

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب لعين تموشنت
Université Belhadj Bochaib d'Ain-Temouchent
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Thème

*Etude numérique des transferts de chaleur pour
un écoulement de polymère fondu en régime non
stationnaire dans une matrice circulaire.*

Présenté Par :

- 1) Hadj Ali Mohamed El Amine
- 2) Mecabih Habib

Devant les jurys composés de :

Bounif Abdelhamid	Dr	U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Nehari Tayeb	Dr	U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dorbane Abdelhakim	Dr	U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Nous remercions Dieu Tout Puissant de nous avoir donné la force, le courage et la patience pour l'élaboration de ce modeste travail.

Nous remercions nos parents pour leurs sacrifices

« Merci d'être ce que vous êtes »

Nous remercions notre enseignant : Dr NEHARI Tayeb, pour leur encadrement, leur aide et surtout leur patience tout au long de l'année 2020/2021.

Merci d'avance aux membres du jury, qui nous ont honorés de leurs participations et attentions portées à notre mémoire de fin d'études

Enfin, nous remercions vont à tous ceux et à toutes celles, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail avec générosité et un égard exemplaires.

dédicaces

À ma très chère mère

Quoi que je fasse quoi que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotes a toujours été ma source de forces pour affronter les différents obstacles.

À mon très cher père

Tu as toujours été à mes cotes pour me soutenir et m'encourager que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

Puisse dieu vous donne sante et bonheur.

البثق هو عملية تشكيل تستخدم على نطاق واسع في صناعات مختلفة مثل البلاستيك والمعادن والسيراميك وصناعة الأغذية. ومع ذلك، يجب أن تخضع المواد لضغط عالي ومستويات إجهاد ليتم بثها بمعدلات تدفق كافية.

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الانسيابية للبوليمر البولي إيثيلين المنخفض الكثافة (البولي إيثيلين منخفض الكثافة) من خلال مصفوفة واحدة، محاور محايد. هذا البوليمر يعتبر سائل نيوتوني معمم. تم تنفيذ المحاكاة العددية بفضل برنامج "POLYFLOW" الذي طورته شركة ANSYS، وتستند شفرة الحساب هذه إلى طريقة العناصر المحدودة، وهي مصممة خصيصاً لتدفقات البوليمرات. يتطلب برنامج "POLYFLOW" شفرة GAMBIT كمعالج مسبق لشبكة العناصر المحدودة. معلمات الحساب التي توفرها شفرة Polyflow هي السرعة، ومعدل القص، والضغط واللزوجة الديناميكية، والأقمشة الحالية.

يشير العمل الحالي مساهمة علمية بسيطة، من أجل فهم السلوك الديناميكي للسائل النيوتوني (PVC) من خلال الأشكال الهندسية المعقدة. تهدف الدراسة العددية التي أجريت في هذا العمل إلى فهم تأثير الضغوط الهندسية على سلوك تدفق PVC داخل الشكل المخروطي.

Résumé

L'extrusion est un procédé de mise en forme très répandu dans des industries variées telles que la plasturgie, la métallurgie, les céramiques, ou encore l'industrie agroalimentaire. Les matériaux doivent cependant être soumis à des niveaux de pression et de contrainte élevés pour être extrudés à des débits suffisants.

L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques rhéologiques du polymère PVC en extrusion à travers une matrice simple et axisymétrique. Ce polymère est considéré comme un fluide Newtonien généralisé. Les simulations numériques ont été réalisées grâce au logiciel

« POLYFLOW » développé par la firme ANSYS 2020, ce code de calcul est basé sur la méthode des éléments finis, il est spécialement conçu pour les écoulements des polymères. Les paramètres de calcul fournis par le code Polyflow sont la vitesse, le taux de cisaillement et la pression.

Le présent travail évoque une simple contribution scientifique, afin de comprendre le comportement dynamique du fluide newtonien (PVC) à travers des géométries complexes. L'étude numérique effectuée dans ce travail a pour objectif de comprendre l'influence des contraintes géométriques, sur le comportement en écoulement du PVC au sein d'une conique en question.

Abstract

Extrusion is a very common forming process in a variety of industries such as plastics, metal, ceramics and food. However, the materials must be subjected to high levels of pressure and stress to be extruded at sufficiently high rates.

The objective of this study is to determine the rheological characteristics of PVC polymer extruded through a simple axisymmetric die. This polymer is considered as a generalized Newtonian fluid. The numerical simulations were carried out using the "POLYFLOW" software developed by the firm ANSYS 2020, this calculation code is based on the finite element method and is specially designed for polymer flows. The calculation parameters provided by the Polyflow code are velocity, shear rate and pressure.

The present work evokes a simple scientific contribution to understanding the dynamic behaviour of Newtonian fluid (PVC) through complex geometries. The numerical study carried out in this work aims to understand the influence of geometrical constraints on the flow behaviour of PVC within a cone in question.

Sommaire

Remerciement	i.
Dédicace	ii.
ملخص	iii.
Résumé	iv.
Abstracts	v.
Sommaire	vi.
Liste des figures	vii.
Liste de tableaux	viii.
Nomenclature	ix.
Introduction générale	01
Chapitre I Recherche bibliographique	05
I.1 Introduction	05
Chapitre II Généralités sur les polymères	10
II.1 Introduction	10
II.2 Définition d'un polymère	11
II.3 Différentes classes de polymères	11
II.3.1 Classification selon l'origine	11
II.3.1.1 Classification selon l'architecture	12
II.3.1.2 Classification selon la structure chimique	12
1. Les homopolymères	12
2. Les copolymères	12
II.3.1.3 Classification selon le comportement thermique	13
A. Les thermoplastiques	13
B. Les thermodurcissables	13
C. Les élastomères	13
II.4 Le Polymère utilisé pour la simulation	14
II.5 Le film en PVC plastifié	14
II.6 Propriétés de la résine PVC	15
II.7 Additifs du PVC	16
II.8 La rhéologie	17
Chapitre III Formulation mathématique et méthode numérique	19
III.1 Introduction	19
III.2 La Propriétés des Polymère	21
III.3 Modèle mathématique	22

III.1 Equation de Bilan de Matière	22
III.2 Equation de quantité de mouvement	22
III.3 Equation d'énergie (équation de la chaleur)	23
III.4 Méthodes numérique	24
III.5 Méthodes des éléments finis	24
III.6 La rhéologie du polymère	25
III.6.1 Viscosité Constant	26
III.6.2 Loi de puissance	26
III.6.3 Loi Bird-Carreau	27
III.6.4 Loi de Cross	27
III.6.5 La loi de Cross modifiée	28
III.6.6 Loi de Bingham	28
III.6.7 loi de Bingham modifiée	28
III.6.8 Lois De Herschel-Bulkley	29
III.6.9 Lois De Herschel-Bulkley modifiée	29
III.6.10 Loi de Log Log	29
III.6.11 Loi de Carreau-Yasuda	29
III.7 Etude de quelques grandeurs caractéristiques de l'écoulement	30
III.7.1 Le nombre de Reynolds	30
III.7.2 Le nombre de Stokes	30
III.7.3 Le nombre de Peclet	31
III.7.4 Le nombre de Cameron-Ca	31
III.7.5 Le nombre de Brinkman – Br	32
Chapitre IV Résultats et discussion	34
IV.1 Introduction	34
IV.2 Présentation du logiciel polyflow	34
IV.3 Interface utilisateur "Polyflow" dans Workbench	36
IV.4 Choix du modèle rhéologique	39
IV.5 Conditions aux limites	39
IV.6 Spécifiez la région où le remaniement doit être effectué	39
IV.7 Définissez les paramètres du système d'épines	39
IV.7.1 Affectez la fonction de flux	40
IV.7.2 Pré-processeur	40
IV.8. Solveur POLYFLOW	40
IV.9. Le problème à résoudre	41
IV.10 Résultats et discussions	41
IV.10.1 Caractéristiques des maillages des domaines d'études	41
IV.10.2 Influence de l'angle du convergent sur le comportement dynamique de l'écoulement ($\alpha= 30^\circ, 50^\circ$ et 70°)	43
IV.10.2.1 Etude l'influence de l'angle en fonction pression	43
IV.10.2.2 Etude l'influence l'angle en fonction vitesse	44
IV.10.2.3 Effet l'influence du débit en fonction de la distribution de taux de cisaillement local	45

IV.10.3 Etude l'influence de l'angle en fonction pression suivant Plan (xy) et (xz)	
IV.10.4 Etude l'influence de l'angle en fonction vitesse suivant Plan (xy) et (xz)	48
IV.10.5 Etude l'influence de l'angle en fonction contrainte cisaillement suivant Plan (xy) et (xz)	49
IV.10.6 La variation vitesse suivant l'axe (xx), (yy), (zz) en fonction les trois angles	50
Conclusion générale et perspectives	55
Référence bibliographiques	58
Annexe	60

INDICE DES FIGURES

	Page
<u>Chapitre II</u>	
Fig. 2.1. Classification des architectures macromoléculaires	11
Fig. 2.2. Représentation de Lewis de la formule du PVC	
<u>Chapitre III</u>	
Fig. 3.1 Extrudeuse mono vis	20
Fig. 3.2 Profile étudié (Filière d'extrudeuse)	21
Fig.3.3 Domaines d'application de la méthode des éléments finis	
<u>Chapitre IV</u>	
Fig.4. 1 Interface graphique du "Polyflow" dans "Workbench"	36
Fig. 4.2 Filière a étudié	37
Fig. 4.3 : Simulation de l'extrusion par le code « Polyflow » (Polydata)	39
Fig. 4.4 : Modèle étudié	40
Fig. 4.5 : Vue globale du maillage M1 adopté pour les simulations	41
Fig. 4.6 La variation de pression pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	42
Fig. 4.7 La variation de vitesse pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	43
Fig. 4.8 La variation de contraintes de cisaillement pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	44
Fig. 4.9 La variation de pression suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	45
Fig. 4.10 La variation de vitesse suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	46
Fig. 4.11 La variation de contrainte de cisaillement suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30°C, 50°C et 70°C	47
Fig. 4.12 Les vitesses suivant l'axe (xx) et l'axe (zz) 30°C	48
Fig. 4.13 Les vitesses suivant l'axe (xx) et l'axe (zz) 50°C	49
Fig. 4.14 Les vitesses suivant l'axe (xx) et l'axe (zz) 70°	50

Liste des tableaux

	Page
<u>Chapitre III</u>	
Tableau 3.1 : Les caractéristiques des matériaux polymères	21
<u>Chapitre IV</u>	
Tableau 4.1 : Test de maillage	32

Symboles

R_1	Diamètre entré de géométrie (cône)	cm
R_2	Diamètre sortie de géométrie (cône)	cm
α	Angle	°
L_1	Longueur section circulaire	cm
D_{ij}	tenseur de déformation	s^{-1}
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
n	indice de la loi puissance	/
P	pression	Pa
Q	débit volumique	cm^3/s
Re	nombre de Reynolds	/
St	nombre de stokes	/
t	le temps	s
x,y,z	Composent cartésienne	m
u,v,w	les trois composants de la vitesse	$m.s^{-1}$

Symboles Grecs

$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	s^{-1}
μ	Viscosité apparent	Pa.s
ρ	Masse volumique	kg/m^3
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
ω	vitesse angulaire de rotation	rad/s

Symboles Mathématiques

\exp	exponentielle
δ_{ij}	symbole de Kronecker
∇	vecteur gradient
∂	Différentielle partielle
∞	Infini
\sim	Tenseur
\rightarrow	Vecteur

INTRODUCTION

L'extrusion est un procédé de mise en forme très répandu dans de nombreuses applications industrielles telles que la plasturgie, la métallurgie, les céramiques ou l'industrie agroalimentaire. Le procédé d'extrusion permet de fabriquer des produits de sections constantes (films, plaques, tubes, profiles...) au sein d'un système vis fourreau par passage au travers d'un outillage appelé matrice. Les fonctions principales du procédé sont : assurer la fusion du polymère solide, puis la mise en pression du mélange du polymère fondu, afin d'alimenter dans de bonnes conditions la matrice, qui donnera sa forme au produit fabriqué.

La première matière plastique est née en 1870. Il s'agit du nitrate de cellulose ou celluloid, obtenu à partir du camphre et de la cellulose, qui fut utilisé par les frères Hyatt pour remplacer l'ivoire dans la fabrication des boules de billard. Néanmoins ce n'est que dans la première partie du vingtième siècle que fut développée la chimie de synthèse qui allait donner naissance aux « Grands thermoplastiques » tels le Polystyrène ou le Polychlorure de Vinyle, dont les noms nous sont familiers. Néanmoins, avant de devenir des produits communs, il a fallu développer un certain nombre de procédés industriels de mise en forme de ces polymères. . Notons à ce propos que la plasturgie (discipline qui étudie ces procédés de mise en forme) est peu utilisée en Algérie.

Si les polymères connaissent aujourd'hui un tel succès, les procédés de mise en forme sont encore loin d'être parfaitement maîtrisés. En effet, les polymères sont des matériaux aux propriétés complexes, évoluant avec les contraintes appliquées, la température et la pression.

Gonflements, retraits, déformations sont quelques uns des problèmes rencontrés lors de la mise en forme, que ce soit par moulage, extrusion ou autre. Ceci rend l'optimisation des procédés très difficile. Pour ajouter à cette situation, le prix d'un moule ou d'une filière d'extrusion est très élevé. Le moindre défaut de conception coûte extrêmement cher à l'entreprise et il n'est pas envisageable de tester plusieurs moules « juste pour voir ».

Fort heureusement le développement de l'informatique permet aujourd'hui de simuler des écoulements complexes dans des géométries tridimensionnelles élaborées. De fait, la simulation numérique constitue une alternative appréciable, notamment en termes de coût. Les résultats de cette technique sont toutefois fortement tributaires de

la qualité de la modélisation et du paramétrisation. Ainsi la simulation est d'autant plus fiable qu'on connaît avec précision la masse volumique, la loi de comportement rhéologique, la température imposée, le débit, la pression etc.... Bien entendu, il est souvent impossible de connaître avec précision tous ces paramètres. Ainsi la température imposée au moyen d'une chaufferette ne sera pas forcément homogène sur tout l'espace recouvert. De même, la dépendance de la masse volumique à la température n'est pas forcément connue avec précision.

OBJECTIFS DU MEMOIRE

L'objectif de cette étude est de simuler l'écoulement du polymère fondu à l'intérieur de la matrice d'extrusion. Le polymère fondu, suit une loi de comportement rhéologique de Bird-Carreau. C'est un écoulement de type Newtonien généralisé. La simulation numérique est réalisée à l'aide du code de calcul " POLYFLOW " spécialement conçu pour l'étude des écoulements des polymères. Ce code de calcul est basé sur le principe de la méthode des éléments finis. La forme géométrique de la matrice a été conçue et est maillée par « workbench ». En dernier lieu, pour le post-processing des résultats fournis de calcul par CFD, Ansys 2020.

STRUCTURE DU MEMOIRE

Ce mémoire de master comporte quatre chapitres.

Après une **introduction générale** sur l'extrusion et les polymères et leurs utilisations

Le **chapitre I** est réservé à l'étude bibliographique sur l'extrusion. Il comporte les travaux expérimentaux et numériques.

Le **chapitre II** Dans ce chapitre nous présenterons des généralités et définitions sur Les polymères, spécialement le PVC.

Le **chapitre III** est destiné à la formulation mathématique des équations de Navier Stokes et la modélisation par la méthode des éléments finis.

Dans le **chapitre IV**, on discute les résultats de la modélisation numérique, le calcul du champ de pression, de la vitesse et du taux de cisaillement pour les différentes configurations géométriques.

Enfin, une **conclusion générale** sur le travail effectué est les différentes perspectives.

chapitre I

Recherche bibliographique

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Au cours de ces dernières années, de nombreux progrès ont été faites dans le domaine des nouveaux matériaux et particulièrement dans celui des polymères. La diversité des propriétés des polymères et leur facilité de mise en forme ont contribué au large développement de l'industrie des matières plastiques (Guy 2001). Cependant, selon (Vergnes et Puissant2002b) des défauts d'extrusion peuvent apparaître en limitant sensiblement ces procédés de transformation. Ce problème industriel crucial dans la mise en forme des matières plastiques adonné lieu à de nombreuses recherches sur les écoulements des polymères fondus.

Souvent les ingénieurs s'intéressent à trouver des formes optimales de la matrice de l'extrudeuse afin de réduire les charges et contrôler la microstructure des matériaux à former, ceci est faite dans l'objectif de réduire les coûts de production au minimum et d'obtenir un produit sain ou avec peu de défauts (Guy 2001). Dans l'extrusion, le procédé de conception de la matrice est très souvent un processus d'essai et correction et un certain nombre d'essais d'extrusion est nécessaire avant d'atteindre une conception satisfaisante (Vergnes et Puissant 2002a, 2000b). Une matrice d'extrusion bien conçue devrait avoir une vitesse uniforme à la sortie afin d'éviter la distorsion et être capable de fournir une section dans la gamme des tolérances indiquées (Michaeli 1992).

Une des premières techniques de corriger ou de contrôler l'écoulement du matériau dans les matrices d'extrusion est en changeant la longueur du palier de la matrice ou la profondeur de l'ouverture de la matrice (Ulysse 1999). Selon ce dernier auteur en réduisant la longueur du palier à un endroit particulier de l'ouverture de la matrice, la résistance à l'écoulement diminue et le débit augmente. L'effet opposé est réalisé quand la longueur du palier est augmentée. Une vitesse uniforme à la sortie de la matrice peut être obtenue donc, en changeant la longueur du palier. En ce sens, des matrices profilées sont utilisées de profils conçus pour s'adapter à l'écoulement plastique.

Le tracé d'écoulement dans ces matrices est habituellement plus uniforme que celui trouvé dans les matrices carrées. Quelques tentatives ont été faites dans le domaine de la conception de la matrice d'extrusion. La plupart d'entre elles sont orientées vers des matrices profilées optimales pour réduire au minimum la pression d'extrusion (Balaji et al. 1991; Nagpal et al. 1979; Gunasekera et Hoshino 1985). Nagpal et al. (1979) ont utilisé des

méthodes simplifiées pour concevoir la surface profilée de la matrice pour une extrusion de section "T" de sorte que le matériau extrudé sort de la matrice sans se plier ou se tordre.

Récemment, (Maniatty et Chen 1996) ont effectué une analyse de sensibilité de la forme en utilisant une matrice profilée. Ils ont déterminé la sensibilité de la puissance totale d'extrusion à la géométrie de la matrice. Cependant, ces matrices tendent à être chères à fabriquer et par conséquent ne sont pas largement utilisées dans la pratique. Bien que, (Kusiak et Thompson 1989), aient aussi considéré une matrice profilée, ils ont également étudié les problèmes d'équilibre d'écoulement dans l'analyse de l'extrusion d'une tige bimétallique. (Ulysse et Johnson 1999) ont adopté des méthodes de la théorie asymptotique pour l'extrusion des sections minces et ont conçu des longueurs de palier pour aboutir un écoulement uniforme à la sortie de la matrice. L'écoulement du métal a été modelé comme un fluide linéairement visqueux. En outre, l'effet du fourreau sur l'écoulement du métal n'a pas été pris en compte dans leur travail.

La conception de la matrice d'extrusion à deux sorties est utile pour de mince section d'extrusions où l'écoulement traversant l'orifice de la matrice est pratiquement bidimensionnel. Concevoir des paliers d'une matrice à deux orifices carrés de sorte que le matériau sort des deux orifices avec un écoulement parallèle équilibré a fait l'objet de beaucoup de recherches. (Ulysse 1999) a utilisé la méthode des éléments finis combinée avec une technique d'optimisation pour pouvoir déterminer la longueur optimale du palier tout en obtenant une distribution la plus uniforme que possible de vitesse de sortie. La comparaison des résultats analytiques obtenue avec ceux trouvés expérimentalement par (Keife 1993) montre une bonne validité de la méthode numérique utilisée.

Récemment, (Carreras 2005) ont étudié expérimentalement l'effet de la pression sur la stabilité de l'écoulement lors de la mise en forme par extrusion des polymères. Les résultats obtenus montrent que le changement de la pression de l'amant à l'aval de l'extrudeuse n'influe pratiquement pas sur la contrainte de cisaillement et l'élongation. D'autre part, l'auteur a signalé que des instabilités peuvent naître pour une contrainte de cisaillement critique caractérisée l'apparition des instabilités viscoélastiques quelle que soit la pression moyenne.

(Pujos 2006) a réussi par la mise en place d'une méthode d'estimation de rhéologie à partir de mesures des débits et des températures pour une filière bien isolée. Ainsi, la méthode développée permet d'obtenir une connaissance du comportement rhéologique précise, sans l'hypothèse d'isotherme habituellement faite pour les mesures rhéologiques expérimentales.

Elle génère un modèle rhéologique adapté au code de simulation numérique du point de vue de l'écoulement et de la thermique.

Dans le passé, la prédiction numérique de l'extrusion des polymères était un procédé de grand challenge. Cependant, avec le développement continu et rapide des moyens de calcul et avec le développement des nouvelles techniques numériques, il est maintenant possible de simuler, d'analyser, et d'optimiser les processus d'extrusion de géométries complexes, tenant compte du comportement non linéaire et viscoélastique du polymère fondu.

Avec les simulations numériques, les champs de la vitesse, de la pression, et de la température à l'intérieur de la matrice d'extrusion peuvent être obtenus, qui est autrement impossible expérimentalement. La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes les plus employées aujourd'hui pour résoudre les équations aux dérivées partielles de Navier-Stokes régissant l'extrusion. Elle a été d'abord utilisée pour résoudre des équations d'élasticité et de mécanique des structures et adaptée plus tard à la Mécanique des Fluides (MDF). La MEF est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle ou artificielle. La synthèse de telles molécules appartient à la chimie macromoléculaire dont Hermann Staudinger fut le précurseur dans les années 1920 à 1930. Elle passe par la modification chimique d'un polymère naturel ou bien l'utilisation d'une réaction de polymérisation. Cette polymérisation se décline en plusieurs types que nous ne développerons pas ici. Il nous suffit de retenir que la polymérisation consiste à établir des liaisons covalentes entre petites molécules (les motifs de base du polymère) appelées monomères. Les polymères peuvent être générés à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homopolymère, c'est le cas du polyéthylène) ou de différents monomères (on parle cette fois-ci de copolymères). Ce dernier cas est utilisé pour combiner les propriétés physiques des différents monomères, permettant l'obtention d'un polymère aux propriétés « ajustées ». (PUJOS 2006)

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées en tenant compte du temps (ou vitesse d'application de contraintes). Plus généralement, elle étudie la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps dans le matériau. Dans le cas des polymères, la rhéologie n'étudie donc que les déplacements qui sont grands par rapport à la taille des macromolécules. Les mouvements intramoléculaires et l'enchevêtrement des chaînes sont des mouvements que la rhéologie par

nature ne peut pas décrire. En revanche, ces mouvements locaux sont à la base de l'explication du comportement rhéologique des polymères fondus.

La viscosité est un paramètre très important dans l'étude de l'écoulement du polymère, cette dernière fonction de certain paramètre qui est:

- Le poids moléculaire du polymère;
- La température;
- La pression;
- Le taux de cisaillement ; (DJOUDI, Tarek 2005)

L'extrudeuse est associée à une filière qui donne au polymère la forme d'un profilé de grande longueur de section choisie. Bien qu'on s'intéresse particulièrement aux polymères, l'extrusion s'applique aux matériaux mais également aux pâtes alimentaires et à l'argile. Elle permet une mise en forme précise même pour des géométries complexes (parfois creuses). On l'utilise donc pour produire des tubes, des feuilles, des plaques, des profilés, des isolations de câbles électriques ou téléphoniques. A la sortie de la filière, le produit peut également subir d'autres traitements, par exemple le soufflage, technique qui permet de produire des films d'emballage plastiques (Carreras 2005)

chapitre II

Généralités sur les polymères

Chapitre II

Généralités sur les polymères

II.1 INTRODUCTION

Les polymères, appelés communément "matières plastiques", sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités: des objets les plus banals jusqu'à des applications techniques sophistiquées, en passant par leur utilisation dans les produits d'hygiène ou alimentaires.

Le plus souvent synthétiques, quelquefois naturels, ils doivent cet essor à leurs larges gammes de caractéristiques, durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelquefois conducteurs, plus ou moins résistants aux conditions agressives de leur usage, toujours légers. (Chabane Fouad 2009)

II.2 Définition d'un polymère :

Un polymère est une macromolécule dans laquelle se répète un (ou plusieurs) motif(s) moléculaire(s). La chimie du carbone étant très adaptée à la création de longues chaînes atomiques, les polymères appartiennent aux espèces chimiques dites organiques, c'est-à-dire principalement constituées de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote, à la base de la chimie du vivant.

Les polymères peuvent être d'origine naturelle ou artificielle. La synthèse de telles molécules appartient à la chimie macromoléculaire dont Hermann Staudinger fut le précurseur dans les années 1920 à 1930. Elle passe par la modification chimique d'un polymère naturel ou bien l'utilisation d'une réaction de polymérisation. Cette polymérisation se décline en plusieurs types que nous ne développerons pas ici. Il nous suffit de retenir que la polymérisation consiste à établir des liaisons covalentes entre petites molécules (les motifs de base du polymère) appelées monomères. Les polymères peuvent être générés à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homopolymère, c'est le cas du polyéthylène) ou de différents monomères (on parle cette fois-ci de copolymères). Ce dernier cas est utilisé pour combiner les propriétés

physiques des différents monomères, permettant l'obtention d'un polymère aux propriétés « ajustées ». (PUJOS2006)

II.3 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 types de polymérisation, comme base de la classification.

II.3.1 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: méthylcellulose.
- ✓ des polymères synthétiques: ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs.

II.3.1.1 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

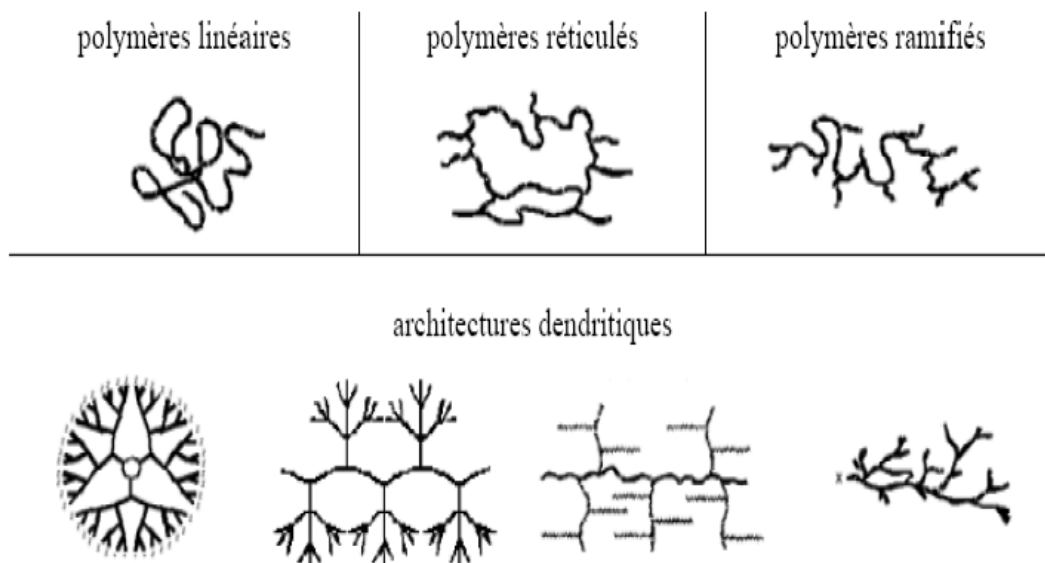


Figure (II-1): Classification des architectures macromoléculaires (Tomalia 2001)

II.3.1.2 Classification selon la structure chimique:

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

1. Les homopolymères:

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

2. Les copolymères:

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.

II.3.1.3 Classification selon le comportement thermique:

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

Les 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. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes.

- a. **Les thermodurcissables:** les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel.

- b. **Les élastomères:** ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles mêmes, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer.

II.4 Le Polymère utilisé pour la simulation

Aujourd'hui le marché du film en PVC plastifié représente peu de producteur. De plus le PVC plastifié est une matière qui a une mauvaise réputation en raison de certains additifs utilisés dans sa fabrication, notamment les phtalates. Malgré cette mauvaise réputation le marché reste stable car le film en PVC plastifié a un très bon rapport performance/prix. Le but de ce document est de faire un état de l'art de l'extrusion du film en PVC plastifié, des innovations techniques dans les méthodes de formulation et d'extrusion du film en PVC plastifié. Le film fin est défini par une épaisseur allant de 5 à 50 μm et le film épais, de 50 à 300 μm . La première partie de cette monographie est un état de l'art du film en PVC plastifié : la matière PVC plastifiée, les processus de fabrication, les applications, les législations et le recyclage. La seconde partie traite des techniques de mélangeage et de compoundage, cette partie parle particulièrement des systèmes d'extrusion.

Enfin la dernière partie explique les deux méthodes d'extrusion du film en PVC plastifié : extrusion de film à plat et extrusion gonflage.

II.5 Le film en PVC plastifié

II.5.1 Le PVC plastifié

II.5.1.1 Présentation matière

Poly(chlorure de vinyle), ou poly(vinyle chloride) en anglais, abrégé PVC, polymère thermoplastique, obtenu par la polymérisation du chlorure de vinyle monomère ou vinyle chloride monomère en anglais abrégé en VCM.

Le VCM obtenu par thermocraquage du dichloroéthane, qui est obtenu par chloration de l'éthylène. Le chlore (40%) est originaire du sel et de l'éthylène (60%) qui provient du pétrole.

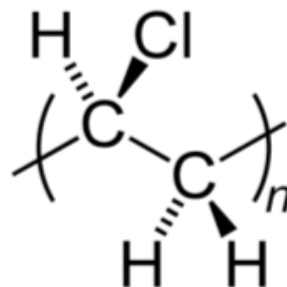


Figure II.2 Représentation de Lewis de la formule du PVC (SUMMERS J)

Le PVC plastifié, abrégé en PVC-P (selon la norme NF EN ISO 2898-1) est obtenu par plastification de la résine de PVC. Il est important pour la suite de distinguer la

résine de PVC (sans aditifs), du PVC-P (PVC formulé avec plastifiants et autres aditifs) et des produits en PVC plastifié (PVC-P mis en forme). La résine de PVC utilisée pour la fabrication du film est généralement obtenue par polymérisation en suspension : le VCM, avec des initiateurs solubles, est dispersé par agitation dans un milieu contenant de l'eau et des agents colloïdes. Ce procédé permet d'obtenir des grains de PVC de forme sphérique, d'environ 250 μ m en suspension dans l'eau. Ils sont séparés de l'eau par centrifugeage, décantation et séchage. L'ensemble des grains se nomme résine de PVC et se présente sous forme de poudre blanche.

II.6 Propriétés de la résine PVC

Indice de viscosité : aptitude à l'écoulement de la résine, c'est une grandeur qui varie en fonction de la masse moléculaire (de 60 à 170 Pa.s pour les résines de PVC).

K-wert : valeur ou nombre K, dans certaines normes et références commerciales, on trouve la masse moléculaire moyenne des résines de PVC exprimé en K-wert. Un nombre K élevé correspond à un fort indice de viscosité, donc le polymère sera plus difficile à mettre en oeuvre, mais on obtiendra des produits finis aux caractéristiques mécaniques plus élevées. La valeur K varie de 50 à 80 pour les résines de PVC, ce qui correspond à de masse moléculaires de 550 à 950 g/mol.

Granulométrie : structure des grains de PVC, cette propriété contrôle les facteurs suivants :

- Teneur en matière volatile : caractérisation du taux de liquide présent dans les grains de PVC
- Faculté d'absorption du plastifiant, lié aux paramètres suivants :
 - ✓ Porosité : caractérisation de l'ensemble des interstices du grain de PVC.
 - ✓ Etat de surface : caractérisation des défauts géométriques sur la surface du grain de PVC.

II.7 Additifs du PVC

Pour pouvoir transformer le PVC il faut obligatoirement mélanger des additifs à la résine de PVC : principalement des stabilisants thermiques et des lubrifiants. Pour transformer un PVC-P il faut aussi ajouter une quantité plus ou moins importante de plastifiant. Donc avant de pouvoir extruder du PVC, il faut préparer une formulation de PVC-P, c'est à dire plastifier la résine de PVC.

o Les plastifiants : solvant lourd, sous forme d'huile, qui incorporé à la résine de PVC détruit partiellement les interactions entre les chaînes responsables de la cohésion mécanique du polymère. Quand la concentration en plastifiant augmente :

- La rigidité du PVC diminue
- La température de transition vitreuse diminue (elle passe en dessous de 0°C)
- L'allongement à la rupture augmente

Le type de plastifiant influence les propriétés thermomécaniques du polymère :

• Plastifiants aromatiques (phtalates, aditaptes, sebacates) : meilleure efficacité à cours terme (résilience) et à basse température

• Plastifiant aliphatiques (acides gras, polymérique) : meilleure efficacité a long terme (fluage) et à température élevée

o Les stabilisants thermiques : composé qui retarde le dégagement d'acide chlorhydrique et la formation de structures conjuguées colorées. Utilisation de systèmes binaires de sels organométalliques (stéarates de calcium/zinc par exemple).

o Les lubrifiants : pour certains type de résine de PVC ayant une valeur K élevée, l'augmentation de température ne suffit pas à faire baisser suffisamment la viscosité, on utilise alors des lubrifiants. Ils ont en général deux actions. Action interne, les molécules ont une partie polaire qui leur permet de s'accrocher et une partie non polaire qui reste à l'extérieur et permet de réduire le frottement entre les chaînes de PVC, donc baisse la viscosité du polymère. Action externe, les molécules de lubrifiant réduisent les frottements de la matière sur le métal de l'outillage (SUMMERS J).

o Les antichocs : aussi appelés assouplisseurs solides, se sont en général des élastomères.

o Les antistatiques : facilitent l'écoulement des charges électrostatiques sur le film.

o Les Charges : permettent d'augmenter la masse du film sans en changer les caractéristiques.

o Les colorants et pigments : permettent de donner une coloration au film.

II.8 La rhéologie

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées en tenant compte du temps (ou vitesse d'application de contraintes). Plus généralement, elle étudie la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps dans le matériau. Dans le cas des polymères, la rhéologie n'étudie donc que les déplacements qui sont grands par rapport à la taille des macromolécules. Les mouvements intramoléculaires et l'enchevêtrement des chaînes sont des mouvements que la rhéologie par nature ne peut pas décrire. En revanche, ces mouvements locaux sont à la base de l'explication du comportement rhéologique des polymères fondus.

La viscosité est un paramètre très important dans l'étude de l'écoulement du polymère, cette dernière fonction de certain paramètre qui est:

Le poids moléculaire du polymère;

La température;

La pression;

Le taux de cisaillement ;

Chapitre III

Formulation mathématique et méthodes numérique

Chapitre III

Formulation mathématique et méthode numérique

II.1 Introduction

Le schéma de principe d'une extrudeuse monovis est présenté dans la figure III.1. Celle-ci comporte une vis sans fin à filetage trapézoïdale en forme de V qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique F, régulé en température par des systèmes de chauffe et de refroidissement. Le polymère sous forme solide (granulés, poudre) est introduit dans la trémie T située à une extrémité de la machine. La principale fonction de l'extrudeuse est de convoier le polymère, de le fondre et enfin, de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir la filière placée à son extrémité. D'un point de vue industriel, on cherche à obtenir à la sortie de la machine un débit régulier, avec un matériau homogène, à la température contrôlée, et des conditions de production satisfaisantes (débit maximal, consommation énergétique limitée). Pour cela, la compréhension des mécanismes mis en jeu, ainsi que leur modélisation est un point capital.

D'après les observations qui ont été faites sur l'état du polymère dans la machine, on peut distinguer trois zones phénoménologiques:

- la zone de convoyage solide, dans laquelle le polymère est entièrement solide ;
- la zone de fusion, dans laquelle coexistent du polymère encore solide et du polymère déjà fondu ;
- la zone de pompage, dans laquelle le polymère est totalement fondu.

L'énergie nécessaire à la fusion et à la mise en pression du polymère est issue de deux sources principales :

- l'énergie mécanique, fournie par la rotation de la vis, qui engendre des déformations au sein d'un milieu très visqueux ;

- l'énergie thermique, fournie par la régulation du fourreau.

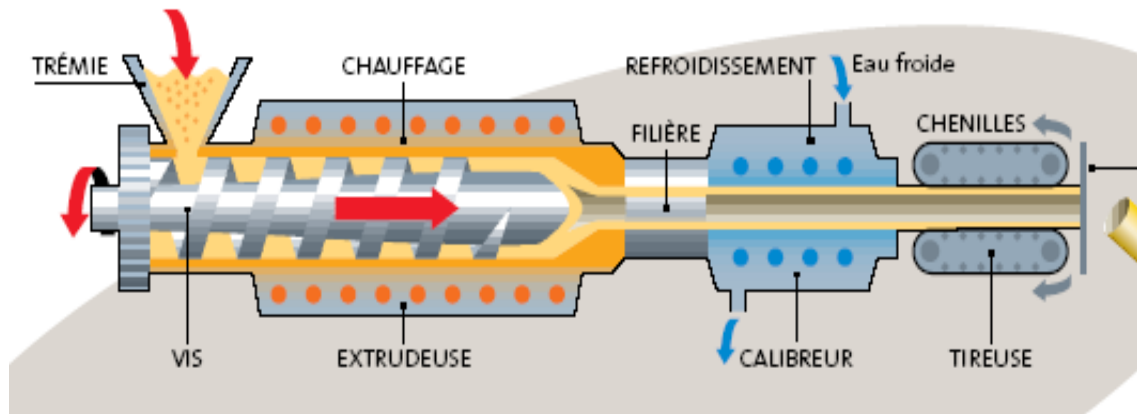


Figure III.1 Extrudeuse mono vis

Cette étude s'intéresse à la simulation de l'écoulement d'un polymère fondu au sein d'une filière d'extrusion. L'objectif poursuivi est la prédiction numérique de l'écoulement lors de la mise en œuvre du procédé. Pour parvenir à atteindre cet objectif on a utilisé le code commercial "polyflow" pour réaliser l'ensemble des simulations numériques. Les simulations numériques fournissent des résultats sur le champ de vitesse, la contrainte de cisaillement et le champ de pression dans la filière.

Les principes de base qui sont appliqués dans l'analyse numérique de la simulation sont décrits en ce chapitre. La simulation de l'écoulement dans une matrice exige la résolution de l'équation de continuité, et les équations de quantité de mouvement, équation énergie pour un ensemble d'états de frontières, couplées aux équations constitutives reliant la viscosité avec le taux de cisaillement.

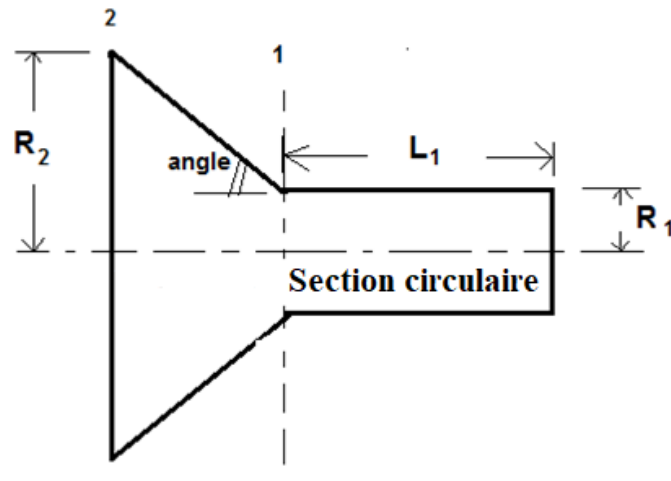


Figure III.2 Profile étudiée (Filière d'extrudeuse)

III.2 Propriétés des polymères

Dans notre étude, on va utiliser le Polychlorure de vinyle PVC à cause de sa disponibilité et son coût le moins cher, Le PVC est un matériau souple, tenace, polyvalent et très résistant. Ce matériau possède une grande stabilité dimensionnelle due à une absorption d'eau minime. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs. Dont leur propriété est résumée dans le Tableau III-1, utilisé dans le procédé d'extrusion.

Caractéristiques techniques

Ductilité	Elevée
Résistance à la traction	450-500 Kg/cm ²
Résistance à la compression	610 kg/cm ²
Température max. de travail	50-75°C
Température min. de travail	-20°C
Module élastique	30.000 kg/cm ²
Densité	1,4 g/cm ³
Résistance au feu	M2 según UNE 23-727-90 Inflamabilité modérée
Résistance aux agents chimiques	Excellente UNE 53-029-82 (*voir encadré. tests)
Recyclable	Oui

Tableau III.1 : Caractéristiques des matériaux polymères

III.4 Modèle mathématique

La modélisation mathématique générale des écoulements des fluides est représentée par un ensemble d'équations aux dérivées partielles. Le code de calcul POLYFLOW basé sur la méthode des éléments finis (FEM) résout les équations de quantité de mouvement, de continuité, d'énergie et l'équation rhéologique. Nous considérons dans notre travail un écoulement laminaire stationnaire, tridimensionnel axisymétrique d'un fluide incompressible. Les équations s'écrivent, alors, dans le système des coordonnées cartésiennes (x, y, z) comme suit :

III.4.1 Equation de Bilan de Matière

L'équation de bilan de matière, également désignée sous le nom de l'équation de continuité, est simplement une formulation du principe de la conservation de la masse est donnée pour un fluide sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad 3.1$$

Pour le cas d'écoulement du polymère à travers la filière de l'extrudeuse le fluide est considéré comme un fluide incompressible, donc l'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad 3.2$$

III.4.2 Equation de quantité de mouvement :

Cette équation s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \rho \vec{v} + \left[\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} \right] = -[\nabla \cdot \tilde{\pi}] + \rho \vec{g} \quad 3.3$$

Avec π est défini comme étant le tenseur des contraintes :

$$\tilde{\pi} = p \tilde{\delta} + \tilde{\tau} \quad 3.4$$

Où τ est la contrainte dynamique ou supplémentaire lié à l'écoulement, P est une grandeur scalaire appelée "pression" et δ est le tenseur d'unité (identité) :

$$\tilde{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Donc, l'équation de quantité de mouvement sera :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + [\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v}] = -\nabla p - [\nabla \cdot \vec{\tau}] + \rho \vec{g} \quad 3.6$$

Les composantes de l'équation de mouvement dans des coordonnées cartésiennes peuvent s'écrire :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad 3.7$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad 3.8$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad 3.9$$

Dans les systèmes d'écoulement de polymère, les forces d'inertie et de corps sont généralement négligeables en comparaison aux efforts visqueux. Par suite les équations de quantité de mouvement sont données par :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad 3.10$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad 3.11$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad 3.12$$

III.4.3 Equation d'énergie (équation de la chaleur)

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + u \text{grad}(\Gamma) = K \cdot \text{grad}(\text{div}(\Gamma)) + \phi \quad 3.13$$

Le bilan global s'écrit finalement :

$$\rho \cdot c \frac{d\Gamma}{dt} = \rho \cdot c \frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \rho \cdot c \cdot \left(u \frac{\partial \Gamma}{\partial x} + v \frac{\partial \Gamma}{\partial y} + w \frac{\partial \Gamma}{\partial z} \right) = K_p \Delta T + \phi \quad 3.14$$

III.5 Méthode numérique

La modélisation mathématique générale du problème des écoulements des fluides viscoélastiques avec transfert thermique est faite par des équations de conservation telles que les équations de quantité de mouvement, de continuité.

La résolution numérique des équations aux dérivées partielles (EDP) nécessite leur discrétisation, qui permet de les transformer en un système d'équations algébriques. Le résultat obtenu à partir de la discrétisation d'une équation aux dérivées partielles est un ensemble fini de valeurs qui permet de reconstruire la forme de la solution.

La méthode numérique utilisée dans cette étude incorporée dans le code de calcul POLYFLOW est celle des éléments finis.

III.5.1 Méthodes des éléments finis

C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non, linéaires ou non, définis dans un domaine géométrique quelconque. La méthode des éléments finis consiste à discrétiser un solide ou un fluide en éléments de géométries simples rattachés à des nœuds auxquels sont associées des grandeurs cinématiques. A chaque nœud sont associées des variables, ou degrés de liberté (ddl) qui peuvent être de différentes natures : déplacements, vitesse, températures. Les champs sont alors approximés en tout point des éléments par une interpolation à partir des valeurs associées aux différents nœuds. Les fonctions choisies doivent satisfaire des conditions de continuité entre les différents éléments.

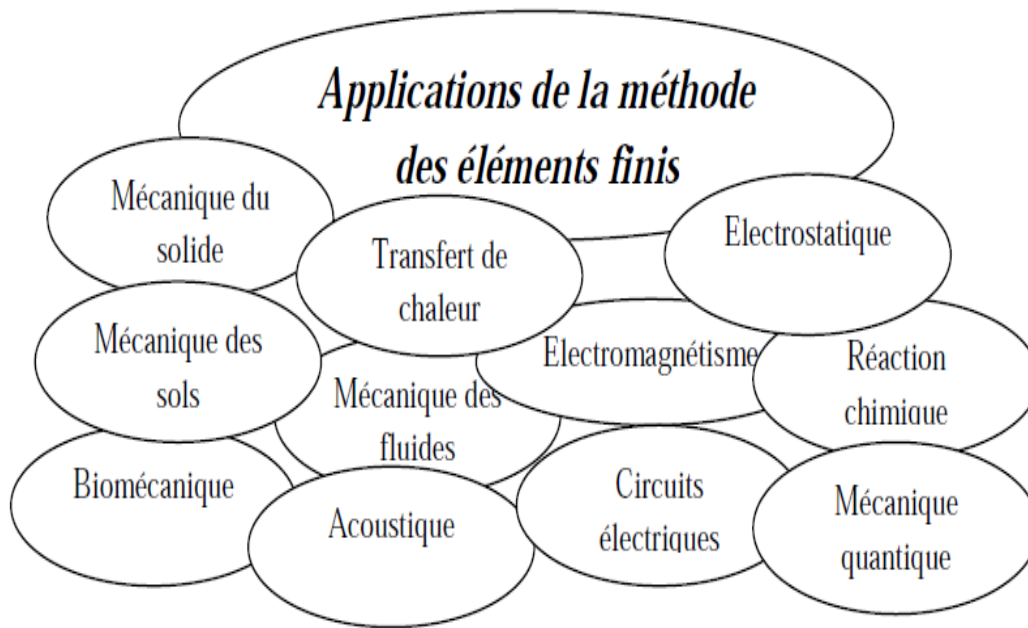


Figure III.3 : Domaines d'application de la méthode des éléments finis [5]

La FEM est basé sur la technique d'approximation par éléments finis, qui permet d'approcher une fonction dans un espace donné à partir de la connaissance des valeurs en certains nœuds du domaine. Cependant la complexité de la géométrie des systèmes considérés rend très difficile voire impossible l'approximation de la solution dans l'ensemble du domaine. Pour contourner cette difficulté, on subdivise le domaine en sous domaines appelés éléments de maillage.

Dans cette étude on a utilisé type de maillage triangulaire linéaire à 4 nœuds C3D4 avec 189488 éléments et 87019 nœuds.

III.6 La rhéologie du polymère

Les polymères sont connus pour leur comportement rhéologique complexe. Pour les écoulements isothermes, la viscosité reste une fonction de la vitesse de cisaillement. Selon la littérature, un grand nombre de lois classiques permettant de décrire les comportements rhéologiques des polymères sont donnés. La loi constitutive pour les fluides Newtoniens généralisés utilisée dans cette étude (Nassehi 2002).

$$\tilde{\tau} = 2\mu\mathbf{D} \quad 3.15$$

Où \mathbf{D} est le tenseur de taux de déformation défini comme suit :

$$D_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad 3.16$$

Avec x_i est la composante cartésienne suivant la direction i ; tandis que u_i est la composante du vecteur vitesse suivant la direction i .

$$D = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2\frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

D'autre part, μ est la viscosité apparente qui peut être une fonction du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, la température T , ou les deux à la fois. Le taux local de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2tr(D^2)} \quad 3.18$$

Où tr signifie la trace de la matrice.

Dans un écoulement simple de cisaillement, $\dot{\gamma}$ réduit au gradient de vitesse.

Plusieurs lois de viscosité sont disponibles pour des écoulements newtoniens généralisés.

III.6.1 Viscosité Constant

Pour les fluides newtoniens, une viscosité constante peut être indiquée

$$\mu = \mu_0 \quad 3.19$$

Avec μ_0 est désignée sous le nom de la viscosité newtonienne.

III.6.2 Loi de puissance

La loi de puissance pour la viscosité est de la forme suivante

$$\mu = K(\lambda\dot{\gamma})^{n-1} \quad 3.20$$

Où K est le facteur d'uniformité, λ est le temps normal, et n sont l'indice de la loi de puissance, qui est une propriété du matériel donné.

La loi de puissance est généralement employée pour décrire le comportement visqueux de matériaux polymères, tels que le polyéthylène, elle varie en fonction du cisaillement. Si le comportement à la base cisaillement évalue les besoins d'être adapté bien, la loi Carreau ou de croix capturera la zone de plateau de la courbe de viscosité pour le bas taux cisaillement évalue mieux que la loi de puissance.

III.6.3 Loi Bird-Carreau

La loi de Bird-Carreau pour la viscosité est:

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad 3.21$$

μ_{∞} : Viscosité pour un taux cisaillement à l'infinité.

μ_0 : Viscosité pour un taux cisaillement égal à zéro.

λ : Temps normal (c.-à-d., l'inverse du taux de cisaillement pour lequel le fluide change son comportement newtonien à celui de la loi puissance).

n : l'exposant de la loi de puissance.

La loi de Bird-Carreau est généralement utilisée quand il est nécessaire de décrire le comportement de viscosité pour les faibles valeurs du taux de cisaillement.

III.6.4 Loi de Cross

Elle est définie comme suit :

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m} \quad 3.22$$

μ_0 : Viscosité pour un taux cisaillement égal à zéro.

λ : Temps normal (c à d, l'inverse du taux de cisaillement pour lequel le fluide change son comportement newtonien à celui de la loi puissance)

m : l'exposant de la loi de puissance ($m = 1 - n$ pour de grands taux de cisaillement).

Comme la loi de Carreau, la loi de Cross, est généralement utilisée quand il est nécessaire de décrire le comportement de viscosité pour les basses valeurs du taux cisaillement.

III.6.5 La loi de Cross modifiée

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 + \lambda \dot{\gamma})^m} \quad 3.23$$

Cette loi peut être considérée un cas spécial de la viscosité de la loi Carreau-Yasuda (équation 3.22), où l'exposant "a" à une valeur de 1.

III.6.6 Loi de Bingham

La loi de Bingham pour la viscosité est:

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} & \text{pour } \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_c \\ \mu_0 + \tau_0 \frac{(2 - \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} & \text{pour } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad 3.24$$

Où τ_0 est la contrainte seuil et $\dot{\gamma}_c$ est le taux de cisaillement critique pour lequel l'équation constitutive de Bingham est appliquée. Pour des taux de cisaillement inférieur $\dot{\gamma}_c$, le comportement du fluide est normalisé afin de garantir une continuité pour la courbe de viscosité.

La loi de Bingham est généralement employée pour décrire des matériaux tels que le béton, la boue, la pâte, et la pâte dentifrice.

III.6.7 La loi de Bingham modifiée

Ce modèle est formulé sous la forme:

$$\mu = \mu_0 + \tau_0 \left(\frac{1 - \exp(-m\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \right) \quad 3.25$$

Avec

$$m = 3 / \dot{\gamma}_c$$

En comparaison avec la loi de Bingham standard le model modifié de Bingham est écrit sous une formulation analytique simple et qui donne une solution plus stable. La valeur de $m = 3 / \dot{\gamma}_c$ est choisie pour que le modèle standard et le model modifié de Bingham se comportent de la même manière à partir de la valeur critique du taux de cisaillement $\dot{\gamma}_c$.

III.6.8 Lois De Herschel-Bulkley

$$\mu = \begin{cases} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} & \text{pour } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \\ \frac{\tau_0(2-\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} + K \left[(2-n) + (n-1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] & \text{pour } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c \end{cases} \quad 3.26$$

Où τ_0 est la contrainte et $\dot{\gamma}_c$ est le taux de cisaillement critique et K est le facteur d'uniformité, n : l'exposant de la loi de puissance.

La loi de Herschel-Bulkley Généralement utilisée comme la loi de Bingham

III.6.9 Lois De Herschel-Bulkley modifiée

Ce modèle est formulé sous la forme:

$$\mu = \tau_0 \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{-3\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)}{\dot{\gamma}} \right) + K \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} \quad 3.27$$

La loi de Bulkley est une expression analytique, qui signifie que ce peut être plus facile pour calculer en polyflow.

III.6.10 Loi de Log Log

Ce modèle est formulé sous la forme :

$$\mu = \mu_0 \mathbf{10}^{a_0 + a_1 [\text{Log}(\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c)] + a_{11} [\text{Log}(\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c)]^2} \quad 3.28$$

a_0 , a_1 et a_{11} être coefficient de l'expression de polymère.

Cette loi de viscosité est simplement empirique, mais fournit parfois aux données expérimentales que les autres.

III.6.11 Loi de Carreau-Yasuda

La loi de Carreau-Yasuda pour la viscosité est :

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad 3.29$$

La loi de Carreau-Yasuda est une légère variation sur la loi Bird-Carreau. L'addition de l'exposant à permettre de contrôler la transition du plateau newtonien à la région loi de puissance. À la valeur basse ($a < 1$) rallonge la transition, et une valeur élevée

($a > 1$) résultats dans une transition brusque.

Ces modèles peuvent être combinés avec n'importe laquelle des lois suivantes de la dépendance de la température.

III.7 Etude de quelques grandeurs caractéristiques de l'écoulement

Dans cette partie nous allons expliciter quelques nombres sans dimension qui caractérisent un écoulement de fluide. Ces nombres permettent de comprendre les comportements mécanique et thermique d'un écoulement et donc d'effectuer d'éventuelles simplifications physiques dans les équations traduisant les phénomènes étudiés.

III.7.1 Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds permet de savoir le régime d'écoulement à savoir laminaire ou turbulent. Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

On le définit de la manière suivante :

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot \bar{V} \cdot h}{\mu} \quad 3.30$$

- V - vitesse du fluide [m.s⁻¹]
- L - longueur caractéristique [m]
- ρ - masse volumique du fluide [kg.m⁻³]
- μ - viscosité dynamique du fluide [kg.m⁻¹.s⁻¹ ou Pa.s]

Aux très faibles valeurs du nombre de Reynolds (de l'ordre de 10^{-2}), comme c'est souvent le cas dans les écoulements de polymère, les forces de viscosité sont prépondérantes. On parle alors d'écoulement de Stokes. L'écoulement est laminaire (des éléments de fluide voisins demeurent voisins).

III.7.2 Le nombre de Stokes (St)

Le nombre de Stokes s'exprime comme étant le rapport entre les forces visqueuse et celles dues à la gravité. Elle permet donc de voir si on peut négliger la gravité dans l'équation de la mécanique des fluides. On le définit de la manière suivante :

$$\text{St} = \frac{\mu \cdot \bar{V}}{\rho \cdot g \cdot h^2} \quad 3.31$$

- V - vitesse du fluide [m.s⁻¹]
- L - longueur caractéristique [m]

- ρ - masse volumique du fluide [kg.m^{-3}]
- μ - viscosité dynamique du fluide [$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ou Pa.s]
- g - accélération de pesanteur terrestre [m.s^{-2}]

Si le nombre de Stokes est très supérieur à 1, donc les forces de la gravité sont négligeables devant les forces de contraintes visqueuses. Nous pouvons donc simplifier l'équation de Navier Stokes en supprimant le terme lié à la gravité.

III.7.3 Le nombre de Peclet :

Le nombre de Péclet s'exprime comme étant le rapport entre le transfert de chaleur par convection et celui par conduction dans la direction de l'axe de l'écoulement. Il permet de quantifier la prépondérance de ces deux phénomènes l'un par rapport à l'autre. On le définit de la manière suivante :

$$Pe = \frac{\rho D U C_p}{\lambda} \quad 3.32$$

$$Pe = \frac{\rho D U}{\mu} \frac{\mu C_p}{\lambda} = Re \cdot Pr \quad 3.33$$

- V - vitesse moyenne du fluide [m.s^{-1}]
- L - longueur de la direction de la convection [m]
- ρ - masse volumique du fluide [kg.m^{-3}]
- λ - conductivité thermique du fluide [W.m.K^{-1}]
- C_p - capacité calorifique du fluide [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

III.7.3 Nombre de Cameron – Ca

Le nombre de Cameron compare les transferts de chaleur conductifs dans la direction normale à l'écoulement et convectifs dans l'axe de l'écoulement. Il permet ainsi de savoir si la température dans le polymère est régie par la régulation thermique de la paroi du canal ou par la convection dans le canal. On le définit de la manière suivante

$$Pe = \frac{\lambda \cdot L}{\rho C_p V D^2} \quad 3.34$$

- V - vitesse moyenne du fluide [m.s^{-1}]
- L - longueur de la direction de la convection [m]
- D - longueur relative à la direction selon laquelle on étudie la conduction [m]

- ρ - masse volumique du fluide [kg.m^{-3}]
- λ - conductivité thermique du fluide [W.m.K^{-1}]
- C_p - capacité calorifique du fluide [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

Selon les valeurs du nombre de Cameron, on peut définir trois types de régimes thermiques :

$Ca \leq 10^{-2}$ \Rightarrow La température moyenne de l'écoulement T évolue linéairement dans l'écoulement. Le régime est alors dit adiabatique.

$10 \leq Ca \leq 1$ Le régime thermique dit de transition

$Ca \geq 10$ la température moyenne de l'écoulement T est constante. Le profil de température au sein du fluide est parabolique avec un maximum de température atteint au centre de l'écoulement. Le régime est alors dit d'équilibre.

III.7.4 Nombre de Brinkman – Br

Le nombre de Brinkman donne le rapport entre l'énergie des forces visqueuses dissipée et l'énergie transférée par conduction thermique. Ce nombre est utilisé dans des problèmes de lubrification ou en mise en forme de polymère à l'aide d'une extrudeuse. Plus le nombre est élevé, plus l'énergie dissipée par les forces visqueuses est importante par rapport à l'évacuation de cette énergie, ce qui indique une hausse de température. On le définit comme suit :

$$\text{Br} = \frac{\eta \bar{V}}{\lambda \Delta T} \quad 3.35$$

- V - vitesse moyenne du fluide [m.s^{-1}]
- μ - viscosité dynamique du fluide [Pa.s]
- λ - conductivité thermique du fluide [W.m.K^{-1}]

Chapitre IV

Résultats et discussion

Chapitre IV

Résultats et discussion

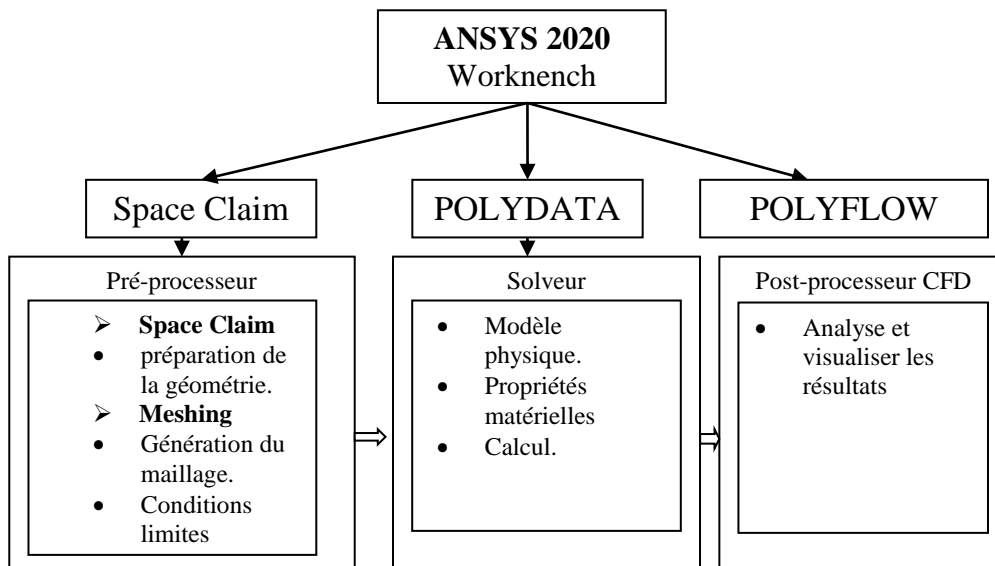
IV.1 Introduction

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 du polymère fondu newtonien généralisé à travers des conduites conique à géométrie complexe. Les propriétés physiques du fluide en question (*fluide-Newtonien*) sont ceux du Polychlorure de vinyle (PVC_458K), Le polymère fondu, suit une loi de comportement rhéologique 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 Polyflow (Ansys *version 2020*).

IV.2 Présentation du logiciel POLYFLOW

La simulation numérique de ce travail est effectuée en utilisant le logiciel (ANSYS POLYFLOW 2020). Le code de calcul POLYFLOW est un des codes commerciaux les plus populaires pour la simulation numérique des écoulements de liquides polymères. Ce code a été développé dans les années 1980 par l'équipe CESAME de l'université catholique de Louvain. Ce code permet d'utiliser, en 2D et 3D, un grand nombre de modèles rhéologiques différentiels.

Ce code est largement utilisé dans l'industrie polymère, et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel Polyflow modélise par la méthode des éléments finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il nécessite l'utilisation, comme tout logiciel de type CFD, de deux éléments clés qui sont : le préprocesseur et le post-processeur en plus de son module solveur (POLYDATA). L'organigramme ci-dessous montre l'enchaînement du logiciel POLYFLOW avec les autres logiciels. L'organigramme IV.1, montre l'enchaînement des logiciels de calcul.



Organigramme IV.1 : structure de base du code « Polyflow »

La création de la géométrie et la génération du maillage ont été effectués en utilisant le logiciel de maillage ensuite la modélisation du problème est effectuée en utilisant le code POLYDATA et la solution en utilisant POLYFLOW en suivant les étapes suivantes où les étapes sélectionnées sont celles considérées dans notre étude :

1. Lecture du fichier
2. Création d'un nouveau projet
 - Projet M.E.F
 - 3D géométrie
 - Problème d'état stable
3. Choix du type de problème

Problème newtonien généralisé isotherme

Problème newtonien généralisé non-isotherme

Problème viscoélastique différentiel non-isotherme

Problème viscoélastique différentiel isotherme

Problème viscoélastique intégral non-isotherme

Problème viscoélastique intégral isotherme.

IV.3 Interface utilisateur “Polyflow” dans Workbench

Systèmes d'écoulement de fluide ANSYS Polyflow dans ANSYS Workbench à définir et résoudre un problème d'extrusion 3D. Lorsque vous travaillez dans Workbench, votre travail dans POLYFLOW est automatiquement enregistré si nécessaire. Par exemple, chaque fois que vous fermez POLYDATA, exécutez POLYFLOW ou enregistrez votre projet Workbench, vos données non enregistrées sont automatiquement enregistrées. Le schéma du projet Ansys Polyflow se compose de cinq sections, Conception Modulaire, maillage, configuration, solution et résultat, voir la figure IV.1.

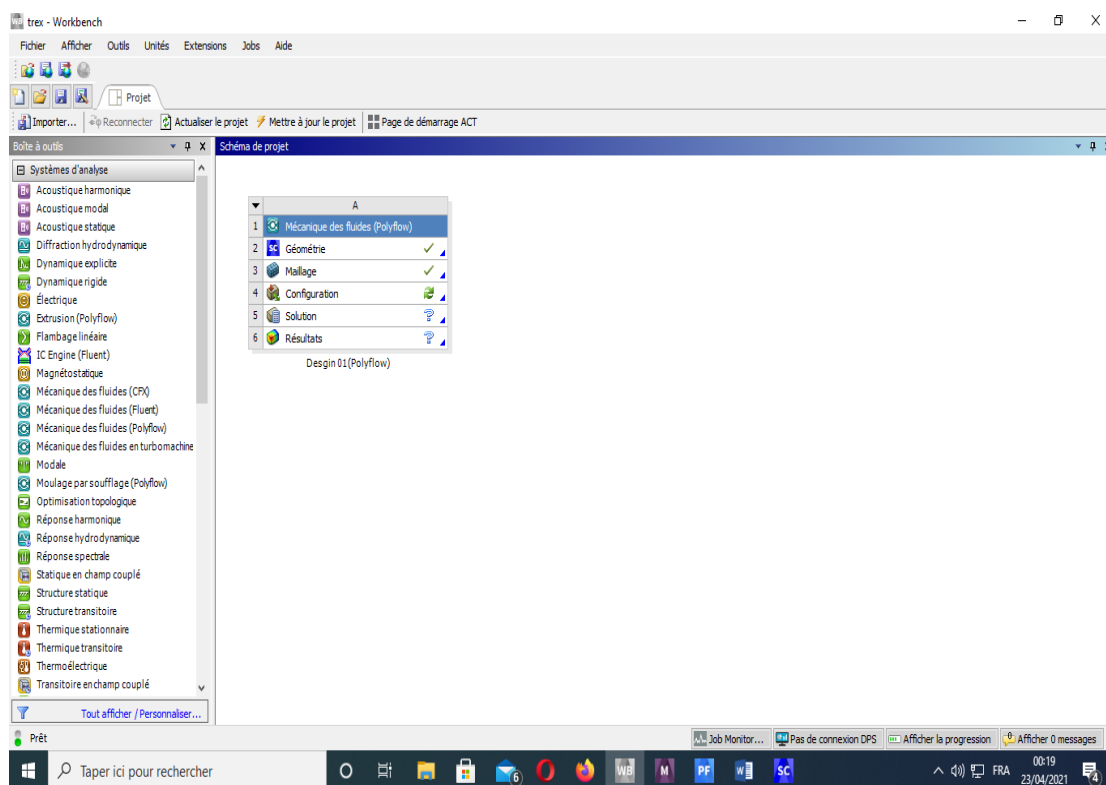


Figure IV.1: Interface graphique du “Polyflow” dans “Workbench”

Design Modular: peut importer la géométrie à partir de Solid Works ou d'un autre logiciel de CAO 3D ou en utilisant un module Design Modeler commence par créer une esquisse en 2D et modifiée puis peut effectuer des fonctionnalités telles que Extruder, Révolution et Balayer dessus pour générer un modèle 3D, voir la figure IV.2 .

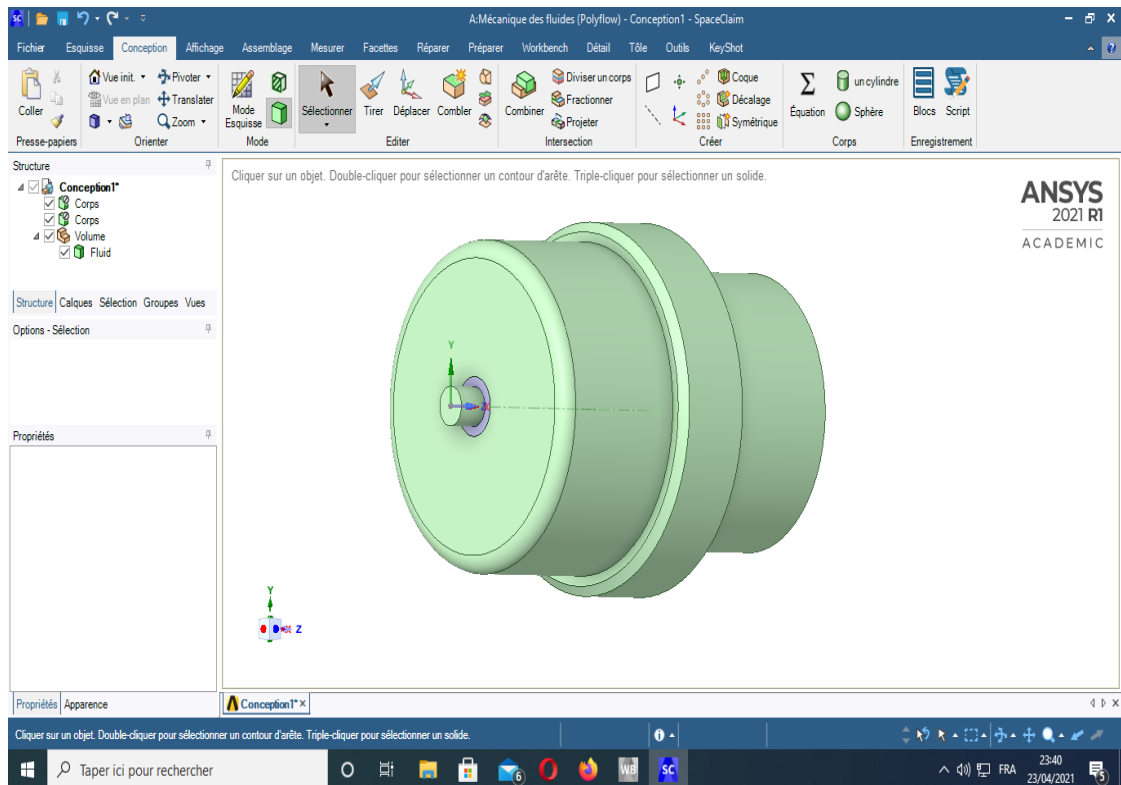


Figure IV.2 : Filière a étudié

Maillage: Maillage ANSYS, appliqué au modèle, maillage par éléments finis et détermine les caractéristiques et les paramètres. Il existe plusieurs choix possibles dans les types de réseaux de ce module: automatique, carré, triangulaire, mixte appelé carré-triangle. Cela nous donnerons un maillage que le meilleur ANSYS pense approprié pour notre géométrie.

Setup (Polydata): Utilisé pour attribuer différentes valeurs de paramètres et expressions mathématiques utilisées. Par exemple, définissez les tâches FEM ou mixte, état stationnaire, problèmes dépendant du temps, isotherme ou non isotherme, entrez l'état de la condition aux limites affectée auparavant dans l'étape de maillage et entrez les propriétés des matériaux et ses unités. Remesh méthode pour l'extrudeuse inverse (c'est-à-dire les matrices de profil) et les tâches de jets libres (c'est-à-dire le puits). Et enfin unit les résultats des calculs, Voir la figure IV.3.

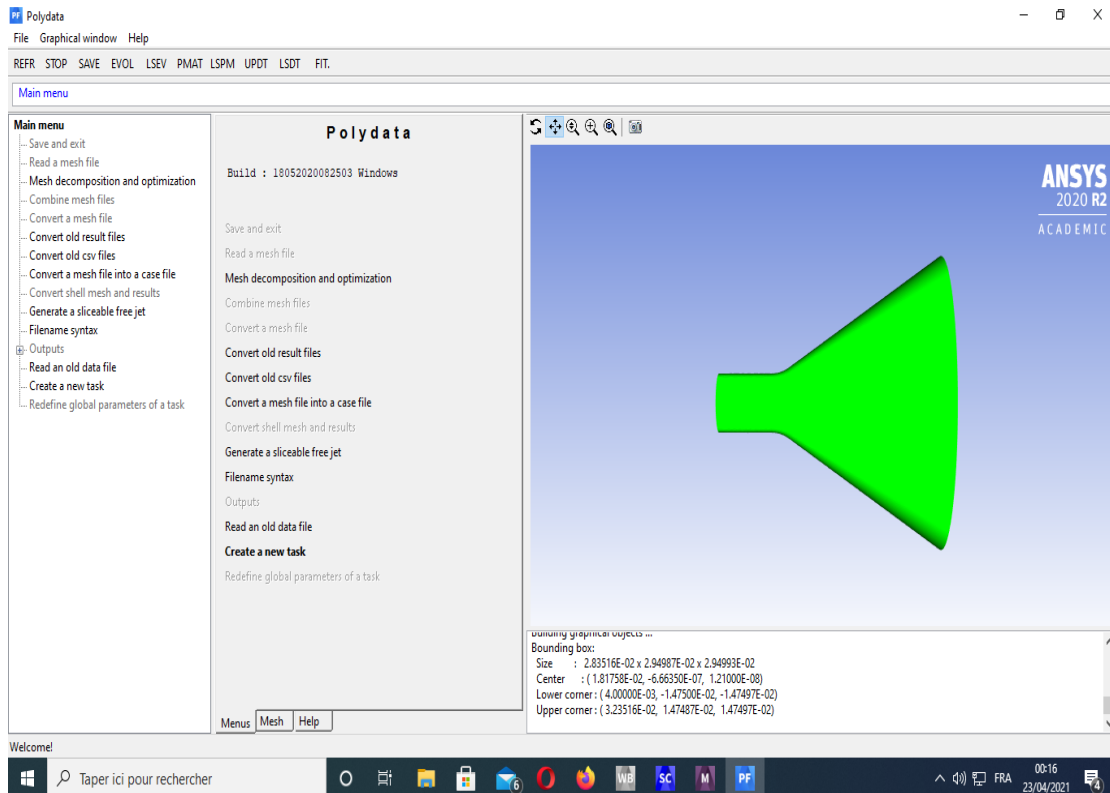


Figure IV.3 Simulation de l'extrusion par le code « Polyflow » (Polydata)

Solution: au moyen d'itérations mathématiques et d'équations énergétiques utilisées pour obtenir les relations de différents paramètres d'efficacité.

Résultat: les contours de différents paramètres sont représentés graphiquement et leurs relations avec les variables dépendantes à chaque maillage de la géométrie structurale. Et ajout d'expressions en tant que paramètres de sortie pour concevoir des points.

Ansys (polyman): est une couche d'environnement construite au-dessus des programmes utilisés dans le package ANSYS POLYFLOW, ce package est un programme graphique interactif qui permet de visualiser les données du matériau, y compris la viscosité de cisaillement constante et la viscosité allongée constante. Il calcule les propriétés des matériaux à partir d'équations constitutives et de paramètres numériques, pour les fluides newtoniens généralisés isothermes et non isothermes, viscoélastiques différentiels et viscoélastiques intégraux. Il peut également les comparer avec des courbes expérimentales (c.-à-d. Ajustement). Plusieurs lois de viscosité sont disponibles pour flux newtoniens généralisés. Les lois de viscosité isotherme (Constant, loi de puissance, loi de Bird-Carreau, Cross, cross modifiée, Bingham, Bingham modifiée, Herschel-Bulkley, Herschel- Bulkley modifiée, Log-Log et Carreau-Yasuda).

IV.4 Choix du modèle rhéologique

POLYDATA indique qu'elles propriétés du matériau sont pertinentes pour votre sous-domaine en aggravant les propriétés non pertinentes. Dans ce cas, la viscosité, la densité, les termes d'inertie et la gravité sont disponibles pour la spécification. Pour ce modèle, nous ne définirons que la viscosité du matériau. Les effets d'inertie sont négligés et la densité n'est spécifiée que lorsque l'inertie, la gravité, la convection thermique ou la convection naturelle sont prises en compte. Étant donné que les effets gravitationnels ne sont pas inclus dans le modèle, la valeur par défaut de zéro est retenue pour la gravité. Alors on utilise la loi de **Bird carreau**

La loi Bird Carreau pour la viscosité est (Polyflow Manual 2020) :

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad 4.1$$

μ_{∞} : Viscosité pour un taux cisaillement à l'infinité.

μ_0 : Viscosité pour un taux cisaillement égal à zéro.

λ : Temps normal (c.-à-d., l'inverse du taux de cisaillement pour lequel le fluide change son comportement newtonien à celui de la loi puissance)

n : l'exposant de la loi de puissance.

IV.5 Conditions aux limites

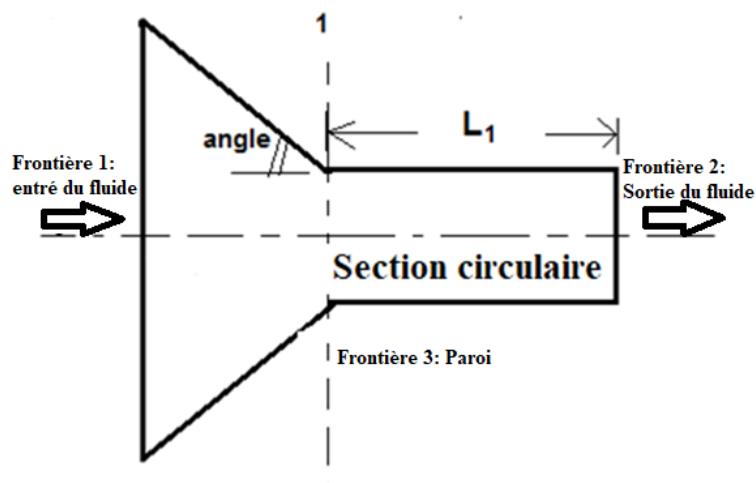


Figure IV.3 : Conditions aux limites

Frontière 1 : Entré du fluide $Q=1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Frontière 2 : paroi (vitesse normale nulle et vitesse de surface nulle condition $V_n = 0$ $V_s = 0$)

Frontière 3 : Sortie (force normale et tangentielle imposée $f_n = 0$ $f_s = 0$)

IV.6 Spécifiez la région où le remaniement doit être effectué

Ce modèle implique une surface libre pour laquelle la position est inconnue. Une partie du maillage est affectée par cette limite inconnue. Par conséquent, une technique de remaniement est appliquée sur cette partie du maillage. La surface libre est entièrement contenue dans le sous-domaine et par conséquent, seul le sous-domaine sera affecté par la délocalisation de la surface libre.

IV.7 Définissez les paramètres du système d'épines

Le but de la technique de remaniement est de relocaliser les nœuds internes en fonction du déplacement des nœuds limites du fait du mouvement de la surface libre. Les nœuds de maillage sont organisés selon des lignes de retards (épines), qui sont des collections de nœuds logiquement disposés de manière unidimensionnelle. Cette technique est particulièrement adaptée aux problèmes d'extrusion 2D. Polydata nécessite la spécification de la première et de la dernière épine que le fluide rencontre (entrée d'épines et sortie des épines, respectivement).

IV.7.1 Affectez la fonction de flux

Une fois que le champ de vitesse est connu, Polyflow calcule automatiquement la fonction de flux. Ce calcul vous oblige à spécifier le point où la fonction de flux disparaît. Polydata impose une valeur de disparition au point nodal le plus proche du poste spécifié.

IV.7.2 Pré-processeur

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau.

IV.8 Solvateur POLYFLOW

Ce code utilise la méthode des éléments finis pour pouvoir intégrer numériquement les équations aux dérivées partielles régissant le problème en question. Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Discrétisation en espace et en temps des équations : substitution des dérivées partielles par des approximations algébriques ; transformation du système d'équations différentielle en système d'équations algébriques,

- Résolution du système algébrique par un processus itératif de convergence assurée.
- Stockage des résultats obtenu en archive pour pouvoir les visualisé graphiquement par un post-processeur.

IV.9 Le problème à résoudre

Dans ce mémoire on s'intéresse en premier lieu à prédire l'écoulement du polymère de type PVC 458 (Polychlorure de vinyle) qui se trouve à l'état fondu dans une extrudeuse axisymétrique simple et de géométrie bien déterminée. En second lieu, on s'intéresse à améliorer cette extrudeuse et ce par l'étude de l'influence de la géométrie l'angle (α), en fonction la pression, la vitesse et le taux de cisaillement. Ces simulations numériques ont été conduites pour les différents paramètres influents, La figure (IV.4), présente la partie étudiée de la filière de l'extrudeuse.

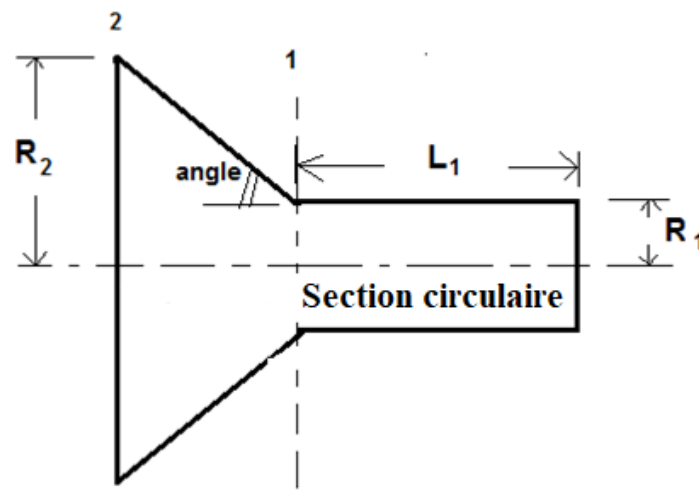


Figure IV.4 : Modèle étudié

IV.10 Résultats et discussions

Dans cette partie, on va présenter les différents résultats issus des prédictions numériques de l'extrusion à travers le système présente dans le chapitre précédent par le code « Polyflow ». Pour mieux optimiser l'écoulement à travers cette machine on va étudier l'influence de la variation d'angle en fonction du champ de vitesse, de la pression, de la contrainte de cisaillement à la sortie de la filière.

IV.10.1 Caractéristiques des maillages des domaines d'études

Nous avons utilisés dans le présent travail plusieurs modèles à géométries différentes, notamment au niveau de la filière de sortie de la conduite (*sections de*

sortie en forme circulaire). Ces modèles sont très rencontrés 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.

Après plusieurs tests de maillage (Tab. (IV.1)), nous avons, par exemple, adoptés pour la simulation d'écoulements isotherme de fluide de Carreau, à travers une conduite conique, le maillage M1 comme nous l'indique la figure (Fig. (IV.5)).

Tableau (IV.1) : Test de maillage

N°	Nombre d'éléments	Nombre de Noeuds	V_z (m/s)
M1	189488	87019	0.77984959
M2	214459	91118	0.77984959
M3	395814	10897	0.77984959

V_z : vitesse maximale sur l'axe à l'entrée du cône.

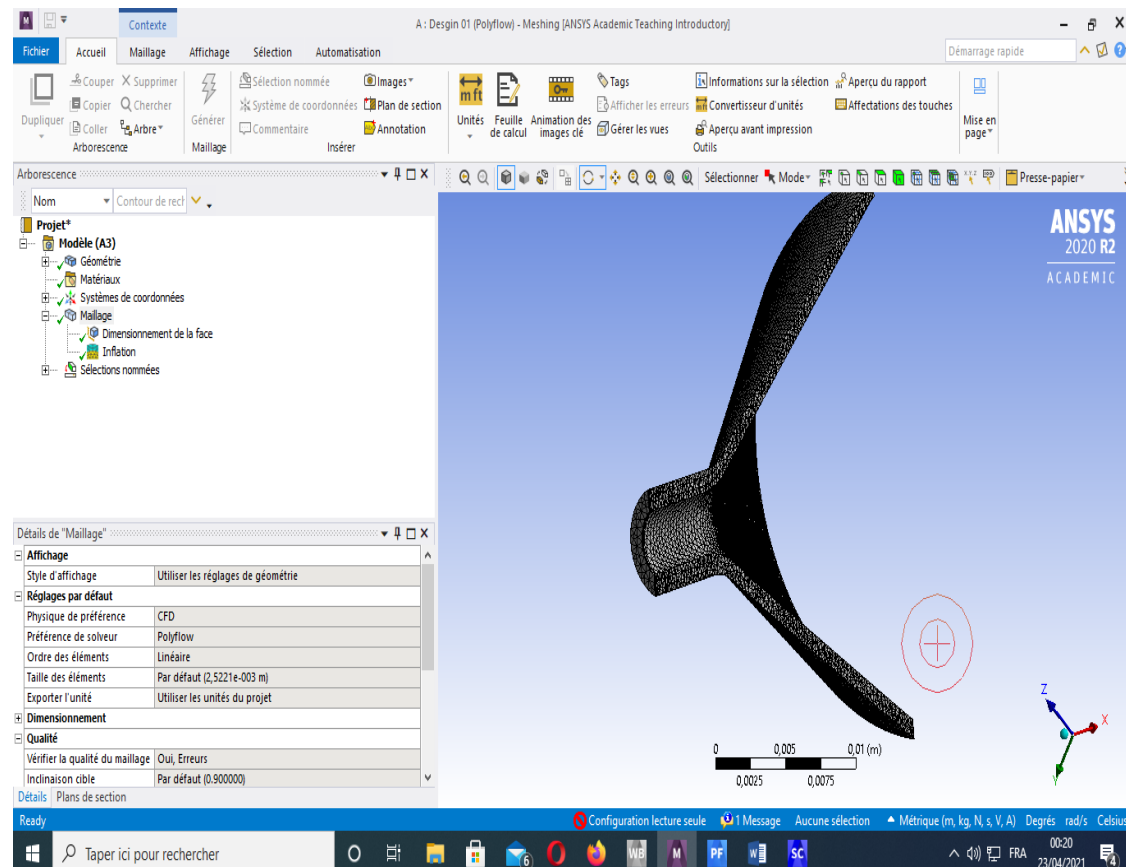


Figure IV.5 : Vue globale du maillage M1 adopté pour les simulations

IV.10.2 Influence de l'angle du convergent sur le comportement dynamique de l'écoulement ($\alpha = 30^\circ, 50^\circ$ et 70°)

Dans cette partie nous montrons des résultats liés à la situation isotherme. Autrement dit, on a étudié l'effet de l'inclusion de l'angle α sur le comportement dynamique de l'écoulement (polymère fondu).

IV.10.2.1 Etude l'influence l'angle convergent sur la pression

La figure IV.6, montre le champ de pression obtenu par simulation numérique pour différents angle. Pour tous les cas étudié, il est clair que la pression présente des valeurs très faibles à la sortie de la matrice et cela à cause de pertes engendrées et de valeurs élevées à proximité des parois et plus particulièrement au voisinage de l'aval du rétrécissement, cette augmentation est justifiée par le frottement du polymère avec la paroi.

En comparant les trois angles testés, on constate que l'augmentation de pression est proportionnelle avec l'augmentation d'angle, résultat logique, puisque l'accroissement de la vitesse résulte des contraintes plus importantes au niveau de paroi et par suite plus de pression.

Si le débit est encore augmenté, l'écoulement de polymères fondus (pvc) devient soudain instable en entrée de la filière. Cette instabilité en amont, qui résulte du comportement viscoélastique des polymères, se traduit en sortie de la filière par le défaut dit (de façon encore peu justifiée) de « rupture d'extrudât ». La terminologie plus correcte et qui devient de plus en plus courante dénomme ces défauts comme « instabilité viscoélastique en amont ».

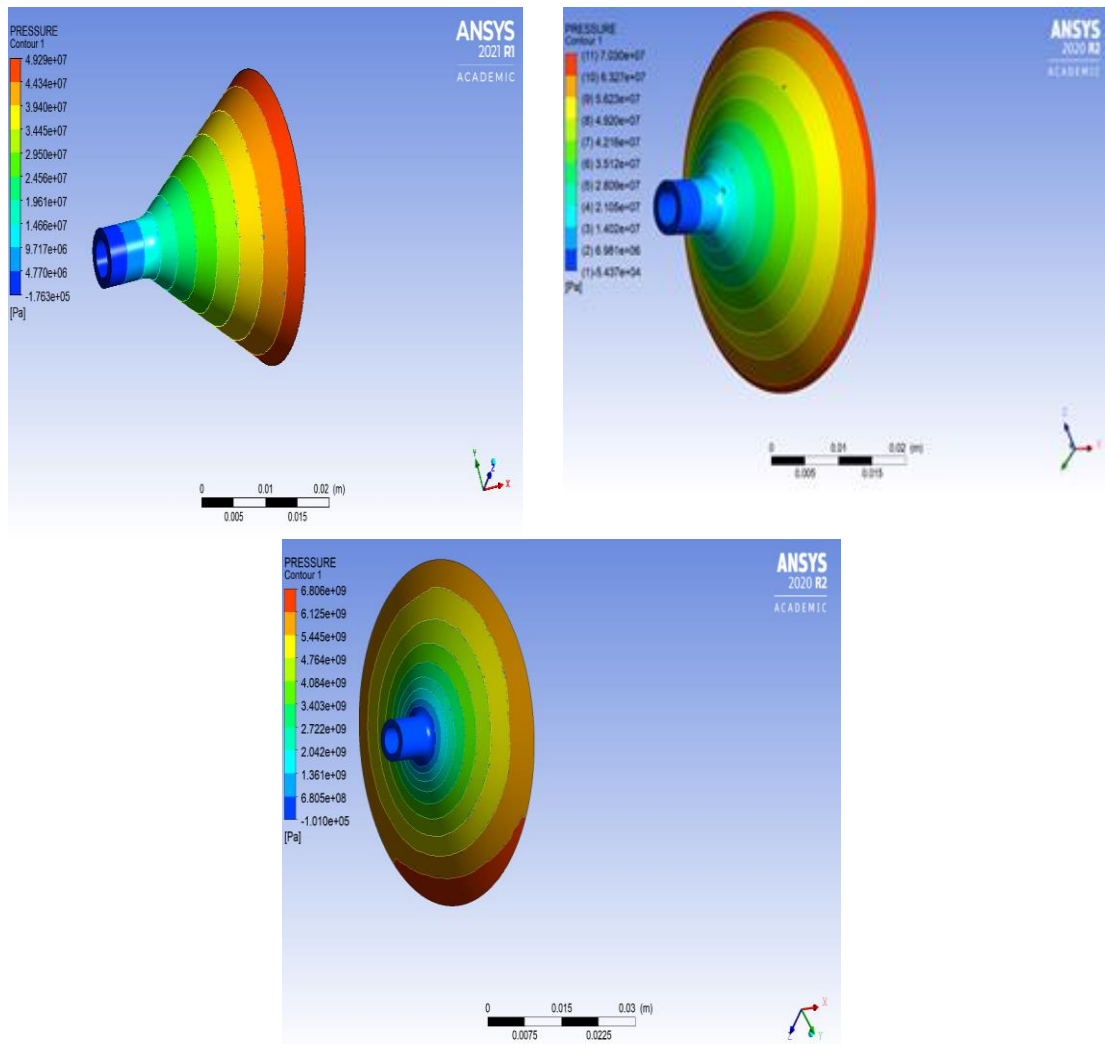


Figure IV.6 : La variation de pression pour différents angle 30°, 50° et 70°

IV.10.2.2 Etude l'influence l'angle convergent sur la vitesse

En analysant la figure IV.7, on remarque que la vitesse est plus élevée dans la seconde partie de la matrice où la section est plus petite. Il atteint une valeur maximale au centre du tube mince. Montre la défiance résultat la vitesse. La variation de débit n'influe sur la vitesse de polymère à cause de L'augmentation l'angle. Les contours de vitesse pour les trois angles utilisés sont présentés sur la figure IV.7, il est clair que les vitesses les plus faibles sont au voisinage de la base et plus spécialement vers le coin et cela s'explique par la formation d'une zone morte qui se disperse en approchant la section de contraction.

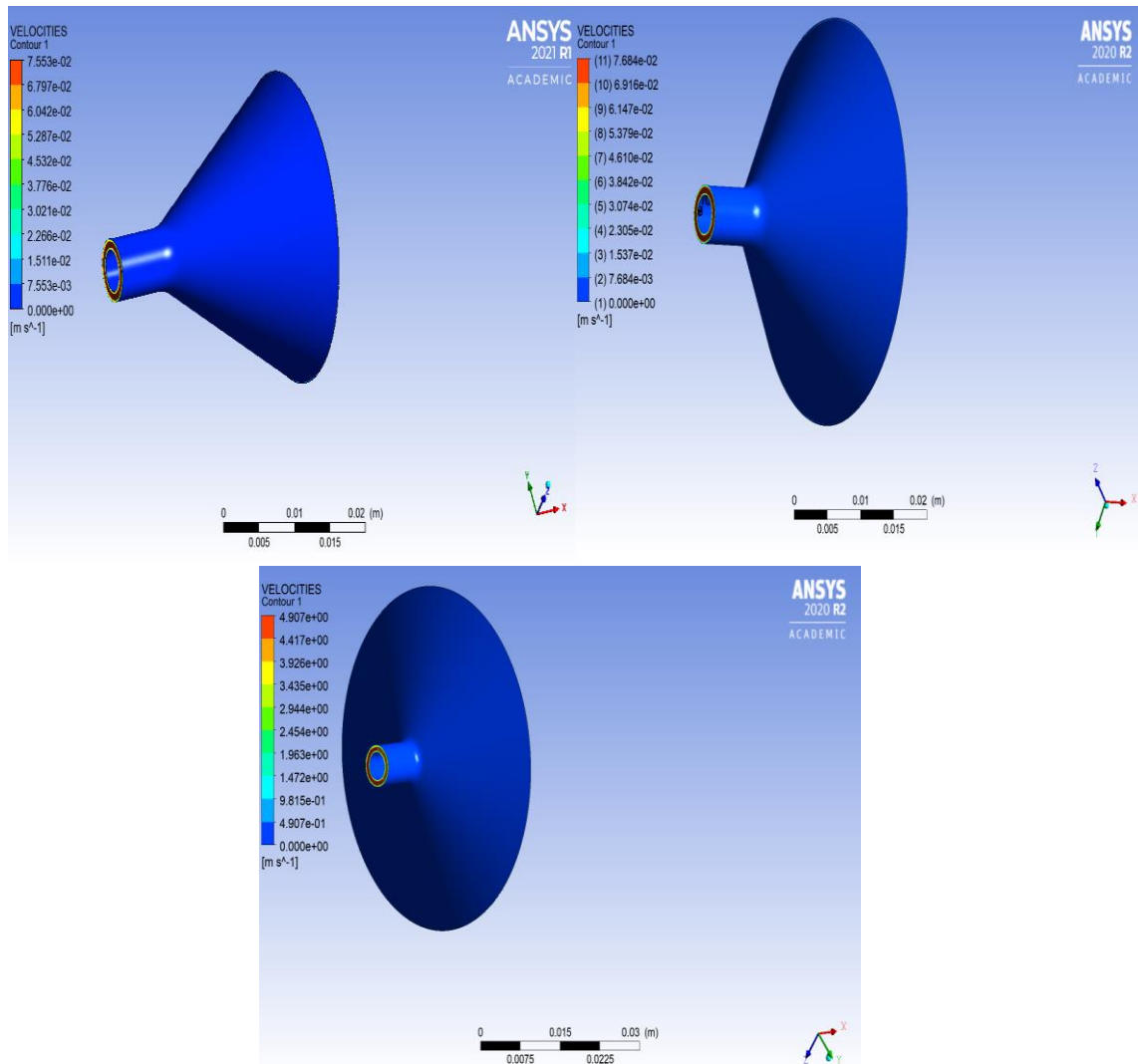


Figure IV.7 : La variation de vitesse pour différents angle 30°, 50° et 70°

IV.10.2.3 Etude l'influence l'angle convergent sur la contrainte de cisaillement

Les contours de la contrainte de cisaillement présenté sur le domaine de calcul pour les différents angles d'entré sont montrés sur la figure IV.8. On remarque que ces contours reflètent directement le comportement dynamique du polymère dans la matrice, cela s'explique par les faibles vitesses générés par la zone morte résultent des contraintes plus faibles, en s'approchant de la section de contraction, on voit que le pique de la contrainte se réside à partir de la pointe (sommets) et plus près de la paroi, alors que les plus faibles valeurs de vitesse dans cette section se localisent au centre.

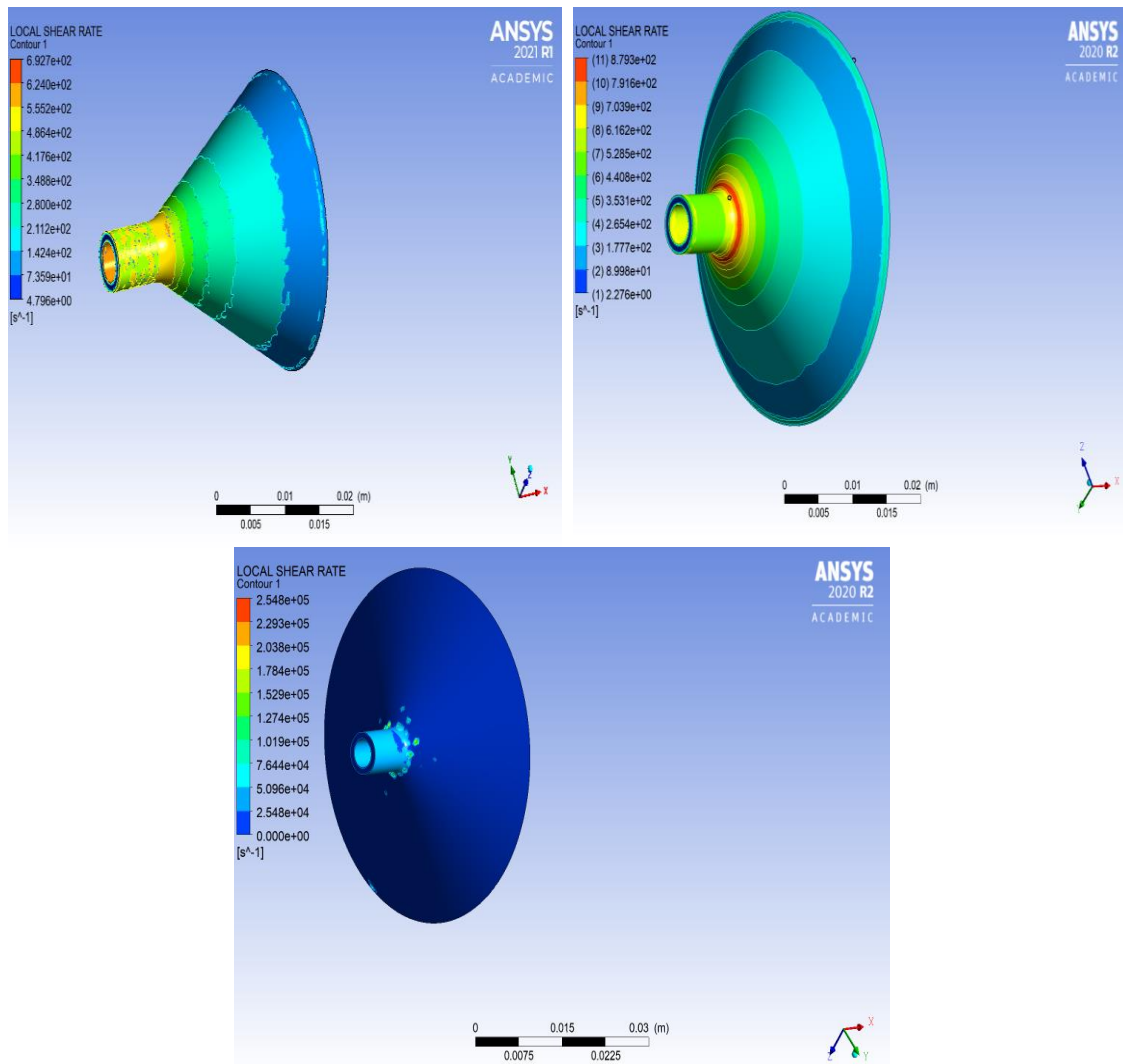


Figure IV.8 : La variation de contraintes de cisaillement pour différents angle 30° , 50° et 70°

IV.10.3 Etude l'influence de l'angle sur la pression suivant Plan (xy) et (xz)

La distribution de la pression effective suivant les deux plans dans la direction d'écoulements z , est mentionnée en Fig. (IV.9). L'examen de cette dernière nous permet de remarquer que la pression statique variée linéairement le long de la direction d'écoulement. Cette variation est plus sensible en amont de la singularité géométrique notamment avec $\alpha = 70^\circ$. Cela peut être dû à l'intensité des contraintes de cisaillement dans cette zone (*frottement*).

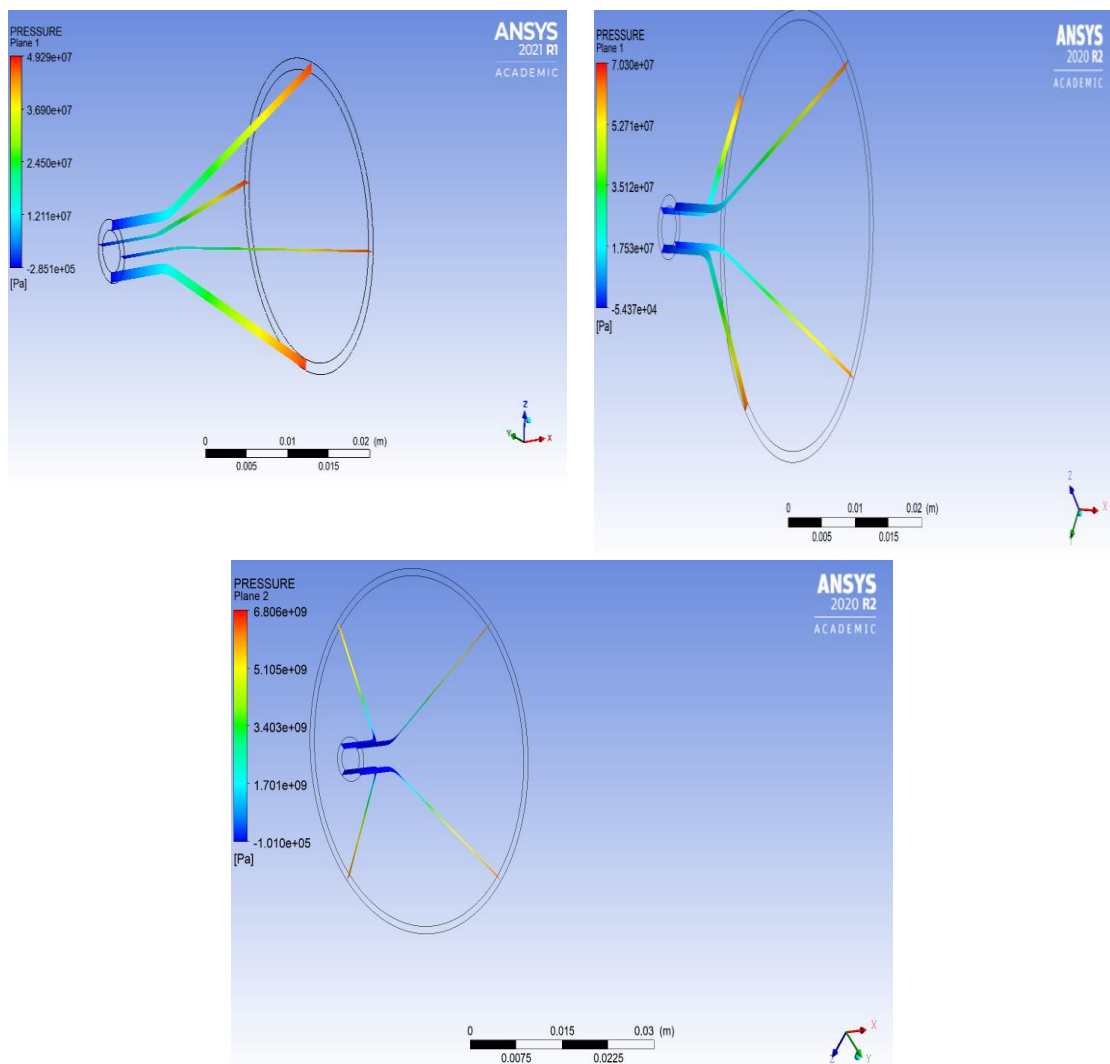


Figure IV.9 : La variation de pression suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30° , 50° et 70°

IV.10.4 Etude l'influence de l'angle α sur la vitesse suivant plan (xy) et (xz)

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.10). 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 conique. 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 $\alpha = 30^\circ$, 50° et 70° veulent 0.7595, 0.08293 et 20.61 respectivement.

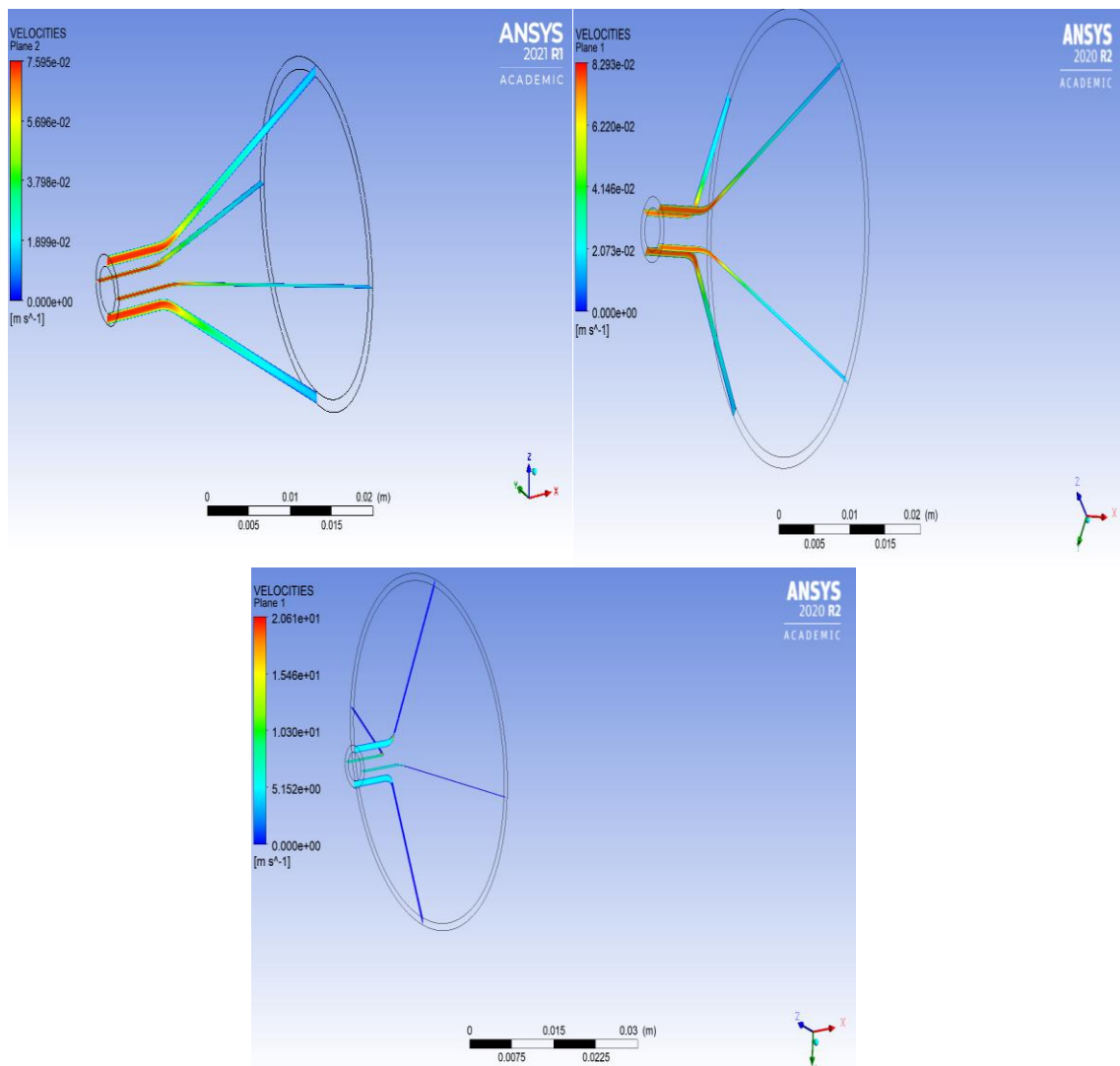


Figure IV.10 : La variation de vitesse suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30° , 50° et 70°

IV.10.5 Etude l'influence de l'angle sur la contrainte cisaillement suivant Plan (xy) et (xz)

Les isovaleurs de la contrainte cisaillement pour les deux plans sont 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 entraine l'augmentation de la contrainte de cisaillement

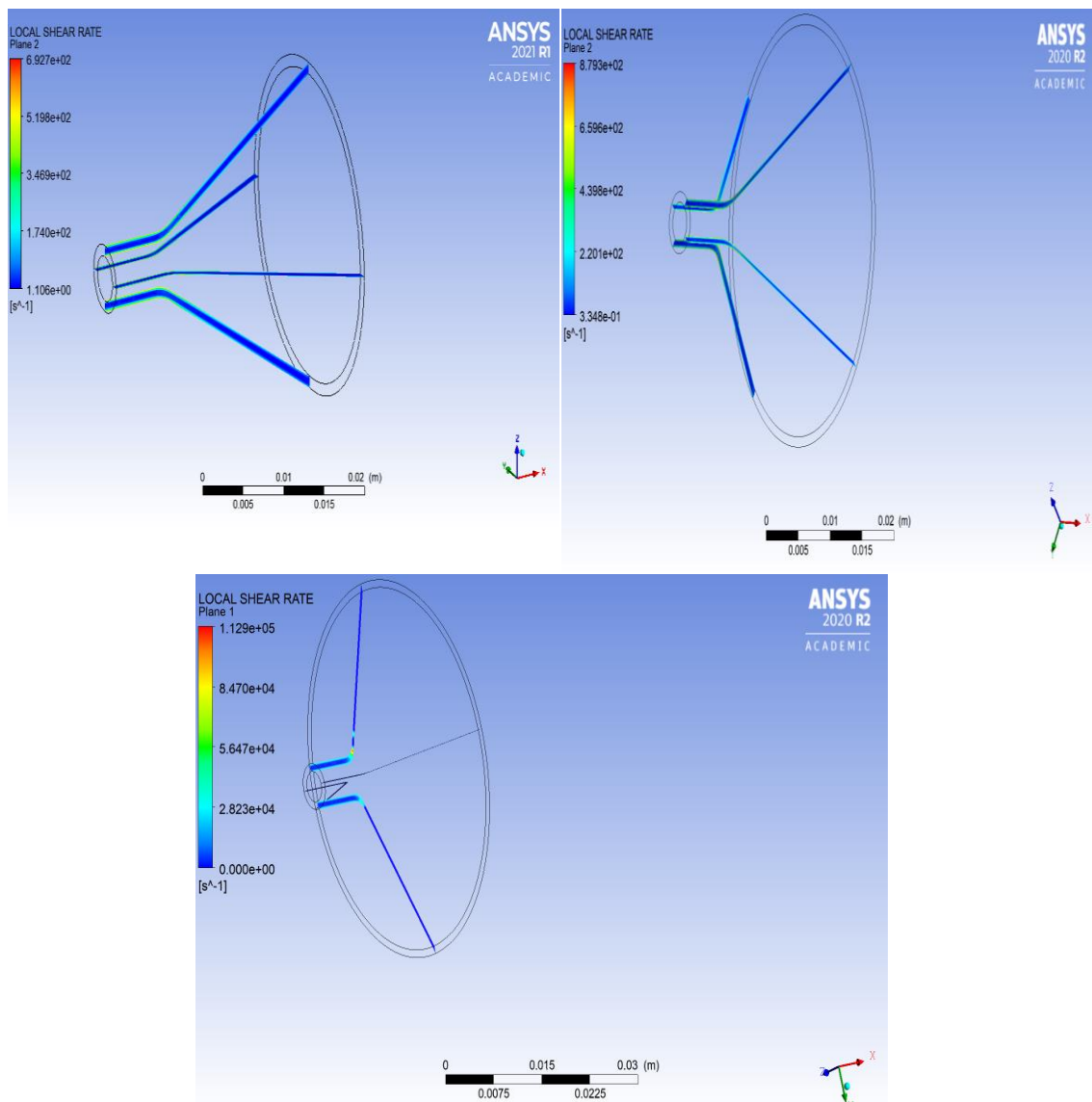


Figure IV.11 : La variation de contrainte de cisaillement suivant les deux plans (xy, zx) pour différents angle 30°, 50° et 70°

Conclusion générale et perspectives

Conclusion Générale et perspectives

L'objectif de cette mémoire d'étudier la simulation numérique tridimensionnelle d'écoulement du polymère fondu en PVC (chlorure de vinyle) à l'intérieur d'une filière de l'extrudeuse simple et axisymétrique. Le régime d'écoulement étudié est laminaire, isotherme et stationnaire

La simulation a été effectuée à l'aide du logiciel ANSYS "Polyflow" 2020, qui basé sur la méthode des éléments finis et la résolution des équations de la dynamique des fluides, en plus de l'équation constitutive qui permette d'obtenir la viscosité du polymère. Celui-ci est considéré comme un fluide newtonien généralisé. Son comportement rhéologique est choisi pour notre cas celui de la loi de « Bird carreau » qui est parmi les plus simples lois.

Pour mieux comprendre le comportement du PVC en écoulement, notamment avec la présence de la pression, vitesses et contraintes de cisaillement, Les résultats numériques obtenus, nous permettent de signaler les points suivants :

- ❖ La pression change linéairement le long de la conduite a singularité géométrique, avec une intensité plus élevée à l'aval de cette dernière ;
- ❖ La vitesse est plus élevée dans la seconde partie de la matrice où la section est plus petite. Il atteint une valeur maximale au centre du tube mince. Montre la défiance résultat la vitesse. La variation de débit n'influe sur la vitesse de polymère à cause de L'augmentation de débit.
- ❖ Les iso-valeurs de la contrainte cisaillement sont maximale au niveau située toujours près de la paroi.
- ❖ Les gradients de température sont plus importants dans le fluide que dans la matrice,

Finalement, pour les futurs étudiants, et dans le but de comprendre mieux le comportement complexe des polymères en écoulement, dans les conduites à contraction brusque, on peut mettre les perspectives suivantes :

- Utilisé d'autres lois de comportement pour décrire mieux le comportement rhéologiques du PVC en écoulement ;

- Elargir l'étude aux géométries cylindrique ;
- L'extension de la simulation au phénomène du gonflement (sortir de la filière) associé procédés de mise en forme par extrusion.

Référence bibliographiques

Référence bibliographique

ANSYS POLYFLOW, 15.1 User`s Guide 2015.

Achab L, S. Benhadid (2005), *Application d'une loi constitutive dans l'étude numérique de l'écoulement sanguin à travers une artère sténosée*, *Rhéologie*, Vol. 7, 28-34

Balaji P.A., Sundararajan T., Lal F.K., (1991) *Viscoplastic deformation analysis and extrusion die design by FEM*, *J. Appl. Mech.* 644.

Carreras s. E. (2005), *stabilite en extrusion des polymeres fondus effets de la pression et de la structure des copolymères triblocs de type aba*, *these de doctorat a l'universite joseph fourier-grenoble i, france.*

CHABANE Fouad « *contribution a la modelisation de transfert de chaleur lors du remplissage d'un moule* » *thèse magistère, université de Batna 2009.*

DJOUDI, Tarek (2005) *Etude De L'écoulement Du Polymère Fondu Dans Les Moules Résolution Par: La Méthode Des Volumes Finis (MVF)*. *Masters thesis, Université Mohamed Khider Biskra*

Gunasekera J., Hoshino S., (1985) *Analysis of extrusion of polygonal sections through streamlined dies*, *J. Eng. Ind.* 107, 229.

Guy R. (2001), *Extrusion cooking Technologies and applications*, *Published by Woodhead Publishing Limited, Cambridge CB1 6AH, England.*

Keife H., (1993) *Extrusion through two die openings: a 2D upper-bound analysis checked by plasticine experiments*, *J. Mater. Process. Technol.* 37 (1993) 189.

Kusiak J., Thompson E.G., (1989) *Optimization techniques for extrusion die shape design. Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM)* 569.

Maniatty A.M., Chen M.-F., (1996) *Shape sensitivity analysis for steady metal-forming processes*, *Int. J. for Num. Meth. Eng.* 39, 1199.

Michaeli W. (1992), *Extrusion Dies for plastic and Rubber: design and engineering computations' 2nd Edition* by Hanser Publisher.

Nagpal V., Billhardt T., Altan, (1979) *lubricated extrusion of 'T' sections from aluminum, titanium and steel using computer-aided techniques*, *J. Eng. Ind.* 101, 319.

Nassehi V. (2002), *practical aspects of finite element modelling of polymer processing*, Published by John Wiley & Sons, Ltd

Polyflow manual (2020), *Generalized Newtonian flow, chapter 8*.

Prasad A. (1999), *Polyethylene low-density, Polymer Data Handbook*, Published by Oxford University Press, pp. 518

Pujos C. (2006), *Estimation de la rhéologie d'un polymère dans une filière d'extrusion Simulation d'écoulement avec transferts thermiques et Inversion de mesures*, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France.

Ulysse P. (1999), *optimal extrusion die design to achieve flow balance*, *Inter. J. of Machine Tools & Manufacture* 39, 1047–1064

Ulysse P., Johnson R.E., (1999), *A die design model for thin section extrusions*, *Int. J. Mech. Sci.* 41, 1067.

VERGNES B. and PUISSANT S. (2002a), *extrusion monovis (partie 1)*, *Techniques de l'Ingénieur. AM 3 650*, pp. 1-16

VERGNES B. and PUISSANT S. (2002b), *extrusion monovis (partie 2)*, *Techniques de l'Ingénieur. AM 3 651*, pp. 1-10

Yanneck Wielhorski (2012) « *Transferts de chaleur dans un écoulement de polymère fondu en régime non stationnaire - Application aux procédés d'extrusion et d'injection* » Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

TABET Sara (2017), « *Etude numérique de la convection naturelle dans une enceinte fermée partiellement chauffée* » Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle Université d'Oran 2.

Tomalia D.A., J. M .J. Fréchet (2001). *Dendrimers and other Dendritic Polymers*; Wiley, New York.

I. Teraoka (2002), *Polymer Solutions, An introduction to physical properties*, Ed. Polytechnic University Brooklyn, New York.

SUMMERS J. *Lubrication Mechanism in Poly (Vinyl Chloride) Compounds: Understanding Three Distinct Roles of Lubricants [article]*. P3Consultants, Inc. – ANTEC, 2006, p. 2882-2886.

<http://pslc.ws/french/pe.htm>

