour les cas isothermes

2.1 Caractéristiques des maillages des domaines d'études

Nous avons utilisés dans le présent travail plusieurs conduites à géométries différentes, notamment au niveau de la filière de sortie de la conduite (*sections de sortie en forme circulaire et triangulaire*). Ces conduites sont très rencontrées dans le domaine des mises en forme des polymères. La génération du maillage non-structuré dans chaque domaine d'étude est basée sur le raffinement du maillage dans les zones qui présente physiquement de forts gradients des propriétés dynamiques et thermiques du fluide en écoulement (*Paroi de la conduite cylindrique*). Après plusieurs tests de maillage (*élimination des effets géométriques sur la solution numériques (Tab. (IV.1))*), nous avons, par exemple, adoptés pour la simulation d'écoulements isotherme de fluide de Carreau, à travers une conduite cylindrique à contraction brusque, le maillage *M1* comme nous l'indique la figure (*Fig. (IV.1)*).

Tableau (IV.1) : Test de maillage (conduite cylindrique à contraction brusque).

N°	Nombre d'éléments	Taille minimale d'élément [m³]	τ_{paroi} (Pa)	V_z (m/s)
M1	17589	19.73415x10 ⁻¹⁴	25397630	0.77984959
M2	72513	2.246219 x10 ⁻¹⁴	25397630	0.77984959
M3	88864	2.108714 x10 ⁻¹⁴	25397630	0.77984959

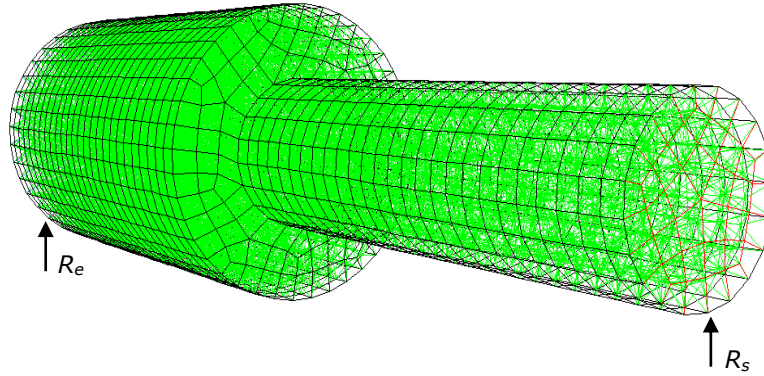


Fig. (IV.1) : Vue globale du maillage M1 adopté pour les simulations en conduite cylindrique à contraction brusque.

2.2 Résultats dynamiques

2.2.1 Influence de la taille de la filière sur le comportement dynamique de l'écoulement

L'influence de la taille de la filière ($R_s = 0.625, 1.25$ et 1.875 [cm]) sur le comportement cinématique de l'écoulement a été présentée en Fig. (IV.2). D'après cette dernière nous constatons que l'intensité de la composante axiale de la vitesse est inversement proportionnelle à la taille de la filière de sortie. Cela peut être s'interprété par la conservation de la masse au sein du domaine d'étude (*conduite cylindrique*). Noter bien que la vitesse maximale est localisée au centre de la conduite, où la résistance visqueuse est presque négligeable.

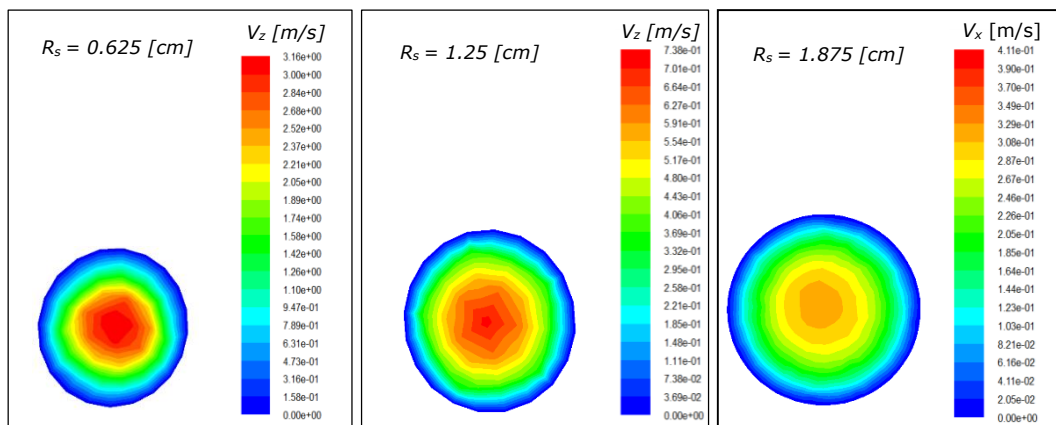


Fig. (IV.2) : Isovaleurs de la composante axiale de la vitesse V_z à la sortie de la conduite cylindrique à contraction brusque pour différentes tailles de la filière de sortie.

En Fig. (IV.3) nous présentons, à la sortie de la filière, la distribution de la contrainte de cisaillement τ_{rz} . Selon cette figure nous remarquons que la valeur de cette contrainte est

inversement proportionnelle à la taille de la filière de sortie. Cette relation est due probablement à l'intensité du champ cinématique de l'écoulement, notamment dans la filière.

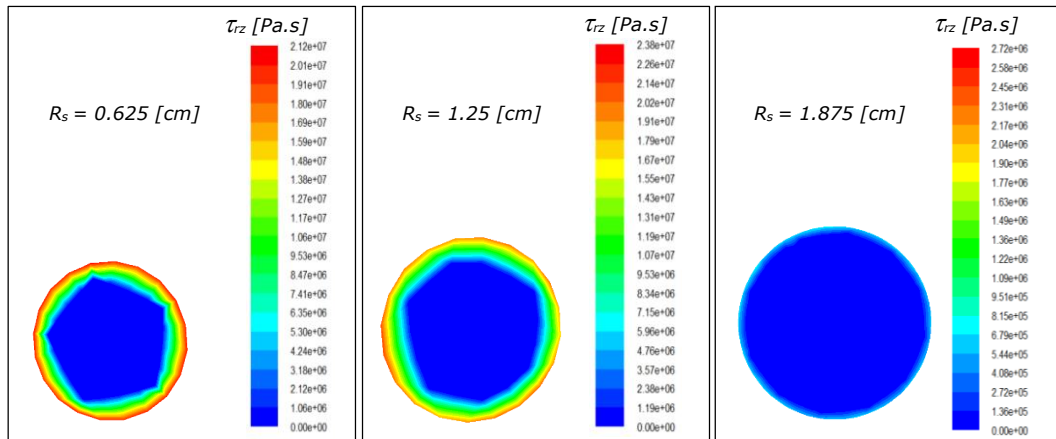


Fig. (IV.3) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} à la sortie de la conduite cylindrique à contraction brusque pour différentes tailles de la filière de sortie.

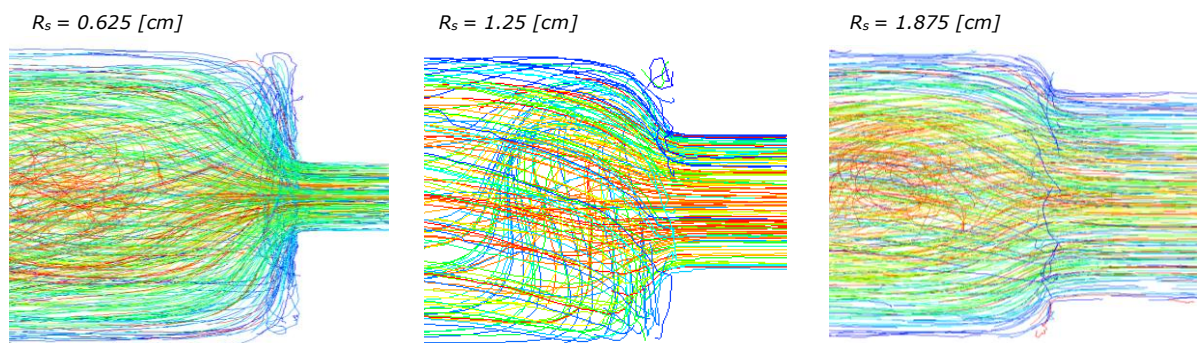


Fig. (IV.4) : Allure des lignes de courant au niveau de la contraction brusque pour différents rapport de contraction ($rap = R_2/R_1 = 0.25, 0.5, 0.75$).

Une aidé sur la morphologie des lignes de courant, au niveau de la zone de contraction brusque, a été présentée en Fig. (IV.4) pour différente rapport de contraction rap . Nous avons remarqué la présence des zones de recirculation sur la paroi près de la contraction, dont la taille est inversement proportionnelle au rapport rap .

2.2.2 Influence de l'angle du convergent sur le comportement dynamique de l'écoulement ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ$ et 90°)

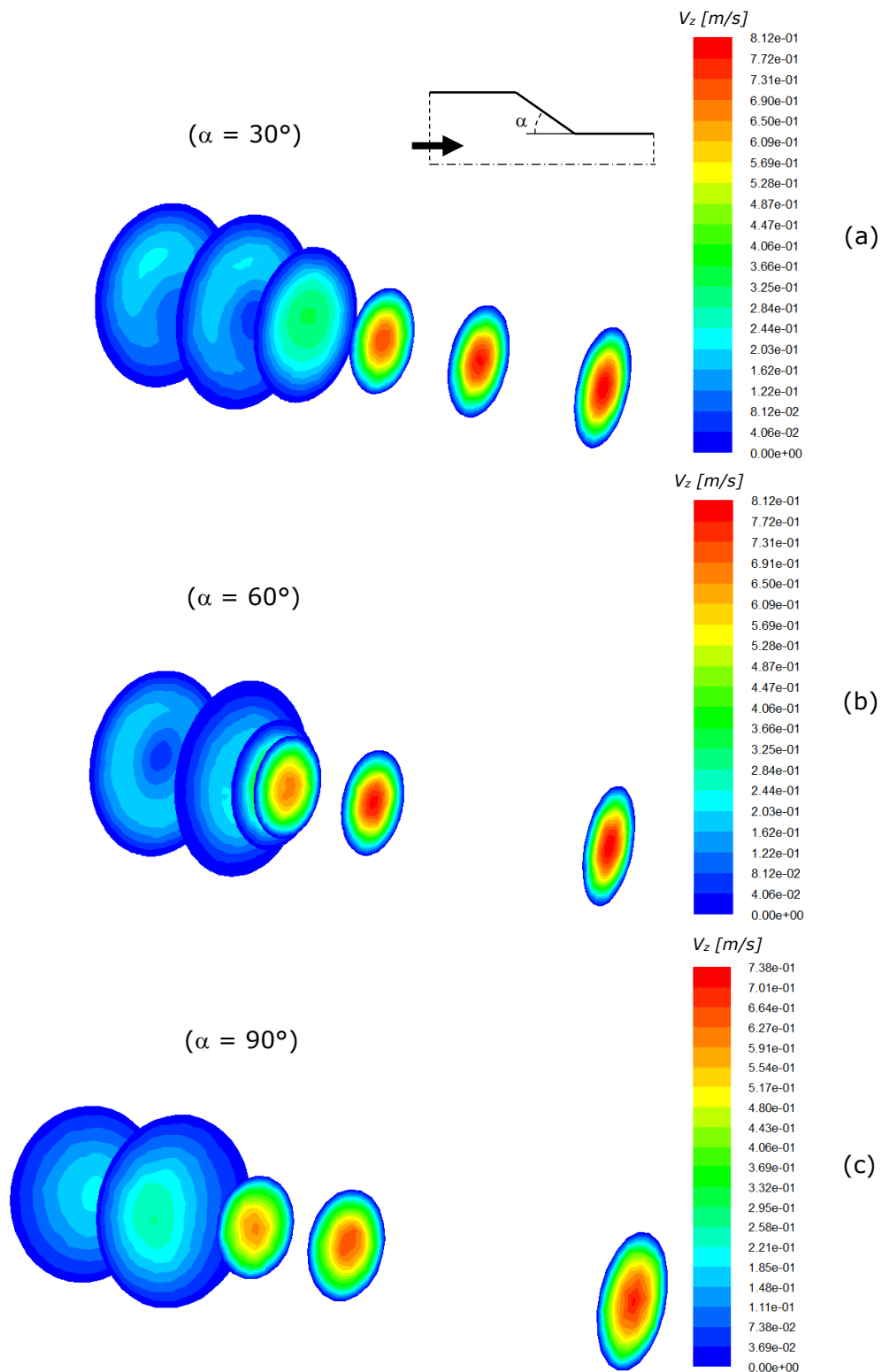


Fig. (IV.5) : Isovaleurs des composantes axiales V_z de la vitesse le long de la direction d'écoulement pour différents angles de convergent ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$).

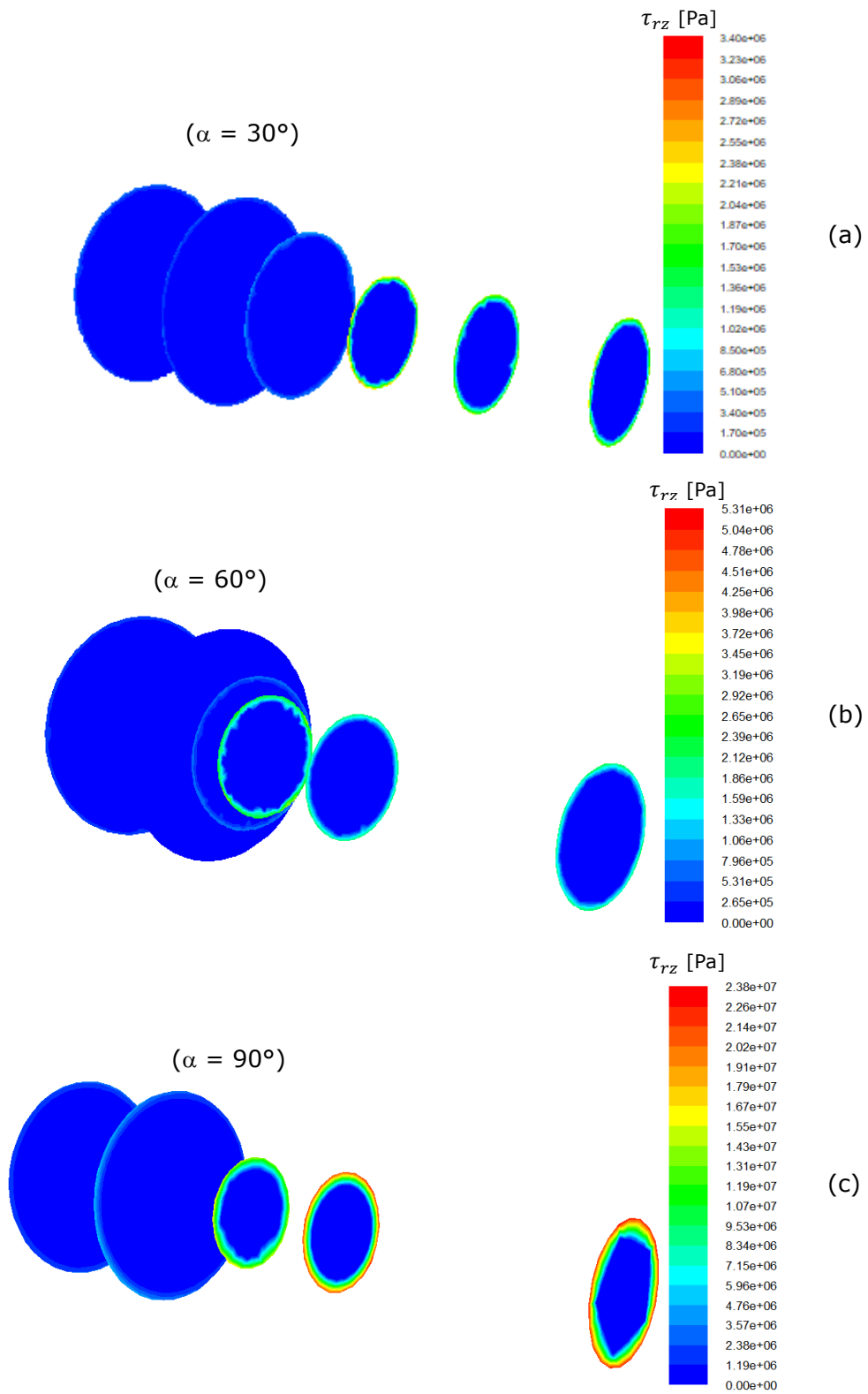


Fig. (IV.6) : Isovaleurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} le long de la direction d'écoulement Z pour différents angles de convergent ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$).

Les isovaleurs de la composante axiale V_z de la vitesse, pour différentes positions axiale z et angles de convergent α , sont présentées en Fig. (IV.5). L'analyse de ces figures nous permet de constater que, pour toutes les valeurs de α , la vitesse axiale maximale est toujours située au centre de la conduite. Les résultats numériques obtenus indiquent que la valeur maximale de V_z est inversement proportionnelle à l'angle du convergent. A titre d'exemple les vitesses maximale pour $\alpha = 30^\circ$, 60° et 90° valent 0.82737269, 0.82670937 et 0.77989434 respectivement.

Le comportement des contraintes de cisaillement τ_{rz} , le long de la paroi de la conduite cylindrique, est présenté sous forme des zones isovaleurs en Fig. (IV.6). Selon cette dernière les contraintes τ_{rz} augmentent en fonction de α . Cette augmentation est due probablement à l'intensité du champ de vitesse près de la paroi.

La distribution de la pression effective, suivant la direction d'écoulements z , est mentionnée en Fig. (III.7). L'examen de cette dernière nous permet de remarquer que la pression statique varie linéairement le long de la direction d'écoulement. Cette variation est plus sensible à l'aval de la singularité géométrique notamment avec $\alpha = 90^\circ$. Cela peut être dû à l'intensité des contraintes de cisaillement dans cette zone (*frottement*).

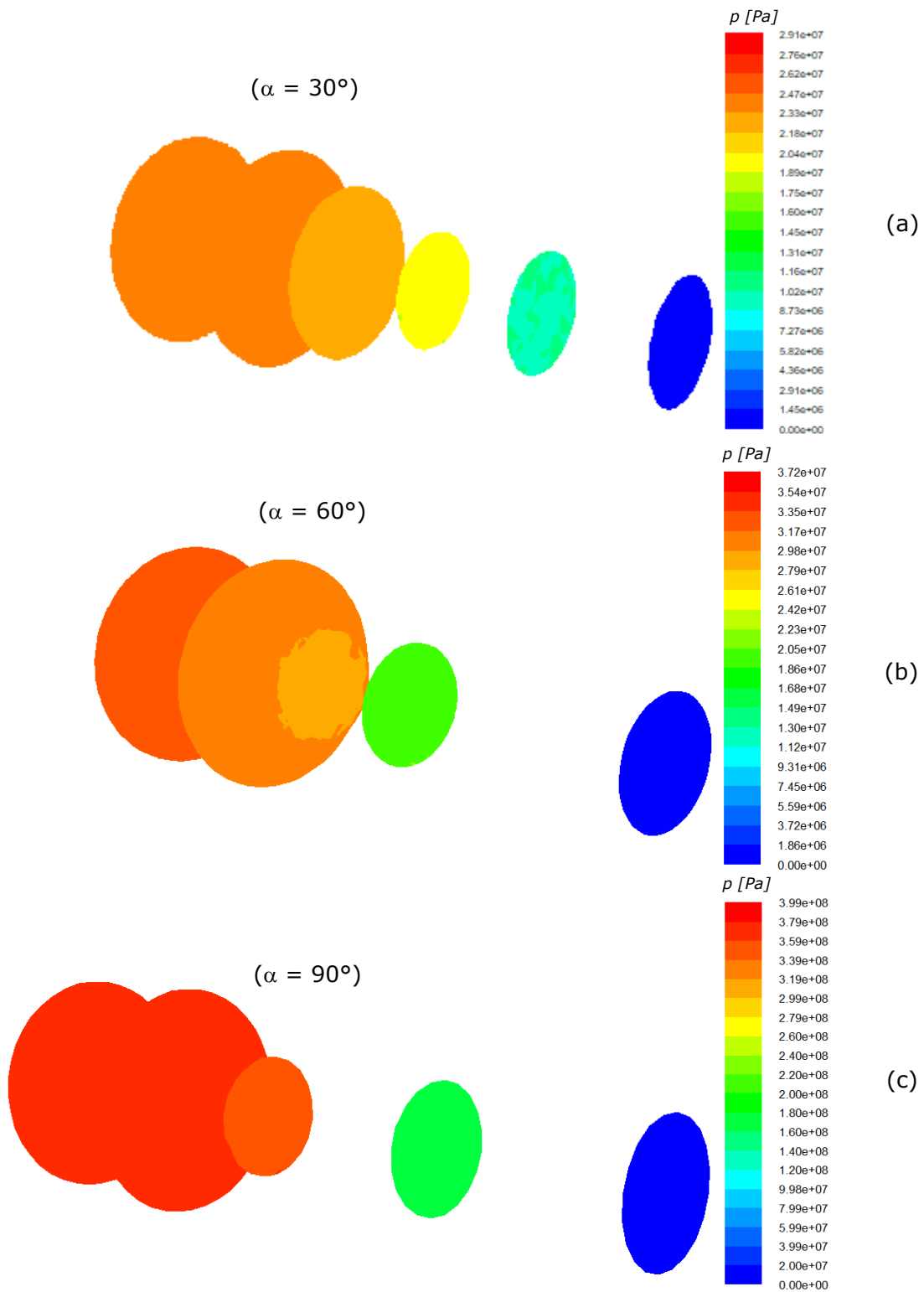


Fig. (IV.7) : Isovaleurs de la pression effective p_{eff} le long de la direction d'écoulement z pour différents angles de convergent ($\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

2.2.3 Influence de la forme de la filière de sortie sur le comportement dynamique de l'écoulement

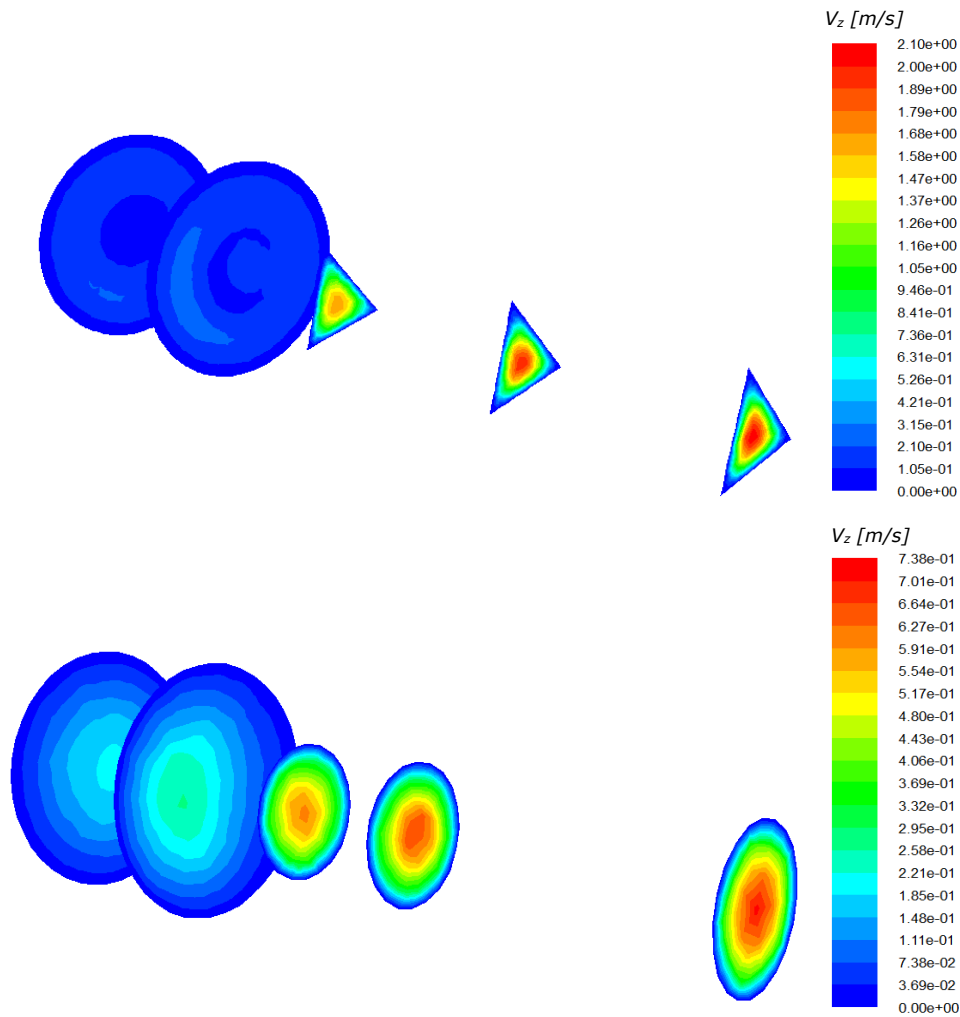


Fig. (IV.8) : Isovaleurs de la composante axiale V_z de la vitesse le long de la direction d'écoulement pour différentes formes géométriques de la filière de sortie.

Le comportement cinématique (*vitesse axiale V_z*) au sein d'une conduite cylindrique à filière de sortie triangulaire est indiqué en Fig. (IV.8). Nous remarquons, d'après cette dernière, que la valeur maximale de la vitesse est toujours localisée sur l'axe de la conduite, notamment à la filière de sortie. Ce résultat est semblable à celui trouvé pour la filière cylindrique. Nous remarquons aussi que la morphologie des isovaleurs de V_z est fortement liée à la forme de la filière. Noter bien que la forme triangulaire est beaucoup rencontrée dans les procédés de mise en forme des polymères.

Pour la conduite à filière triangulaire, la forme des isovaleurs de la contrainte cisaillement τ_{rz} est donnée en Fig (IV.9). En examinant cette dernière, nous remarquons que la contrainte τ_{rz} augmente en se rapprochant de la paroi. Cette augmentation liée sans doute aux forts gradients de vitesse dans cette zone.

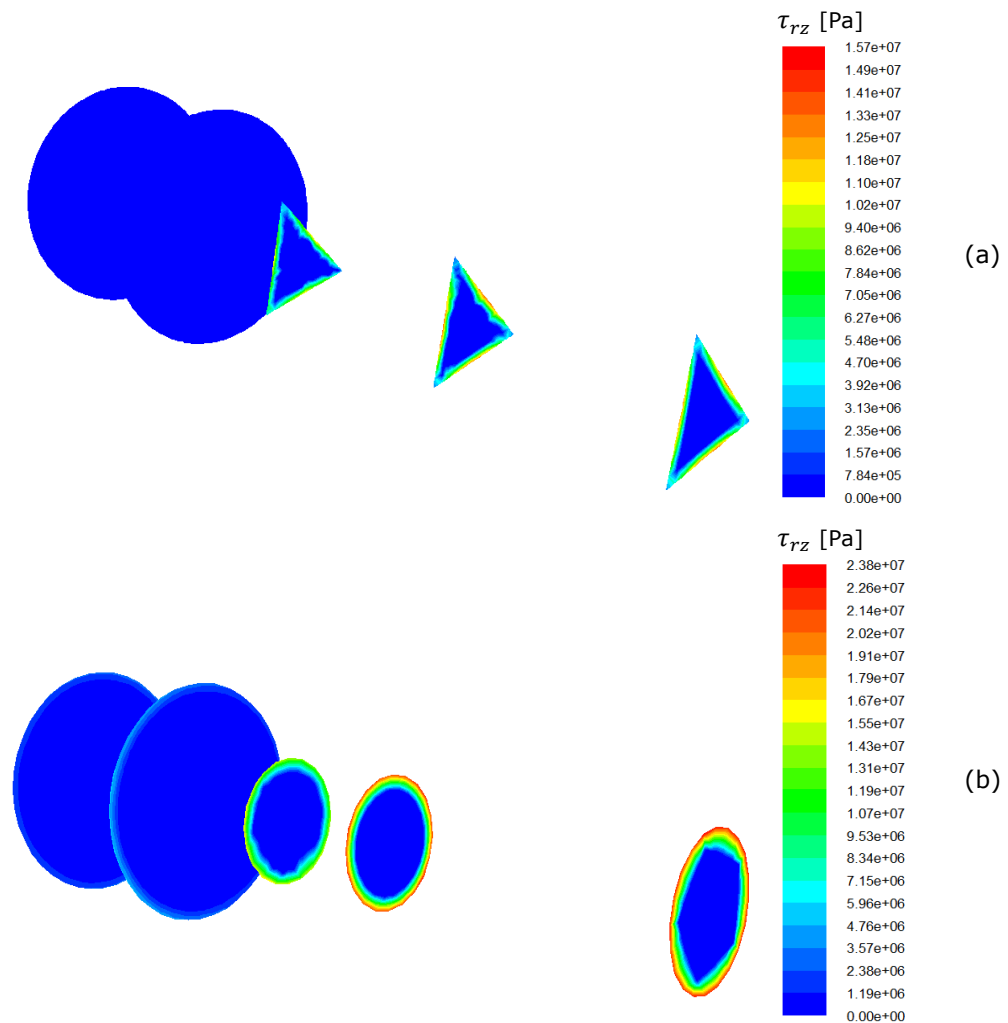


Fig. (IV.9) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} le long de la conduite cylindrique à contraction brusque : (a) filière triangulaire, (b) : filière cylindrique de sortie.

3 Résultats pour le cas Non-isotherme

Dans cette partie nous montrons des résultats liés à la situation Non-isotherme. Autrement dit, on a étudié l'effet de la température de la paroi de la conduite sur le comportement thermique et dynamique de l'écoulement.

En Fig. (IV.10) nous présentons les isovaleurs de la composante axiale de la vitesse V_z le long de la direction d'écoulement, pour les deux situations isotherme et Non-isotherme, modélisées avec les mêmes conditions cinématiques et thermiques. L'analyse de cette figure nous permet de constater que la prise en compte de l'effet thermique engendre l'augmentation de la vitesse de l'écoulement notamment au centre de la conduite. Cela peut s'interpréter par l'augmentation de la résistance du fluide à l'écoulement près de la paroi, c'est-à-dire, l'augmentation de la viscosité avec la diminution de la température

(l'effet de la température est plus remarquable près de la paroi qu'au centre de la conduite à cause de la faible conductivité thermique du polymère).

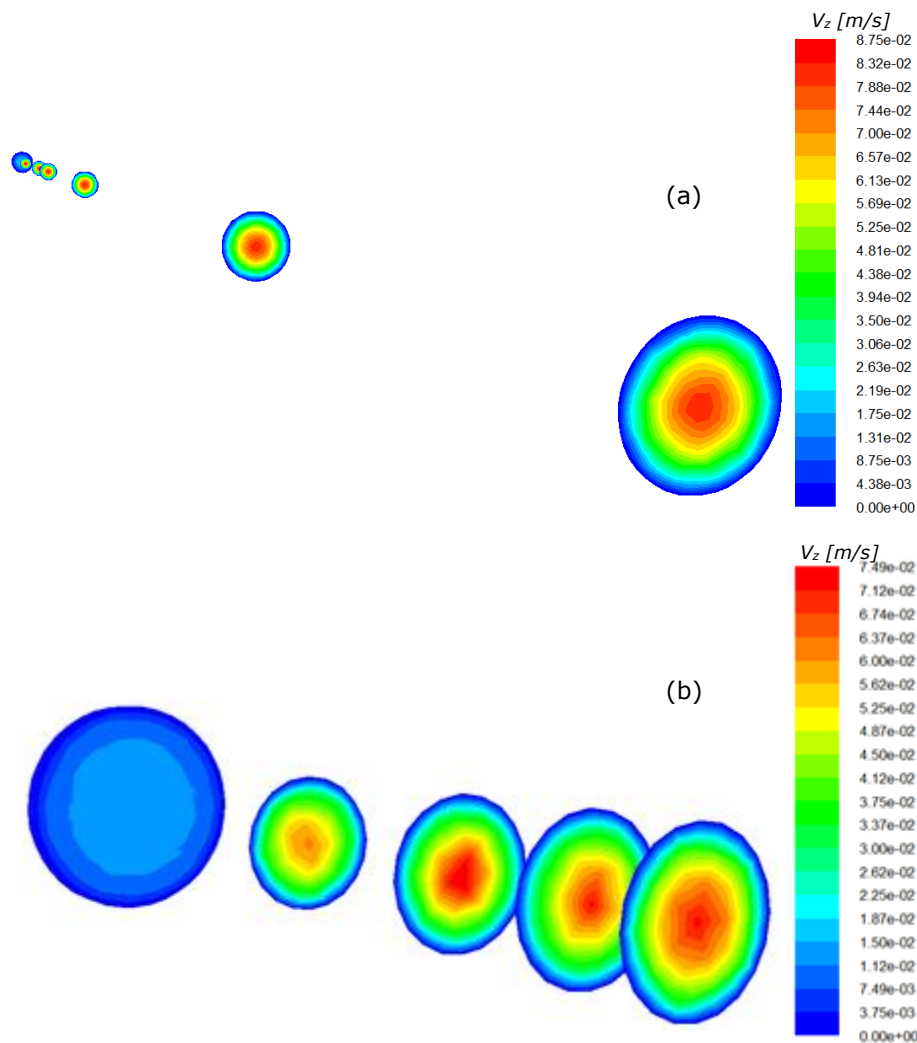


Fig. (IV.10) : Isovaleurs de la composante axiale V_z de la vitesse le long de la direction d'écoulement. (a) Cas Non-isotherme, (b) : Cas isotherme.

La forme des isovaleurs de la contrainte cisaillement τ_{rz} pour les deux cas isotherme et Non-isotherme est schématisée en Fig (IV.11). L'analyse de ces deux cas nous permet de constater que la valeur maximale de cette contrainte est située toujours près de la paroi. Cette remarque peut s'expliquer par le taux de cisaillement élevé près de la paroi, à cause de la condition d'adhérence à la paroi (*vitesse nulle*). Nous constatons aussi que le refroidissement de la filière augmente la viscosité ce qui entraîne l'augmentation de la contrainte de cisaillement ($\tau_{rz\max}$ (cas isotherme) = 2338390.1 [Pa.s], $\tau_{rz\max}$ (cas Non-isotherme) = 431233.6 [Pa.s]).

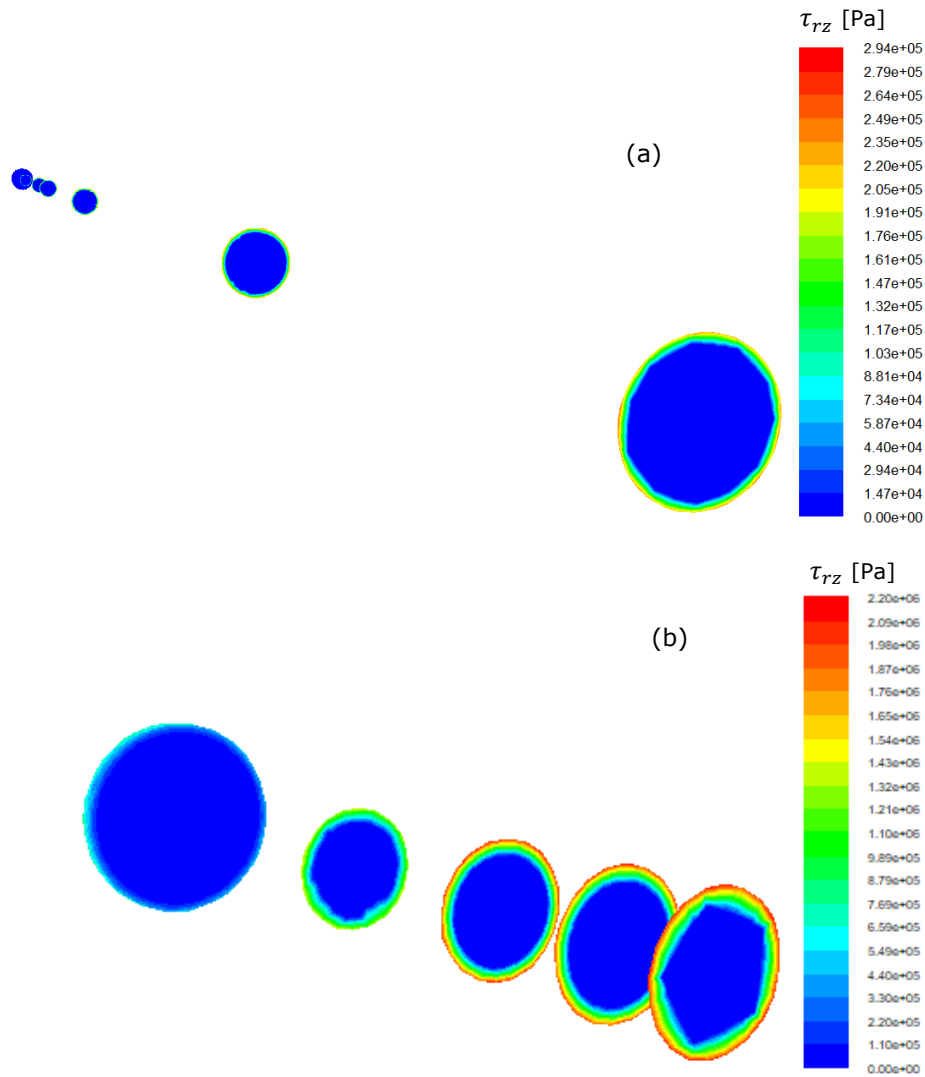


Fig. (IV.11) : Allure des isovaleurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} le long de la conduite cylindrique à contraction brusque : (a) Cas Non-isotherme, (b) : Cas isotherme.

L'effet de refroidissement de la paroi de la conduite cylindrique à contraction brusque ($T_{entreei} - T_{paroi} = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{entree} = 433 \text{ [K]}$) sur le comportement thermique du fluide en écoulement est montré en Fig. (IV.12). Selon cette figure la température de la paroi a peu d'influence sur la distribution thermique au sein du fluide en écoulement. Cette remarque peut s'interpréter par la haute résistance du fluide ($PEBDL$) au transfert thermique conductif ($k = 0.25 \text{ [W.m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$).

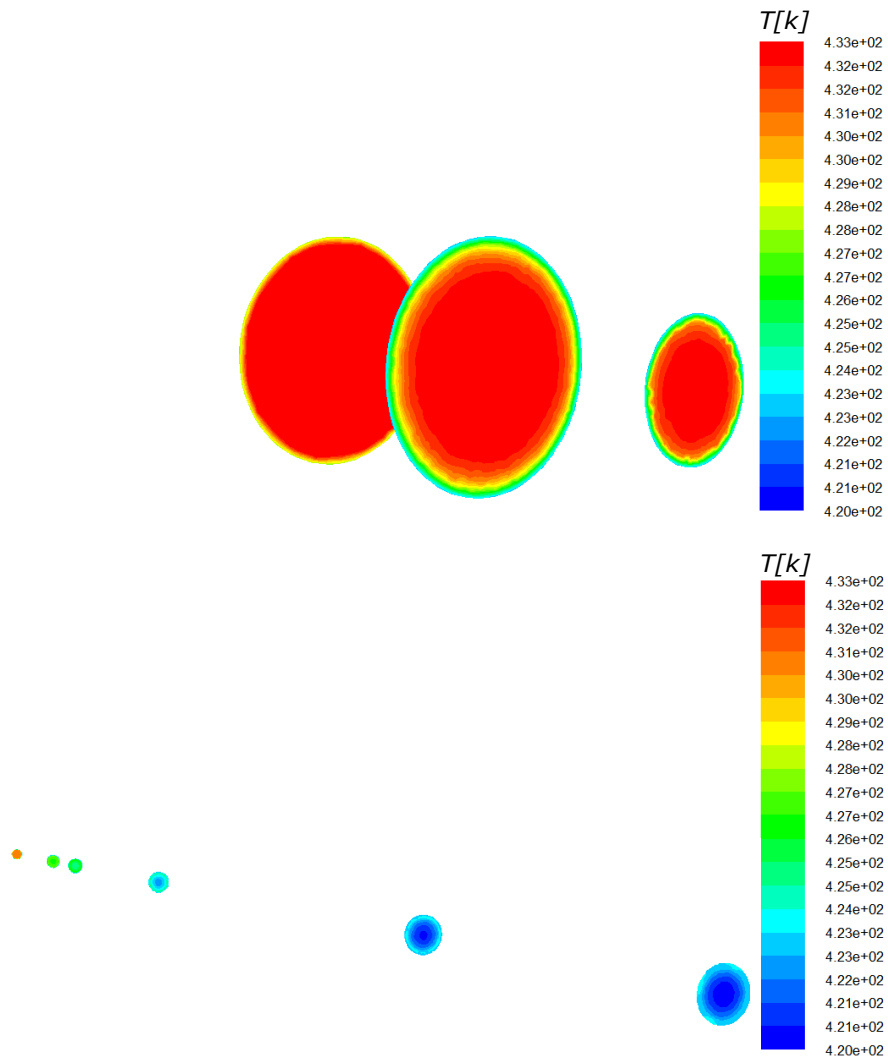


Fig. (IV.12) : Isovaleurs de la Température pour différentes positions z le long de la direction d'écoulement.

4 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à la présentation des résultats numériques issus des simulations, en utilisant le logiciel commercial Fluent, d'écoulements stationnaires isothermes et Non-isothermes de fluide Non-newtonien (PEBDL à $T_0 = 433$ K) à travers des conduites à géométrie complexes. Le modèle mathématique adopté pour la modélisation du comportement rhéologique rhéofluidifiant du PEBDL est la loi de Carreau, dont ces paramètres sont ceux du PEBDL à 433 [K]. L'étude paramétrique numérique a nous permet de constater les points essentiels suivants :

- Pour les cas isothermes :
 - ⇒ La taille des zones de recirculation, engendrées dans les conduites cylindriques à contraction brusques, est inversement proportionnelle au rapport de contraction rap ;
 - ⇒ La pression statique varie linéairement le long de la conduite cylindrique, avec une chute plus élevée à l'aval de la contraction brusque ;
 - ⇒ La morphologie des isovaleurs est fortement liée à la forme de la filière de sortie.

- Pour les cas non-isothermes :
 - ⇒ Le refroidissement de la paroi de la conduite cylindrique a peu d'influence sur le comportement thermique et dynamique du fluide en mouvement.

Conclusion Générale

Dans l'industrie de mise en forme des matières plastiques, la compréhension par voie expérimentale, ou bien numérique, du comportement rhéologique des matières plastiques (*polymères*) en écoulement, facilite l'amélioration de la qualité des produits finis. Cette qualité, et d'après plusieurs résultats scientifiques, est étroitement liée à l'état cinématique des matières fondus utilisées pour la fabrication de ces produits.

Le procédé de l'extrusion représente une des procédés de mise en forme le plus reconnu dans le monde de l'industrie plastique. La plupart des objets plastiques utilisés quotidiennement sont fait par ce procédé.

La dégradation des produits finis à la sortie de l'extrudeuse est due généralement à la perturbation de l'écoulement de polymère au sein de la filière. Cette perturbation vient principalement de la forme géométrique de la filière et de leur température (*température de la paroi de la filière très élevée que celle de l'atmosphère*).

La présence des singularités géométriques (*contraction brusque, convergent, etc.*) influe considérablement l'état dynamique du polymère en écoulement. Autrement dit, elle dégrade sous certaines conditions la qualité des produits finis. Donc la compréhension du comportement dynamique et thermique du fluide en écoulement, à travers des conduites à géométrie complexes, peut éviter la dégradation de la qualité des produits finis (*évitée les conditions de dégradation*).

Le présent travail évoque une simple contribution scientifique, afin de comprendre le comportement dynamique et thermique de fluide Non-newtonien (PEBDL) à travers de conduites à géométries complexes. L'étude numérique effectuée dans ce travail a pour objectif de comprendre l'influence des contraintes géométriques, cinématiques et thermiques sur le comportement en écoulement du PEBDL au sein de la conduite cylindrique en question.

L'ensemble des résultats obtenus par nos simulations ont nous permettent de constater le suivant :

- ✓ La taille de la filière de sortie est inversement proportionnelle au champ de vitesse ;
- ✓ Les zones de recirculation ont des tailles liées inversement au rapport de contraction ;

- ✓ La pression change linéairement le long de la conduite a singularité géométrique, avec une intensité plus élevée à l'aval de cette dernière ;
- ✓ La forme de la filière de sortie influe considérablement sur la morphologie des isovaleurs des propriétés dynamiques à la sortie de la conduite ;
- ✓ Le refroidissement de la paroi de la conduite cylindrique a peu d'influence sur le comportement dynamique et thermique du fluide en écoulement.

Pour les perspectives, on propose les points suivants :

- ✓ Choix d'autres lois de comportement rhéologiques afin de décrire mieux le comportement microscopique du polymère ;
- ✓ L'étude des moyens assurant le bon refroidissement du polymère (*température de sortie proche de celle de l'atmosphère*) ;
- ✓ L'étude du phénomène instationnaire.

Les références

- [1] L'Isle-**Adam**, *Les plastiques en débat*. Ensemble Scolaire Notre Dame 39 rue Saint Lazare, 2010. (principe de fonctionnement de l'extreudeuse)
- [2] R-**F-Fedors**, *Polymer Engineering and Science*, 14 2,147-154 (1974). (*diffirent type de polymère*)
- [5]**BELAID Latifa, OUYESSAD Lydia**. Identification des paramètres d'une loi de comportement d'un fluide non -Newtonien et leur implémentation dans le code CFD, (2017).
- [6]**Abdelhakim Ben Slimane**, Rhéologie et écoulement de fluides chargés : application aux réseaux d'assainissement urbains : étude expérimentale et modélisation, (2012).
- [7] **Belhenniche-A**, Simulation numérique d'écoulements non newtonien avec glissement à travers des conduites axisymétriques à convergent avec la prise en compte thermodépendance. Projet de Fin D'étude Marter Université M'sila, (2013).
- [8] **Chine-A**, simulations numériques d'écoulement de fluides anélastiques et viscoélastiques dans des conduites bidimensionnelles avec prise en compte de la thermo-dépendance et de la cristallisation. Thèse de Doctorat Institut National de Polytechnique de Grenoble, (2002)
- [9] **A. Bionchi, Y. Fantrelle, J. Etay**. « Transferts thermiques ». Presses polytechniques et universitaires romandes, pp.189-192 (2004).
- [10] **Stanley Middleman**, the flow of high polymers : continuun and moleculer rhology. University of rochester, New York 1968

Webographie

- [3] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-rheologie-2093/>
- [4] <http://rolesdesfluidesnonnewtoniens.e-monsite.com/pages/introduction-sur-la-difference-entre-un-fluide-newtonien-et-un-fluide-non-newtonien.html>
- <https://www.wikipedia.org/>

Résumé

Le présent travail a pour objectif la compréhension, par voie numérique (*logiciel Fluent*), du comportement en écoulement de fluide Non-newtonien (*fluide de Carreau*), à travers des filières à contraction brusque, en relation avec les procédés de mise en forme par extrusion. Les caractéristiques du fluide en écoulement sont celles du Polyéthylène Basse Densité linéaire 'PEBDL', mesurées à 433 [K]. Les résultats obtenus par nos simulations, nous permettent de constater que la variation des paramètres géométriques et cinématiques peuvent influencer le comportement dynamique de l'écoulement. Par contre, le changement des paramètres thermiques ont peu d'influence sur ce comportement.

Abstract

The present work aims to understand, numerically (Fluent software), the flow behavior of Non-Newtonian fluid (Carreau fluid), through abrupt contraction dies, in relation to the processes of shaping. Extrusion. The characteristics of the flowing fluid are those of linear Low Density Polyethylene 'LLDPE', measured at 433 [K]. The results obtained by our simulations, allow us to note that the variation of the geometrical and kinematic parameters can influence the dynamic behavior of the flow. On the other hand, the change of the thermal parameters have little influence on this behavior.

ملخص

يهدف العمل الحالي إلى فهم، عددياً (برنامج tneulf)، سلوك التدفق للسائل غير النيوتوني (سائل uaerrac) من خلال الاختناق المفاجئ، فيما يتعلق بعملية التشكيل البثق، خصائص السائل المتدفق هي خصائص خط البولي إيثيلين منخفض الكثافة الخطي LDBEP، و الذي يقاس عند [433 K]، نتيج لنا النتائج التي تم الحصول عليها من خلال عمليات المحاكاة لدينا ملاحظة أن اختلاف المعلمات الهندسية و الحركية يمكن ان يؤثر على السلوك الديناميكي للتدفق. من ناحية أخرى فإن تغيير المعايير الحرارية لها تأثير ضئيل على هذا السلوك.