

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
MECANIQUE



DOMAINE : Génie Mécanique
FILIERE : Génie Mécanique
OPTION : Modélisation numérique en
mécanique

N° :.....

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: BOUAZIZ Ghazlene Marwa

Intitulé

**Simulations numériques par la méthode
des tubes de courant du gonflement de
polymère dans des conduites
axisymétriques**

Soutenu devant le jury composé de:

Mme. Benkherbeche Souad

Mr. BERKACHE Amar

Mr. CHINE Adel

Université de M'SILA

Université de M'SILA

Université de M'SILA

Président

Examineur

Rapporteur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciement...

Je dois tout d'abord remercier mon dieu qui m'a donné la force, l'équilibre, l'énergie pour atteindre mon objectif, Merci dieu...

Je tiens à remercier Docteur Adel CHINE d'avoir accepté de diriger ce travail, Un grand merci pour sa contribution à ce travail, pour ses conseils et son aide précieuse, sa disponibilité. Je tiens à exprimer mon admiration devant sa passion pour ce domaine et la patience avec laquelle il m'a initié à ce domaine, sans oublier la simplicité de ses explications. Il a fait l'impossible pour m'aider à effectuer ce travail. Je le remercie enfin pour son encouragement, son soutien moral et sa gentillesse.

Je remercie vivement Dr Benkherbeche S pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail, vous êtes un véritable exemple pour moi, merci pour tous vos conseils durant les cinq ans de mes études.

Mes remerciements vont également au Professeur Berkache, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail, je me souviendrais toujours de vos conseils, votre profonde explication, je vais tenir en compte que je suis le bon exemple pour l'Algérie comme vous m'avez dit.

Enfin je remercie chaleureusement ma famille commençant par MAMI WANESSA vous étiez jamais ma grand-mère toujours la mère qui m'a rendue forte comme elle.

Je remercie mes deux tantes ROFIA et GHANIA je vous aime énormément sans oublier ma petite cousine MAYALENE grandis-toi vite

Je remercie mon oncle Ahmed .

MAMAN Naima même si je te dis milles merci vont pas te satisfaire, MAMAN j'espère que tu es fière de moi maintenant comme je le suis, merci Maman tu m'as jamais laissée seule dans mes pires et mes faibles moments tu m'as toujours encouragée, pousser tu m'as dit que tout être mieux qu'avant effectivement, je t'aime maman par ce que tu es mon cadeau du ciel, merci par ce que tu m'as bien éduquée tu m'as rendue une femme forte, mure. Merci

Tables des matières

Introduction générale	1
I Généralités sur les polymères	2
I.1 Introduction.....	4
I.2. Définition d'un polymère.....	4
I.3 Classification des polymères.....	4
I.3.1 Selon leurs natures chimiques.....	5
I.3.2 Selon leurs origines	5
I.3.3 Selon leurs domaines d'applications.....	5
I.3.4 Selon leurs usages.....	6
I.3.5 Selon leurs comportements thermiques.....	6
1.3.5.1 Polymères thermoplastiques.....	6
I.3.5.2 Polymère thermodurcissables.....	7
I.3.5.3 Elastomères.....	7
I.4 Structure des polymères.....	8
I.4.1 Polymères linéaires (monodimensionnels).....	8
I.4.2 Polymères ramifiés (bidimensionnels).....	8
I.4.3 Polymères réticulés (tridimensionnels).....	9
I.5 Propriétés des polymères.....	10
I.5.1 Propriétés physiques.....	10
I.5.1.1 Elasticité.....	10
I.5.1.2 Plasticité.....	10
I.5.1.3 Viscosité.....	11
I.5.1.4 Viscoélasticité.....	11
I.5.1.5 Viscoplasticité.....	11

I.5.2 Propriétés thermiques (conductivité thermique).....	11
I.6 Propriétés mécaniques.....	11
I.6.1 L'architecture du polymère.....	11
I.6.2 formulation du polymère.....	12
I.6.3 La mise en œuvre.....	12
I.6.4 Les conditions d'utilisation.....	12
I.7 Synthèse des polymères.....	12
I.7.1 Grands procédés.....	12
I.7.1.1 Polymérisation par étapes, ou polycondensation.....	13
I.7.1.2 Polymérisation en chaîne, ou polyaddition.....	13
I.7.2 Petits procédés.....	14
I.7.2.1 En masse.....	14
I.7.2.2 En solution.....	14
I.7.2.3 En suspension.....	14
I.7.2.4 En émulsion.....	14
I.7.2.5 En lit fluidisé.....	14
I.8 Les avantages et les inconvénients des polymères.....	14
I.8.1 Les avantages.....	15
I.8.2 Les inconvénients.....	15
I.9 Polyéthylène.....	15
I.9.1 Propriétés du polyéthylène.....	16
I.9.2 Polyéthylène à Haute Densité(PEHD).....	16
I.9.2.1 Structure moléculaire du PEHD.....	17
I.9.2.2 L'utilisation du PEHD.....	17
I.9.2.3 Production du PEHD.....	17
I.9.3 Le polyéthylène a Basse Densité(PEBD).....	18
I.9.3.1 Propriétés du PEBD.....	19
I.9.4 Avantages du polyéthylène.....	19
I.9.5 Inconvénients du polyéthylène.....	19

I.10 Nylon.....	19
I.10.1 Procédés de sythèses de polyamide 6,6.....	19
I.10.1.1 Polycondensation du nylon 6,6.....	20
I.10.2 Domaine d'application.....	20
I.10.3 Propriétés du Nylon6-6.....	21
I.11 Procèdes de mise en forme des polymères.....	21
I.11.1 Principes de fonctionnement des extrudeuses.....	21
I.11.2 Domaines d'applications.....	22
I.11.3 Description de l'extrudeuse monovis.....	22
I.11.3.1 Fonctionnement.....	22
I.12.3.2 Principaux éléments de l'extrudeuse monovis.....	23
I.11.4 Défauts d'extrusion.....	26
I.11.4.1 Défaut de peau de requin.....	27
I.11.4.2 Défaut oscillant.....	28
I.11.4.3 Défauts d'entrée (défauts volumiques).....	28
I.12 Injection.....	29
I.13 Conclusion.....	30

II Formulation mathématique

II.1 Introduction.....	32
II.2 Méthode des tubes de courant (MTC).....	32
II.2.1 Définitions :(lignes de courant, tubes de courant.....	32
II.2.2 Ecoulements bidimensionnels.....	32
II.2.3 Transformation du domaine en MTC.....	33
II.3 Operateurs cinématiques.....	35
II.4 Formulation du problème à la sortie de filières bidimensionnelles par la méthode des tubes de courant.....	36
II.4.1 lois de conservation.....	36
II.4.1.1 Domaine réel Ω	36

II.4.1.2	Domaine transformé Ω^*	38
II.5	Contraintes et déformations dans un fluide.....	38
II.5.1	Tenseur des contraintes.....	38
1.	II.5.1.1 Tenseur des contraintes visqueux τ	39
II.5.1.2	Tenseur des taux de déformation D	40
II.6	Conditions aux limites.....	42
II.6.1	Conditions aux limites essentielles	42
II.6.1.1	Partie amont	42
II.6.1.2	Axe de symétrie	42
II.6.1.3	Paroi de la conduite	42
II.6.1.4	Partie aval	43
II.6.2	Conditions aux limites naturelles.....	43
II.6.2.1	Partie amont	43
II.6.2.2	Axe de la symétrie.....	43
II.6.2.3	Paroi de la conduite	44
II.6.2.4	Partie aval.....	44
II.7	Modèles Rhéologiques.....	44
II.7.1	Modèle newtonien	44
II.7.2	Modèle Non-newtonien visqueux pur	45
II.7.2.1	Loi de puissance	45
II.7.2.2	Loi de carreau	46
II.8	Conclusion.....	47

III Formulation numérique.....48

III.1	Introduction.....	50
III.2	Formulations primaire et mixte	50
III.3	Discrétisation des équations et des inconnues.....	51
III.3.1	Consistance et stabilité.....	51

III.4 Discrétisation en Méthode des Tubes de.....	52
Courant	
III.4.1 Discrétisations par différences finies.....	52
III.4.1.1 Dérivées premières suivant la direction R.....	53
III.3.1.1 Dérivées premières suivant la direction Z.....	53
III.5 Algorithme et résolution du problème.....	54
Mécanique	
III.6 Algorithme de Newton – Raphson.....	55
III.7 Optimisation de la méthode de Newton- Raphson(coefficient de descente).....	57
III.8 Conclusion.....	57

IV Résultats et discussions.....59

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Géométrie du domaine d'étude.....	60
IV.3 Résultats et discussion.....	61
IV.3.1 Maillage.....	61
IV.3.2 Résultats numériques.....	62
IV.3.2.1 Modèle de Carreau($Q = 3.14 \times 10^{-5}$ [m ³ /s]).....	62
IV.3.2.2 Effet de la loi rhéologique sur le comportement dynamique du Nylon en écoulement($Q = 3.14 \times 10^{-5}$ [m ³ /s]).....	66
IV.3.2.3 Effet de la cinématique sur le comportement dynamique du Nylon en écoulement.....	67
IV.4 Conclusion	69

Conclusion générale.....71

Références bibliographiques

Listes des figures

Chapitre I

- 1 **Figure I.1** : modèle schématique de la synthèse d'un polymère.....
- 2 **Figure I.2** : Structure d'un thermoplastique linéaire.....
- 3 **Figure I.3** : Structure d'un Thermodurcissable linéaire.....
- 4 **Figure I.4** : Représentation de la chaîne de polymère linéaire.....
- 5 **Figure I.5** : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel.....
- 6 **Figure I.6** : représentation schématique d'un polymère tridimensionnel(réticulé).....
- 7 **Figure I.7** : Comportement élastique linéaire représenté schématiquement par un ressort.....
- 8 **Figure I.8** : schéma de la chaîne du polyéthylène.....
- 9 **Figure I.9** : cuve en polyéthylène haute densité.....
- 10 **Figure I.10** : Destination de production de polyéthylène à haute densité PEHD (Source POLYMED).....
- 11 **Figure I.11** : Sac plastique transparent à base du polyéthylène à basse densité.....
- 12 **Figure I.12** : Principe de fonctionnement d'une extruseuse.....
- 13 **Figure I.13** : Schéma d'une ligne d'extrusion de tubes.....
- 14 **Figure I.14** : Filière porte manteau.....
- 15 **Figure I.15** : Filière en T.....
- 16 **Figure I. 16** : Filière queue de carpe.....
- 17 **Figure I. 17** : Produit réalisé par filière d'extrusion cylindrique.....

-
- 18 **Figure I. 18** : Filière a ailette (mandrin et noyau).....
- 19 **Figure I.19** : Filière hélicoïdale.....
- 20 **Figure I.20** : type porte manteau.....
- 21 **Figure I .21** : Schémas de filières de profilés a-filière plaque/ b-filière progressive.....
- 22 **Figure I.22** : différents types de défauts d'extrusion a)-peau de requin/b)- défaut bouchon/c)-défaut hélicoïdale /d)-défaut couchitique.....
- 23 **Figure I.23** : Evolution de la surface d'un jonc extrudé à différents taux de cisaillement apparent, pour un PEBDL à 205 °C a.)-137s⁻¹/b.)320s⁻¹/ c.)572s⁻¹.....
- 24 **Figure I.24** : section transversale de l'extrudât.....
- 25 **Figure I.25** : écoulement à l'entrée d'un convergent a-)polymère linéaire / b-) polymère ramifié.....
- 26 **Figure I. 26** : Différentes phases du cycle d'injection se déroulent de la manière suivante.....
- 27 **Figure I.27** : différentes phases du cycle d'injection.....

Chapitre II

- 28 **Figure II.1** : Schéma d'un tube de courant.....
- 29 **Figure II.2** : Transformation dans le Ω^* de lignes de courant du domaine Ω

Chapitre III

- 30 **Figure III.1** : Exemple de grille de discrétisation dans le domaine transformé Ω^*

2 Listes des tableaux

Le tableau I.1: Présente la production de quelques pays de PEHD, en 2003 dans le monde, en milliers de tonnes.....

Liste des tableaux

Le tableau I.1: Présente la production de quelques pays de PEHD, en 2003 dans le monde, en milliers de tonnes.....17

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du maillage adopté pour les calculs.....61

Liste des Symboles

1 Lettres latins

k ou f [m] : Fonction de transformation.

p [Pa] : Pression statique.

\mathbf{D} [s^{-1}] : Tenseur des taux de déformation.

\mathbf{V} [ms^{-1}] : Champ de vitesse.

n : Indice de la loi en puissance.

2 Symboles grecs

τ [Pa] : Tenseur des extra-contraintes.

σ [Pa] : Tenseur des contraintes totales.

ρ [kgm^{-3}] : Masse volumique.

$\dot{\gamma}$ [s^{-1}] : Taux de cisaillement apparent.

η_0 [Pa.s] : Viscosité dynamique à taux de cisaillement nul.

η_∞ [Pa.s] : Viscosité dynamique à taux de cisaillement infini.

λ [s] : Un paramètre matériel de temps (constant).

Ω : Domaine d'étude réel (physique).

Ω^* : Domaine d'étude transformé.

$\Delta = \nabla \cdot \nabla$: L'opérateur mathématique laplacien.

3 Symboles mathématiques

∇ : L'opérateur mathématique gradient.

Introduction générale

Les polymères jouent un rôle de plus en plus important dans notre vie quotidienne. Leurs propriétés physico-chimiques leur permettent d'avoir une classe importante dans les matières premières industrielles. La mise en forme de ces matériaux polymères est donc un enjeu économique d'importance, qui se traduit notamment par la recherche des moyens assurant les exigences du développement industriel actuel.

Le procédé d'extrusion représente une des techniques le plus utilisé dans le domaine de mise en forme, où le matériau à l'état solide (granulé) sera transformé par réchauffement le long d'une machine dite extrudeuse. A la fin de cette dernière existe la filière dont sa forme géométrique correspond à la forme de l'objet à fabriquer. Le comportement du fluide en écoulement à l'intérieur de cette filière influe considérables sur la qualité du produit finis. Autrement dit, la compréhension de tel écoulement dans l'extrudeuse (*plus spécialement la filière*) assure l'amélioration de la qualité des produits fabriqués.

Les méthodes numériques constituent une des moyens les plus utilisés pour la résolution des problèmes parus lors de l'écoulement de polymère à travers l'extrudeuse. Ces méthodes permettant la résolution des équations mathématiques gouvernant cet écoulement. Parmi ces méthodes on trouve la méthode des tubes de courant, technique fondé par le professeur Jean Robert CLERMONT de l'institut national polytechnique de Grenoble –France. Cette technique et grâce à une transformation géométrique nous permet de transformer le domaine d'étude, généralement de géométrie complexe, à un domaine transformé de géométrie plus simple, où la solution sera calculée.

Dans ce modeste travail on a essayé, par l'utilisation de la méthode des tubes de courant, de comprendre le comportement dynamique du Nylon 6.6 à travers une filière axisymétrique à convergent, en tenant compte de glissement du fluide sur une partie de la filière.

Pour faciliter la compréhension de ce travail. Ce dernier a été structuré comme suit :

- ⇒ Le premier chapitre est réservé aux généralités et définitions liées principalement aux polymères et leurs procédés de fabrication ;

- ⇒ Dans le deuxième chapitre nous aborderons les principes de la méthode des tubes de courant. Une description mathématique des équations gouvernant le problème à résoudre, ainsi que les lois de comportement adoptés dans nos simulations sont aussi mentionnés ;
- ⇒ La procédure numérique de résolution est présentée dans le troisième chapitre ;
- ⇒ Le quatrième chapitre est réservé à la présentation de l'ensemble des résultats obtenus par nos simulations. Une discussion de ces résultats est présentée aussi. Nous finalisons cette étude par une conclusion qui récapitule le travail réalisé dans ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les polymères

Résumé

Dans ce chapitre nous allons décrire des généralités sur les polymères, leurs définitions, classifications, propriétés, domaine d'utilisation. On a choisi comme polymère le polyéthylène et le nylon 6,6, qui consistent les matériaux utiles dans l'industrie de mise en forme, aussi une description de la méthode de fabrication des polymères synthétiques suivi d'une brève détaille sur l'extrudeuse et ses principaux éléments (vis, filière). Finalement, nous terminons ce chapitre par un autre procédé de mise en forme qui est l'injection, suivi par la conclusion.

I.1 Introduction

Les polymères jouent un rôle très important dans notre vie quotidienne, leurs applications sont de plus en plus vaste, la demande mondiale de ces matière augmente d'une année à une autre.

Même les premiers hommes les ont utilisés comme des plastiques naturelles tels que : l'argile, le poil, la soie, le coton, le caoutchouc naturel...etc.

L'apparition des polymères a évolué avec les efforts importants qui ont été fournis dans le domaine de la recherche et le développement de la chimie organique, les plus importants à l'échelle industrielle correspondent à 30 à 40 types de polymères différents, proposés sous plusieurs marques commerciales environ. Parmi ces derniers, le polyéthylène (à haute et à basse densité), le nylon 6,6 ont une grande importance grâce à leurs propriétés qui ne permet d'accéder à la modélisation et la simulation numérique.

I.2 Définition d'un polymère

Les polymères – du grec 'poly' (beaucoup) et 'meros' (parties).

Un polymère est en effet une macromolécule obtenue par la répétition d'une unité constitutive, encore appelée unité de répétition, comportant un groupe d'atomes liés par des liaisons covalentes. Les termes « unité constitutive » et « unité de répétition » sont, de nos jours, préférés à « motif monomère » ou « Unité monomère ».

L'assemblage des monomères pour l'obtention de polymères (ou macromolécules) s'appelle la polymérisation.

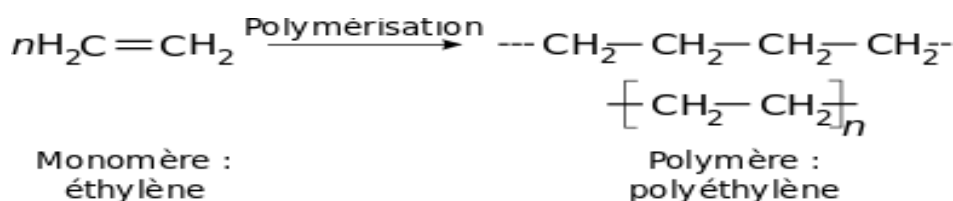


Figure I.1 : modèle schématique de la synthèse d'un polymère

I.3 Classification des polymères

Il existe plusieurs types de classification des polymères :

I.3.1 Selon leurs natures chimiques

On distingue :

- ✓ **Polymères minéraux** : ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple : diamant, graphite, phosphore, soufre...Ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes (silicates acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile).
- ✓ **Polymères organiques** : C'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyles.
- ✓ **Polymères mixtes** : **Doués** de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique ($\sim 300^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$) comme les silicones.

I.3.2 Selon leurs origines

On peut les classer en trois catégories :

- **Polymères naturels** : Ils sont issus des règnes végétaux ou animaux. On peut cependant mentionner, dans cette catégorie, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...), celle des protéines (laine, sois...) ;
- **Polymères artificiels** : Ils sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés ; les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose...) ont toujours connu une certaine importance économique ;
- **Polymères synthétiques** : Ils sont totalement issus du génie de l'Homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères. Leur variété est extrême et ce sont eux qui seront le plus souvent considérés dans la suite de cet ouvrage.

I.3.3 Selon leurs domaines d'applications

On regroupe les polymères en 3 grandes catégories :

- **Polymères de grande diffusion** : Encore appelés polymères de commodité, dont la production annuelle s'évalue par millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien pour tous. Le polyéthylène, le polystyrène ;
- **Polymères techniques** : Ils ont des caractéristiques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...)

pour nombreuses application ; les polyamides, les polyacétales...font partie de cette famille ;

- **Polymères spéciaux** : Ou polymères de fonction présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière.

I.3.4 Selon leurs usages

Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant que la variété des propriétés a multipliées applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

- **Polymères de grande diffusion** : (encore appelés polymères de commodité), Le polyéthylène, le polystyrène et quelques autres sont à classer dans cette catégorie ;
- **Polymères techniques** : Ils ont des caractéristiques mécaniques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus, aux matériaux traditionnels (métaux, céramique...) dans de nombreuses applications ; les polyamides, les polyacétals etc.... font partie de cette famille ;
- **Polymères spéciaux** : (ou polymères de fonction) présentent généralement une propriété spécifique qui induit leur utilisation pour une application particulière.

I.3.5 Selon leur comportement thermique

Les propriétés thermiques des polymères permettent des usages très variés. On peut ainsi les regrouper dans deux familles :

- ✓ Les thermoplastiques ;
- ✓ Les thermodurcissables ;
- ✓ Les élastomères.

1.3.5.1 Polymères thermoplastiques

On les appelle thermoplastiques, car ils conservent leur propriétés plastiques. Ils sont composés de zones possédant un ordre cristallin, contiennent toujours des zones amorphes, dans lesquelles les macromolécules sont désordonnées. Ces matières sont dites semi cristallins. Exemple des thermoplastiques semi

cristallins : (**Polyéthylène** PE), (**Polyéthylène Téréphtalate** PET), (**Polychlorure de vinyle** PVC), etc....

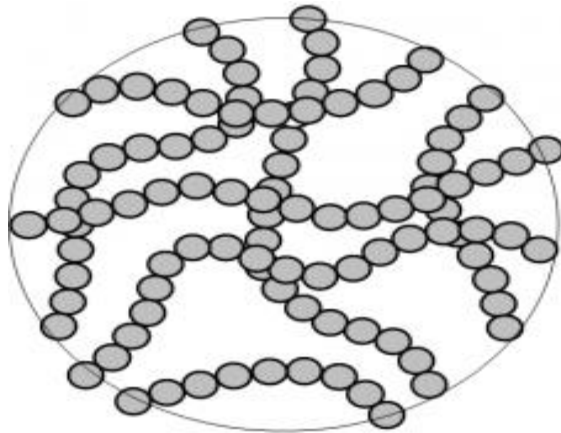


Figure I.2 : Structure d'un thermoplastique linéaire

I.3.5.2 Polymère thermodurcissables

Les thermodurcissables sont formés de monomères ou de groupes de monomères liés entre eux par un réseau tridimensionnel de liaisons chimiques formées en présence de chaleur ou en présence d'un catalyseur. Cette opération, la réticulation, est irréversible. Les thermodurcissables sont rigides à la température d'utilisation, et n'ont pas de point de fusion, les **aminoplastes**, les **polyépoxydes**, les **polyuréthanes** sont des thermodurcissables.

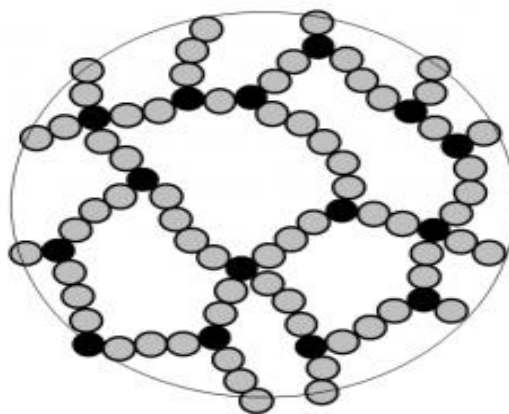


Figure I.3 : Structure d'un Thermodurcissable linéaire

I.3.5.3 Elastomères

Ces polymères couramment appelés caoutchoucs, peuvent être considérés comme les thermodurcissables faiblement pontés, c'est-à-dire comportant 10 à 100 fois

moins de liaisons. la principale propriété est leur faible rigidité, ce qui leur permet de supporter de très importantes déformations avant rupture.

I.4 Structure des polymères

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

I.4.1 Polymères linéaires (monodimensionnels)

Pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères ; c'est-à-dire que dans une molécule linéaire les monomères sont enchaînés en ligne (les molécules sont constituées de plus ou moins longues chaînes d'atomes, cette chaîne est appelée chaîne principale, certains atomes de cette chaîne sont attachés de petites chaînes appelées chaînes secondaires). En réalité, la molécule est rarement parfaitement linéaire, les thermoplastiques sont des polymères linéaires.

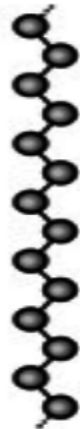


Figure I.4 : Représentation de la chaîne de polymère linéaire

I.4.2 Polymères ramifiés (bidimensionnels)

Certains polymères ramifiés peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...), dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples :

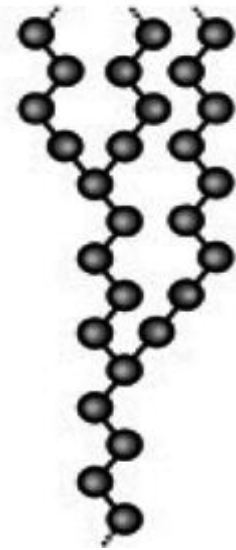


Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel

I.4.3 Polymères réticulés (tridimensionnels)

C'est le cas des polymères dont les chaînes forment un ou plusieurs réseaux tridimensionnels, par voie chimique ou physique des liaisons entre les chaînes macromoléculaires sont créées, la réticulation peut être assurée par l'apport d'atomes sous l'action de la chaleur en présence d'un catalyseur/durcisseur. Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système est représenté comme sur la figure 6 :

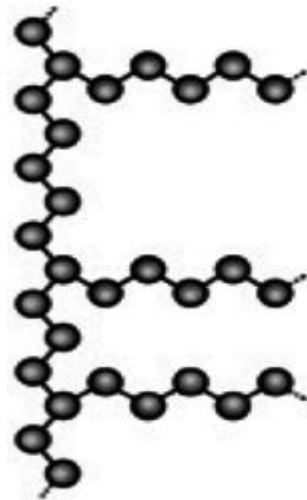


Figure I.6 : représentation schématique d'un polymère tridimensionnel (réticulé)

I.5 Propriétés des polymères

Les propriétés des polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,.....), et les conditions extérieures (humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées).

I.5.1 Propriétés physiques

I.5.1.1 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.

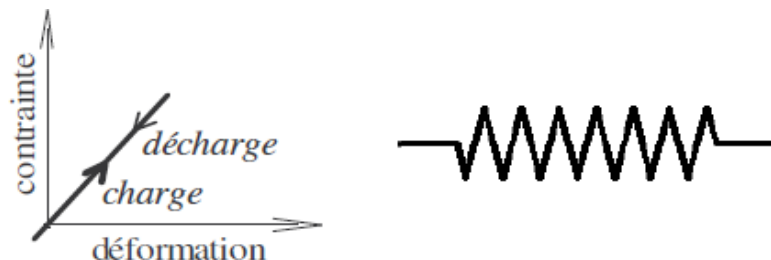


Figure I.7 : Comportement élastique linéaire représenté schématiquement par un ressort

I.5.1.2 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.

I.5.1.3 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.

I.5.1.4 Viscoélasticité

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

I.5.1.5 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.

I.5.2 Propriétés thermiques (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 photos 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.

I.6 Propriétés mécaniques

I.6.1 L'architecture du polymère

Bien sûr la nature et le nombre de co-monomères sont les premiers points à prendre en compte ; En effet, c'est le choix des monomères qui conditionne la souplesse des enchaînements covalents du squelette des chaînes et en partie leur cohésion, par les interactions physico chimiques inter chaînes que les substituants autorisent.

I.6.2 formulation du polymère

Un polymère est toujours formulé, soit pour le stabiliser en cours de mise en œuvre, soit pour faciliter sa transformation, soit pour ajuster ses propriétés finales. Il convient donc d'essayer de connaître au mieux la nature et les taux :

- ✓ D'additifs divers, de plastifiants, de charges, de fibres ;
- ✓ D'éléments de mélanges ; nature des constituants, dispersion des phases ;
- ✓ L'existence d'un agent de couplage entre phases.

I.6.3 La mise en œuvre

Une fois synthétisés, les polymères se présentent sous forme de poudres ou granulés, prêts à être transformés en demi-produits ou en produits fini. Il existe de nombreux procédés de transformation adaptés à la nature du polymère à mettre en œuvre et à la forme finale souhaitée :

- ✓ Extrusion ;
- ✓ Injection ;
- ✓ Extrusion soufflage.

I.6.4 Les conditions d'utilisation

En toute généralité la réponse d'un polymère peut dépendre :

- ✓ Du type de sollicitation : traction, compression ou cisaillement ;
- ✓ De la température qui est un paramètre primordial ;
- ✓ De la vitesse de sollicitation qui est d'importance équivalente à celle de la température ;
- ✓ De la pression (du moins à haute pression).

I.7 Synthèse des polymères

I.7.1 Grands procédés

On distingue deux grandes méthodes de synthèse : la polymérisation en chaîne ou polyaddition et polymérisation par étapes (polycondensation). Les polymères obtenus sont respectivement dénommés polymérisats et polycondensats.

I.7.1.1 Polymérisation par étapes, ou polycondensation

La structure de certains monomères peut présenter ce qu'on appelle en chimie des groupes fonctionnels, c'est-à-dire un atome, ou un groupe d'atomes, dont les propriétés chimiques restent similaires au sein de composés différents, et peuvent réagir ensemble.

Au cours d'une opération de polycondensation, les monomères présentant des groupes fonctionnels réagissent entre eux de manière aléatoire, à l'aide d'un catalyseur chimique (un acide, par exemple) et d'une série d'étapes de condensation, qui se chargent d'éliminer les molécules indésirables, comme celles de l'eau. Les monomères forment alors de petites sections de chaînes qui vont progressivement s'associer, tronçon par tronçon, se transformer en dimères (une molécule ne comportant que deux sous-unités), en trimères, en oligomères, et enfin en polymères artificiels à chaîne longue (ou polymères séquencés). La masse molaire (ou quantité de matière) augmente donc au cours du temps de réaction, et réduit par capillarité la concentration en monomères. Les polycondensats (polymères obtenus par polycondensation) ne représentent aujourd'hui que 10% de la production mondiale de matières plastiques.

I.7.1.2 Polymérisation en chaîne, ou polyaddition

Par additions successives et contrôlées, sur une extrémité de la chaîne macromoléculaire. La nature du monomère situé à cette extrémité détermine également le nom de la réaction. S'il s'agit d'un radical chimique (c'est-à-dire avec un ou plusieurs électrons non reliés sur sa couche externe), la polyaddition est aussi appelée polymérisation radicalaire. A contrario, si cette extrémité est ionique, on parle de polymérisation anionique ou cationique. La polyaddition se divise en trois phases majeures :

- **La phase d'amorçage**, au cours de laquelle un activateur chimique se lie à un monomère, et forme un centre actif qui définit le point de départ de la polymérisation ;
- **La phase de propagation**, qui voit le monomère activé se mettre en relation avec le dernier monomère récupéré en fin de chaîne, et augmenter progressivement la masse du polymère en formation (qui possède ici la même structure que les monomères, puisqu'aucune molécule n'est éliminée durant le processus) ;

- **La phase de terminaison**, durant laquelle un agent chimique permet au polymère de désactiver le monomère situé à l'extrémité de la chaîne moléculaire.

I.7.2 Petits procédés

I.7.2.1 En masse

L'initiateur est ajouté directement dans le monomère. Si le polymère est soluble dans le monomère, la phase reste homogène mais la viscosité augmente (**exemple : le polystyrène**). Le polymère est recueilli puis refroidi et se fige en masse. Si le polymère est insoluble dans le monomère, il y a précipitation des macromolécules (**exemple : le polyméthacrylate de méthyle**).

I.7.2.2 En solution

Le solvant permet la mise en contact l'initiateur et monomère et améliore les échanges thermiques. Ce procédé est utilisé lorsque le produit est utilisable directement dans le solvant (**exemple : les peintures**).

I.7.2.3 En suspension

Le monomère est dispersé sous forme de fines gouttelettes dans un liquide non miscible (ni avec le monomère, ni avec le polymère) par exemple l'eau. L'initiateur est dissous dans le monomère par agitation mécanique. On obtient ainsi des perles de diamètre ~ 1 mm que l'on sépare par centrifugation.

I.7.2.4 En émulsion

Le monomère est dispersé en gouttelettes dans un liquide non miscible comme l'eau, additionné d'un émulsifiant (un savon) qui forme des micelles (agrégats sphériques). Ces micelles peuvent dissoudre un peu de monomère. Il se produit une polymérisation micellaire (**exemple : polyacétate de vinyle peintures**).

I.7.2.5 En lit fluidisé

Un flux gazeux de monomère s'établit de bas en haut d'un réacteur et l'on injecte le catalyseur sous forme de micro grains. Le polymère recouvre progressivement le grain de catalyseur et se trouve en suspension dans le flux gazeux puis est retiré régulièrement : c'est un procédé en continu (**exemple : le polyéthylène**).

I.8 Les avantages et les inconvénients des polymères

I.8.1 Les avantages

Les polymères présentent certaines avantages intéressants tels que :

- ✓ Bon isolation thermique ;
- ✓ Facilité de mise en forme et de moulage ;
- ✓ Excellente tenue à la corrosion ;
- ✓ La légèreté : (plus léger que le verre).

I.8.2 Les inconvénients

Les inconvénients des polymères sont :

- ✓ Sensibilité à la température ;
- ✓ Détérioration facile par l'UV ;
- ✓ Bas module d'élasticité ;
- ✓ Susceptible au feu ;
- ✓ Matière première limitée.

I.9 Polyéthylène

Le polyéthylène est un polymère semi cristallin, il est composé d'une phase cristalline où les chaînes polymères s'agencent les unes par rapport aux autres de façon régulière et d'une phase amorphe où les macromolécules sont en désordre et comme son nom l'indique, le Polyéthylène est issu de la polymérisation de l'éthylène ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$), en une structure complexe de formule générique : $-(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n-$.

Il appartient à la famille des polyoléfines, ces derniers sont uniquement composés de carbone et d'hydrogène ; leur formule chimique est du type $(\text{CH}_2)_n$. 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 :

PEBD (LDPE en anglais) : $0,92 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,94 \text{ g/cm}^3$.

PEHD (HDPE en anglais) : $0,94 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$.

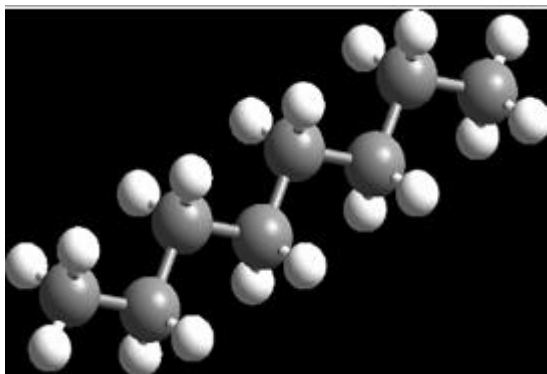


Figure I.8 : schéma de la chaîne du polyéthylène

I.9.1 Propriétés du polyéthylène

Les propriétés du polyéthylène sont fonction du degré de cristallinité déterminé par le degré total de ramification de long de la molécule de polyéthylène.

Selon les modes de polymérisation on distingue deux grandes familles du polyéthylène aux caractéristiques différentes

- ✓ A partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse densité (PEBD).
- ✓ A l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haute densité HDPE (linéaire donc plus compact que le précédent d'où son nom).

I.9.2 Polyéthylène à Haute Densité (PEHD)

En raison de sa structure fortement cristalline, le polyéthylène à haute densité est le type le plus rigide et le moins flexible parmi les différents types de polyéthylène. Le PEHD possède très peu de ramifications. Par conséquent la densité est toujours supérieure à 940 kg/m^3 . Le caractère rigide et quelque peu dur est utile pour une large gamme de traitement.



Figure I.9 : cuve en polyéthylène haute densité

I.9.2.1 Structure moléculaire du PEHD

Conformément à leur distribution de masse moléculaire, il est possible de différencier deux types de PEHD. Le type 1, qui présente une distribution de masse moléculaire étroite et qui est utilisé pour fabriquer, par exemple : les plateaux à fruits, les caisses à clairevoie pour les légumes ou les boissons. Le type 2, qui présente une distribution de masse moléculaire plus large et qui peut être trouvé dans les bouteilles non transparentes, les containers et les tuyaux. Bien que le PEHD soit très rigide, il peut aussi être utilisé pour fabriquer des films très fins.

I.9.2.2 L'utilisation du PEHD

L'utilisation de PEHD est appliquée dans plusieurs domaines, on donne ici des exemples pour quelques applications :

- ✓ **Agriculture** : film, filet de pêche, pipe d'irrigation, cageots ;
- ✓ **Industrie** : cosmétiques, alimentaire (bidons d'huile), produits d'entretien ;
- ✓ **Emballage** : pipe gaz naturel et eaux, pièces techniques et automobiles, conteneurs.

I.9.2.3 Production du PEHD

Tableau I.1 : Production mondiale de PEHD (année 2003)

PAYS	PEHD (tonnes)
Etats-Unis	7976
Europe	4845
Japon	1170
France	505

Le tableau I.1 présente la production de quelques pays de PEHD, en 2003 dans le monde, en milliers de tonnes.

En Algérie, l'usine qui produit ce polymère se trouve dans la wilaya de Skikda : c'est la société POLYMED (Société Méditerranéenne des Polymères) dans la zone industrielle SONATRACH ; produit le PEHD suivant le procédé PHILIPS, d'une densité comprise entre 0,94 et 0,965 g/cm³. Sa production est de 130.000 Tonne/ An, d'où 54% est exportée.

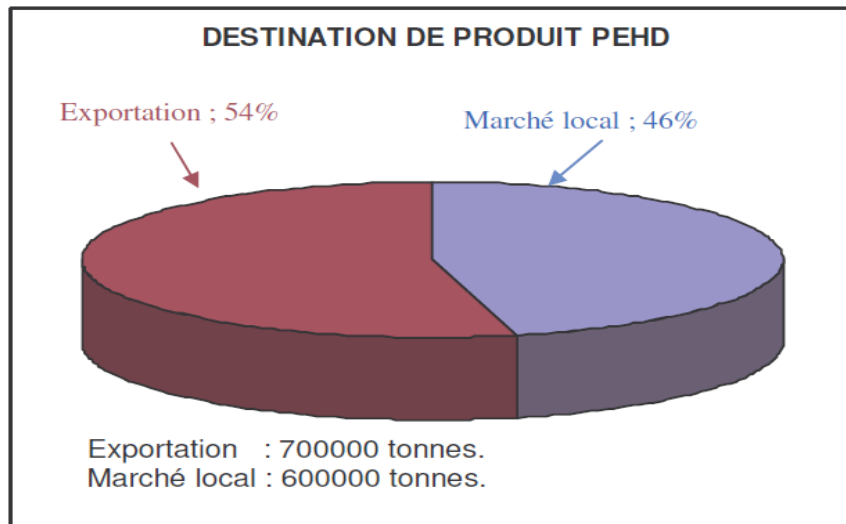


Figure I.10 : Destination de production de polyéthylène à haute densité PEHD (Source POLYMED).

I.9.3 Le polyéthylène a Basse Densité(PEBD)

Le polyéthylène basse densité radicalaire (PEBD), constitué de macromolécules très ramifiées. La masse volumique à l'état solide varie de 915 à 935 kg/m³, ce qui correspond à des taux de cristallinité de l'ordre de 35% et des modules en flexion de l'ordre de 0,4 GPa. Ce matériau a de bonnes propriétés de résistance aux chocs, ce qui en fait un bon candidat pour les applications en emballages. Les procédés utilisés pour la mise en forme sont essentiellement l'extrusion-soufflage et l'extrusion de film à plat (En anglais cast film). L'excellente processibilité du polyéthylène basse densité radicalaire fait que ce produit est toujours largement utilisé.



Figure I.11 : Sac plastique transparent à base du polyéthylène basse densité

I.9.3.1 Propriétés du PEBD

- ✓ Polyéthylène à basse densité PEBD, a été obtenu par un procédé à haute pression reposant sur un catalyseur/initiateur à radicaux libres. C'est un polymère à haut degré de ramification des chaînes ;
- ✓ PEBD est un thermoplastique commercial semi-cristallin, semi-opaque, souple, flexible et dur - même à basses températures - avec des propriétés électriques remarquables mais une faible résistance aux températures. Il a également une très bonne résistance chimique mais a tendance à se rompre sous charge.

I.9.4 Avantages du polyéthylène

- ✓ Plus rigide ;
- ✓ Mise en œuvre aisée ;
- ✓ Résistance aux chocs ;
- ✓ Grande inertie chimique et électrique.

I.9.5 Inconvénients du polyéthylène

- ✓ Moins flexible ;
- ✓ sensibilité aux UV en présence d'oxygène ;
- ✓ sensibilité à la fissure sous contrainte ;
- ✓ mauvaise tenue à la chaleur.

I.10 Nylon

Le mot **nylon** est un terme générique utilisé pour décrire une famille de polyamides synthétiques, thermoplastiques industriels semi-cristallins similaires généralement synthétisés à partir d'aminés et d'acides aliphatiques en chaîne linéaire.

Chaque nylon est décrit par un ou deux numéros, comme nylon 6 ou 6,6 sachant que le numéro correspond au nombre d'atomes de carbone dans les monomères d'acide et d'amine. Si deux numéros apparaissent (comme le cas que nous allons expliquer (nylon6-6)), les monomères sont diamines et diacides et les chaînons amides s'alternent "tête à queue". Le premier chiffre se reporte à la diamine, le second au diacide.

I.10.1 Procédés de synthèses de polyamide 6.6

Actuellement le nylon6.6 est produit à partir d'une solution aqueuse de sel nylon concentrée à 52% en masse. Les principaux procédés sont :

I.10.1.1 Polycondensation du nylon 6.6

La polycondensation peut être conduite en procédé **discontinu** ou **continu**, quel que soit le type de procédé, les quatre étapes majeurs de polymérisation sont les suivantes :

- Concentration de la solution de sel N ;
- Prépolycondensation sous pression ;
- Décompression ;
- Finition.

A. Procédé discontinu

La polymérisation discontinue du sel nylon 6,6 s'effectue à l'aide de deux appareils en série :

Un évaporateur pour la phase de concentration du sel nylon et un autoclave pour les trois autres phases de la polycondensation. Traditionnellement l'évaporateur est un réacteur vertical chauffé par un serpentin intérieur ou une double enveloppe. L'autoclave est également un réacteur vertical muni d'une double enveloppe et d'un serpentin intérieur pour fournir l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau, il peut être agité ou non.

Le polymère est extrudé en sortie de l'autoclave, à travers une filière sous pression d'azote, à une température de 275° environ, puis il est granulé. Un des points négatifs du procédé de polycondensation en discontinu est le temps de décharge de l'autoclave. En effet, le polymère restant à l'intérieur du réacteur est maintenu à la température de finition et peut donc continuer à réagir.

B. Procédé continu

Le principe général du procédé continu consiste à réaliser chaque étape de la polycondensation dans un appareil différent. Les équipements utilisés dans le continu doivent pouvoir fonctionner pendant de longue période sans arrêt pour être économiquement rentables. De plus, ils doivent, de par leurs conceptions, éviter de dégager le polyamide à cause d'un temps de séjour trop important, à haute température.

I.10.2 Domaine d'application

Presque 75% des polyamides sont utilisés comme fibres et environ 15% sont utilisés comme thermoplastiques techniques dans les différents secteurs industriels.

- **Automobile** : raccords et canalisations d'essence, conduites de freinage pneumatique...
- **Electricité et électronique** : connecteurs, prises, câbles de couvertures chauffantes- Industries pétrolières et gazières : flexibles de collecte off-shore, canalisations et raccords pour distributions de gaz.

I.10.3 Propriétés du Nylon 6.6

Les propriétés du Nylon-6,6 en font une matrice de choix pour le domaine d'application par :

- ✓ Sa bonne stabilité dimensionnelle ;
- ✓ Sa résistance aux solvants organiques ;
- ✓ Ses propriétés mécaniques excellentes sur une large gamme de température ;
- ✓ Son faible coût à l'achat.

I.11 Procèdes de mise en forme des polymères

I.11.1 Principes de fonctionnement des extrudeuses

L'extrusion est actuellement un procédé de mise en forme très utilisé dans le secteur de la mécanique. Ce procédé consiste à faire passer de manière continue un polymère fondu à travers une filière pour obtenir une forme donnée de section constante. On obtient ainsi un grand nombre de produits finis ou semi-finis, (films, plaques, feuilles, tubes, câbles, profilés)

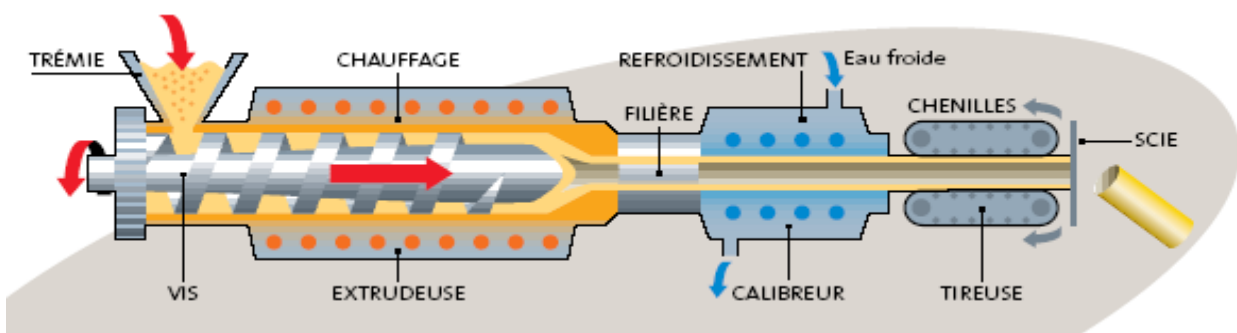


Figure I.12 : Principe de fonctionnement d'une extruseuse

Dans l'extrudeuse (Fig. I.12) matière est ajoutée dans la trémie sous forme de poudre ou de granules. La trémie alimente en continu la vis sans fin, qui assure à la fois le chauffage, le malaxage, la mise en pression et le dosage du polymère, qui est refoulé

sous pression dans la tête d'extrusion. La tête contient une filière qui donne la forme de la pièce, puis la pièce plastique est ensuite refroidie à l'eau ou à l'air, pour prendre sa forme finale. Les dispositifs de tirage entraînent le polymère qui se refroidit, soit pour l'enrouler en bobine, soit pour permettre de le couper à la longueur, du point de vue du transformateur, l'extrusion arrive largement en tête devant l'injection et les autres procédés avec 7,9 millions de tonnes de matières consommées (Europe occidentale, chiffres 2002). Encore faut-il préciser que, dans la plupart des autres procédés (injection, calandrage...), la phase de fusion des granulés et de mise en pression est très souvent assurée par un système vis-fourreau.

I.11.2 Domaines d'applications

L'adaptation d'un équipement adéquat au matériel d'extrusion permet d'obtenir une large gamme de produits fabriqués à l'aide de cette machine. Par exemple, on utilise l'extrudeuse comme élément de base pour :

- ✓ la production des profilés, pleins ou tubulaires, rigides ou souples ;
- ✓ la fabrication de plaques ou de feuilles en continu ;
- ✓ le revêtement de fils, de câbles et de profilés, par exemple en métal.

I.11.3 Description de l'extrudeuse monovis

I.11.3.1 Fonctionnement

L'extrudeuse monovis est de loin la machine la plus répandue dans l'industrie de transformation des thermoplastiques. La figure (I.13) explique le principe de fonctionnement de ce type de machine. La matière brute, sous forme de poudre ou de granulés, est introduite à l'extrémité d'une vis d'Archimède qui tourne dans un cylindre régulé en température.

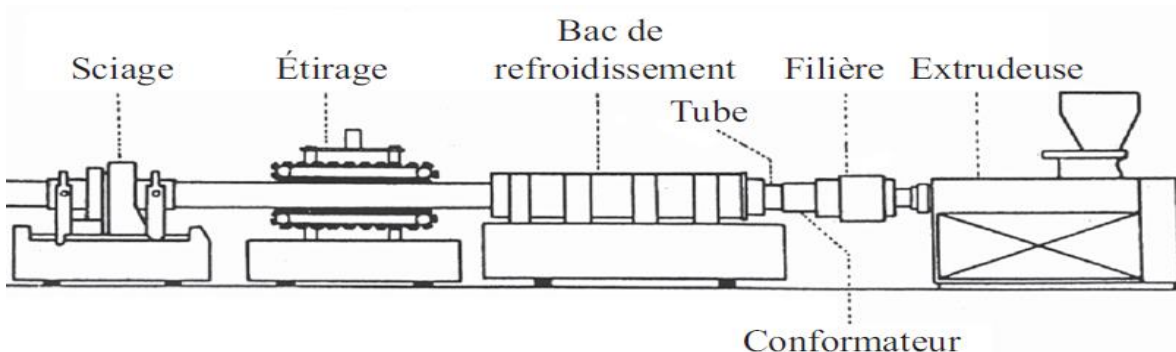


Figure I.13 : Schéma d'une ligne d'extrusion de tubes

Le déplacement de la matière résulte de l'action des filets de la vis sur la matière qui frotte ou adhère à la paroi interne du cylindre. Si la matière colle à la vis, l'effet d'extrusion est nul, au contraire, l'adhérence de la matière au cylindre augmente le processus d'écoulement. Le coefficient de frottement varie avec la température et la matière extrudée, ce qui impose le chauffage du cylindre de la machine. En réalité, l'écoulement de la matière dans le canal de la vis pendant la rotation de l'extrudeuse résulte de l'action de quelques forces composantes.

I.12.3.2 Principaux éléments de l'extrudeuse monovis :

Une extrudeuse est essentiellement constituée d'un **fourreau** cylindrique en acier de haute résistance dans lequel vient tourner une vis entraînée en rotation par un moto-variateur. Cet ensemble **vis fourreau** est thermo-régulé par un ensemble de résistances électriques ou par circulation de fluide. La matière est introduite dans la trémie qui s'ouvre sur le fourreau à l'entrée de la vis et celle-ci la pousse de façon continue jusqu'à **la filière**.

- ✓ vis-cylindre avec leur équipement ;
- ✓ groupe moteur ;
- ✓ tête d'extrusion porte filière ;
- ✓ châssis ;
- ✓ centrale de commande et de contrôle.

➤ Vis (géométrie, construction) :

Elle représente l'élément principal de l'extrudeuse et caractérise les possibilités de la machine. La vis, qui tourne à l'intérieur d'un cylindre chauffé, est entraînée par un moteur électrique. Son centrage est assuré par le cylindre.

➤ Tête d'extrusion-porte filière :

La tête présente un élément monté au bout du cylindre de l'extrudeuse, en aval de la vis. Son rôle est de laisser passer la matière plastifiée par la filière qui lui donne la forme de la section voulue.

Plusieurs filières différentes peuvent être montées dans la même tête à condition que leurs gabarits correspondent aux dimensions de cette dernière et que l'ensemble réponde au diamètre de la vis.

❖ Types de têtes

On distingue quatre types de têtes :

- ✓ la tête d'extrusion droite pour la fabrication des profilés et des tubes ;
- ✓ la tête d'équerre verticale pour l'extrusion-gonflage ;
- ✓ la tête d'équerre horizontale ou oblique pour le recouvrement de câbles et de profilés
- ✓ les têtes spéciales pour l'extrusion de feuilles et de plaques (têtes plates).

➤ **La filière**

Une filière d'extrusion est un outillage qui permet de donner de forme au produit extrudé, elle se situe en fin de l'extrudeuse et Le rôle principal qu'elle doit assurer d'extrusion est de fournir à la sortie de l'outillage un produit aux dimensions requise, uniforme en température Ainsi, la forme du produit désiré en sortie de filière va dépendre de la conception géométrique de l'outillage. On peut classer les filières de la façon suivante.

❖ **Géométries de filières**

Les filières plates sont utilisées pour fabriquer des feuilles et des plaques d'épaisseur comprise entre 0,2 et 25 mm, sur des largeurs allant de quelques centimètres à plusieurs mètres. IL existe plusieurs types de géométries :

- ✓ filière en T (T-die, en anglais) ;
- ✓ filière « queue de carpe » (fishtail die, en anglais) ;
- ✓ filière porte-manteau (coathanger die, en anglais).

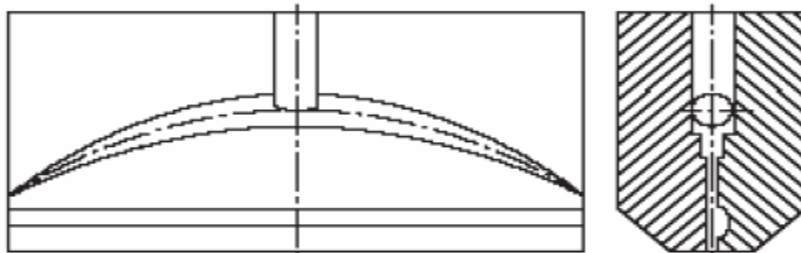


Figure I.14 : Filière porte manteau

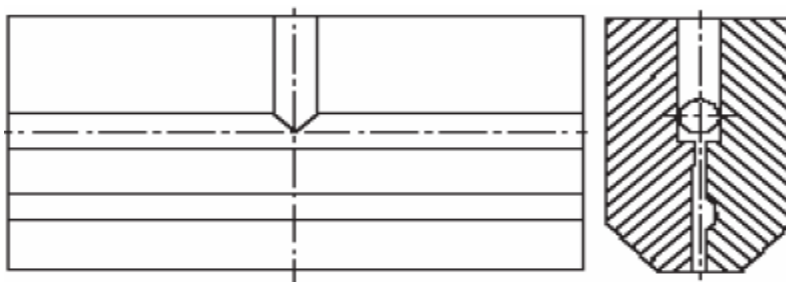


Figure I.15 : Filière en T

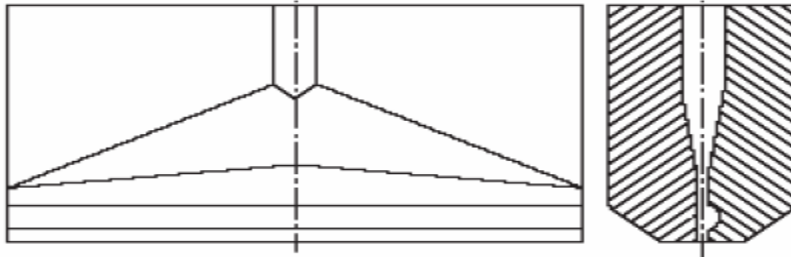


Figure I. 16 : Filière queue de carpe

- **Filières cylindriques**

Il existe plusieurs types de géométries. Elles sont destinées à la fabrication d'un grand nombre de produits (Fig. I.17), comme les films de faible épaisseur, les tubes à différents usages (médical, transport de gaz et d'eau),...etc.

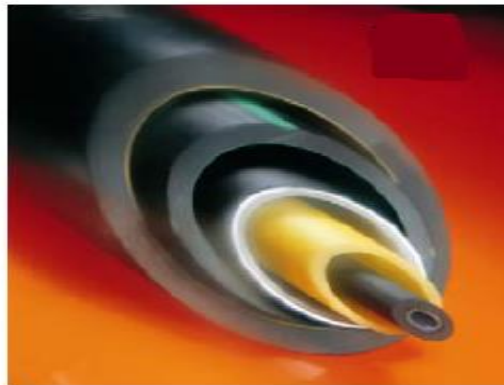


Figure I. 17 : Produit réalisé par filière d'extrusion cylindrique

Il existe plusieurs types de géométries. Les plus importantes sont connues sous le nom de :

- **Filière mandrin** et noyau ou filière à ailettes (tubes) :

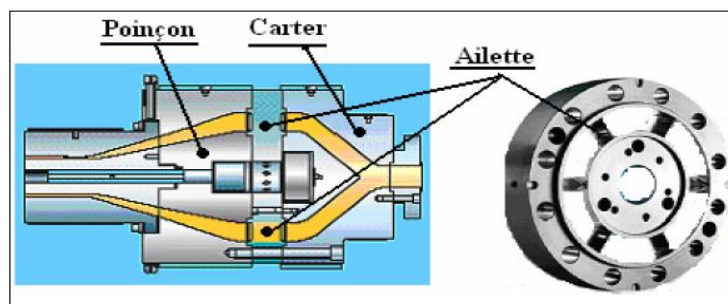


Figure I. 18 : Filière à ailette (mandrin et noyau)

- **Filière hélicoïdale** (tubes, câblerie, films)



Figure I.19 : Filière hélicoïdale

- **Filière type porte manteau** (tubes, câblerie)

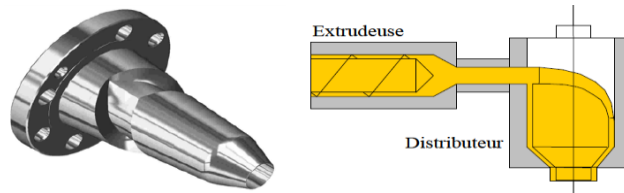


Figure I.20 : type porte manteau

- **Filière de profilés**

Elles sont destinées à la fabrication des pièces de forme généralement complexe.

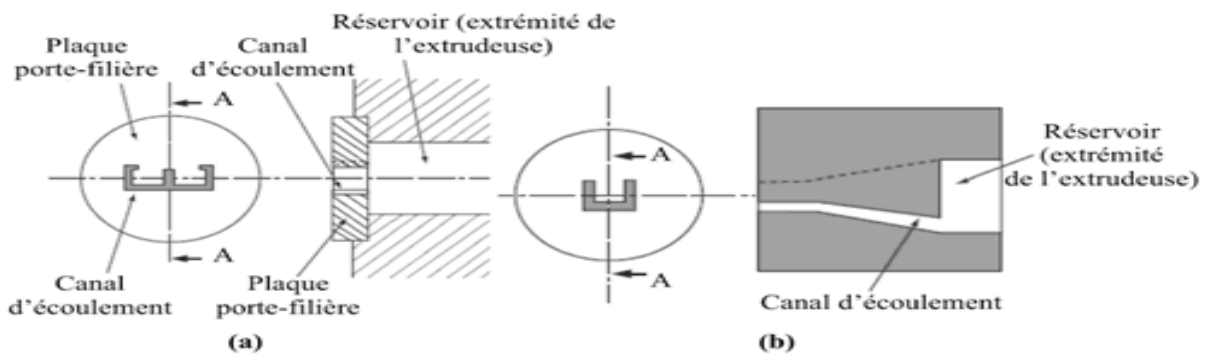


Figure I.21 : Schémas de filières de profilés a-filière plaque/ b-filière progressive

I.11.4 Défauts d'extrusion

Les défauts d'extrusion sont généralement observés en sortie de filière, lorsque des conditions critiques ont été dépassé dans de l'écoulement. Les principaux défauts rencontrés sont présentés dans la figure suivante :

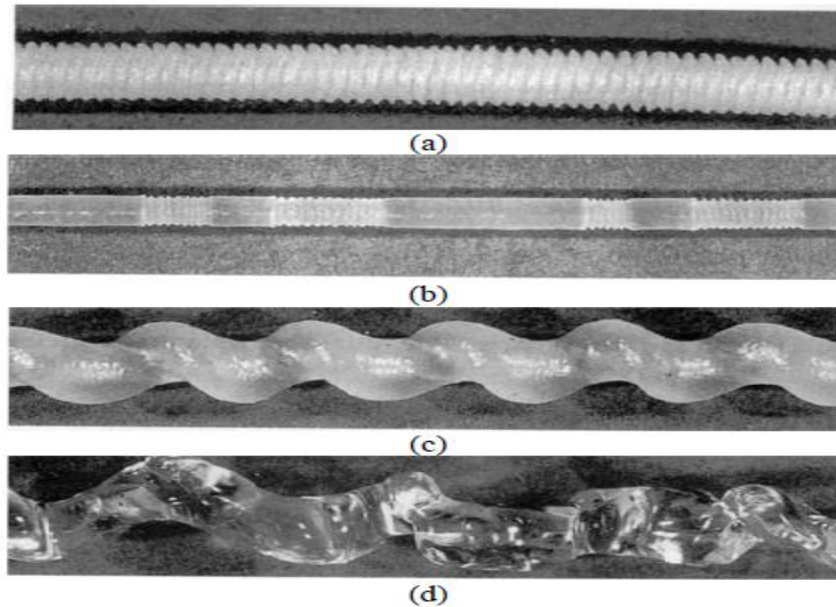


Figure I.22 : différents types de défauts d'extrusion a)-peau de requin/b)-défaut bouchon/c)-défaut hélicoïdale /d)-défaut couchitique

I.11.4.1 Défaut de peau de requin

Il s'agit de la première manifestation généralement rencontrée lors de l'extrusion de polymères fondus de type linéaire, il se présente sous la forme d'un défaut de surface.

Le défaut de « peau de requin » est l'instabilité la plus gênante d'un point de vue industriel puisqu'elle concerne toute la « famille » des polymères linéaires et ceci pour des débits d'écoulements faibles. Il s'agit de fissures caractéristiques, perpendiculaires à l'écoulement, périodiques et en général de faible amplitude, parfois en filet de vis.

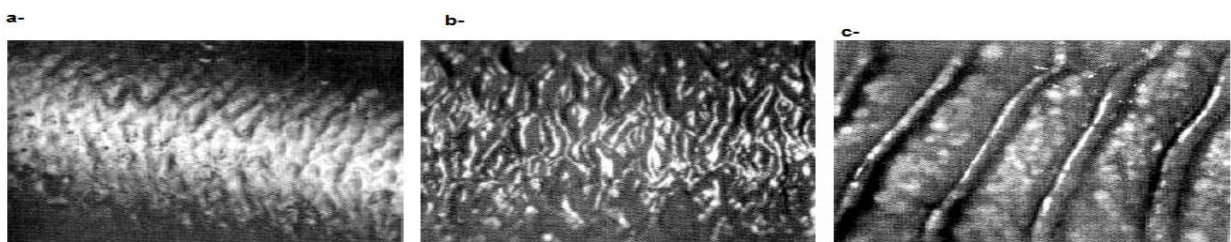


Figure I.23 : Evolution de la surface d'un jonc extrudé à différents taux de cisaillement apparent, pour un PEBDL à 205 °C : a) $137s^{-1}$, b) $320s^{-1}$, c) $572s^{-1}$.

Lorsque le défaut est bien établi, il se présente sous la forme des vagues axisymétrique de période et d'amplitude très régulières.

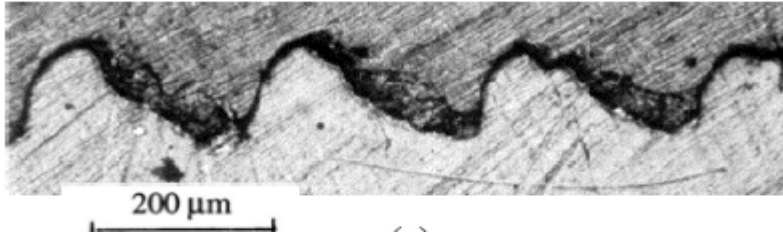


Figure I.24 : section transversale de l'extrudât

La sortie de la filière est donc la zone où se développe le défaut de peau de requin, il est aujourd'hui couramment admis que ce défaut résulte de l'état des contraintes et des vitesses à la sortie de l'écoulement, ce défaut peut être créé suivant deux mécanismes possibles qui sont encore en discussion aujourd'hui :

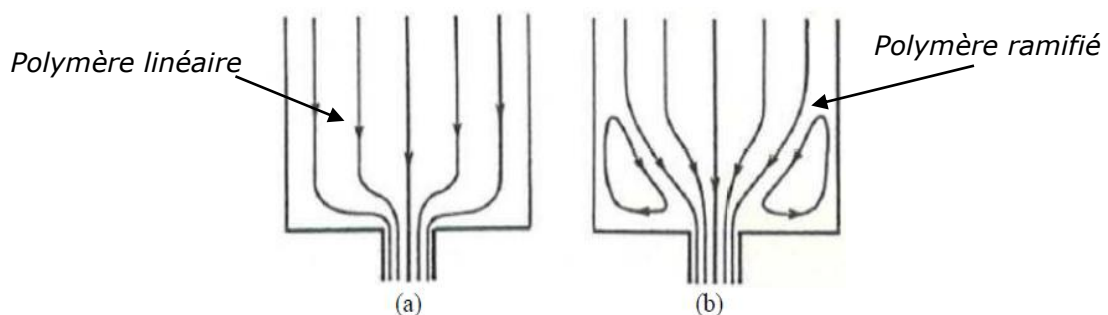
- Une suite de glissement/adhésion à la paroi (juste avant la sortie de la filière).
- Une rupture de l'extrudât sous l'effet des contraintes élongationnelles subit juste après la sortie de la filière. En effet, la vitesse passe d'un profil parabolique.

I.11.4.2 Défaut oscillant

Le défaut bouchon, ou défaut d'oscillant, se présente comme une succession régulière de zone de morphologie différentes, généralement une zone "peau de requin" et de zones lisse : Des instabilités hélicoïdales peuvent aussi affecter le volume de l'extrudât, de façon organisée et enfin, le défaut chaotique présente des irrégularités aléatoires dans le volume de l'extrudât.

I.11.4.3 Défauts d'entrée (défauts volumiques)

Les défauts volumiques peuvent être le résultat d'un établissement de l'écoulement amont. En effet, une des différences fondamentales entre les polymères linéaires et ramifiés est que ces derniers, en raison de leur comportement élongationnel spécifique (rhéodurcissement) donnent naissance à des recirculations très marquées à



l'entrées d'un convergent brusque.

Figure I.25 : Ecoulement à l'entrée d'un convergent :

I.12 Injection

Le procédé d'injection permet la fabrication en série des pièces de formes complexes. La presse à injecter comprend une unité de plastification/injection et une unité de fermeture, dans lequel est fixé le moule (figure I.26).

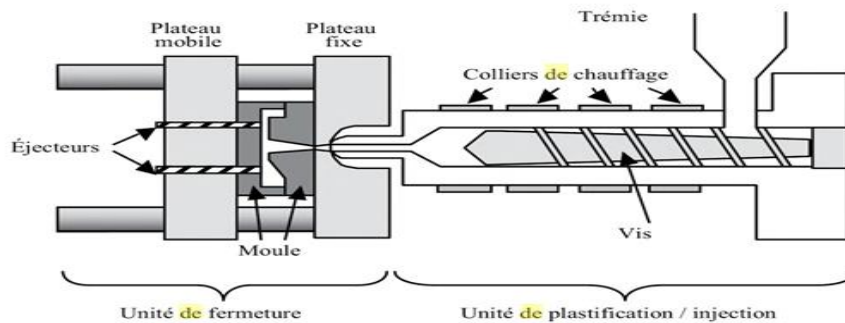


Figure I. 26 : Différentes phases d'un cycle d'injection

Un procédé d'injection peut comprendre les étapes suivantes :

- ✓ Le polymère est fondu dans un dispositif vis-fourreau semblable à celui de l'extrudeuse monovis, mais dans lequel la vis possède une possibilité de mouvement supplémentaire ;
- ✓ Dans un premier temps, la buse à l'extrémité du fourreau étant obturée, la vis tourne en reculant et le polymère fondu s'accumule en tête de vis ;
- ✓ Une fois que la quantité de polymère nécessaire à la fabrication de la pièce a été fondue, la buse s'ouvre et la vis se transforme en piston qui injecte à grande vitesse le polymère chaud dans un moule fermé et froid : c'est la phase de remplissage ;
- ✓ Le refroidissement du polymère est lent du fait de sa faible conductivité thermique. Il est donc possible de compenser en partie la variation de volume spécifique du polymère en continuant à injecter du polymère liquide sous forte pression : c'est la phase de compactage ;
- ✓ Une fois que le canal reliant la buse de la presse à injecter au moule est solidifié, il n'y a plus de compactage possible. La pièce continue à se refroidir dans le moule puis, après éjection, à l'extérieur du moule.

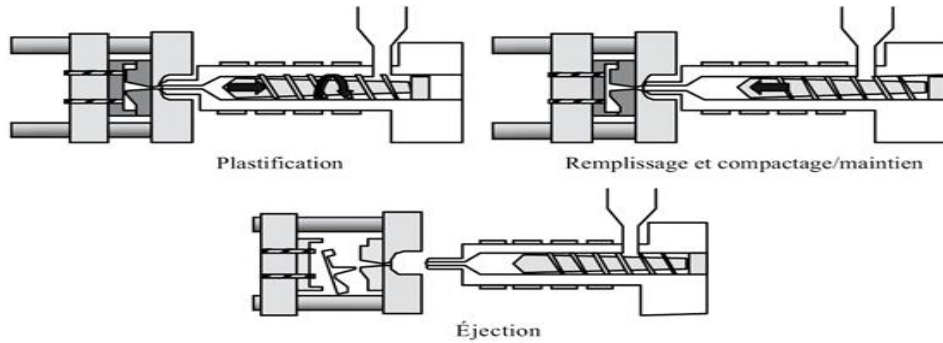


Figure I.27 : différentes phases du cycle d'injection

I.13 Conclusion

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré aux généralités et définitions, liées principalement aux polymères et les méthodes de leurs productions. Nous avons choisi brièvement les procédés de mise en forme notamment l'extrusion, qui occupe une place importante dans l'industrie de mise en forme. Des définitions liées aux polymères, permettant la compréhension de ces matériaux, très utiles dans la vie quotidienne, ont été aussi présentés.

Chapitre II

Formulations mathématiques

Résumé

Dans ce chapitre nous discuterons la méthode des tubes de courant. Méthode permettant la transformation du domaine réel d'étude à un domaine transformé de géométrie plus simple. Les lignes de courant dans le domaine transformé sont des droites parallèles à la direction de l'écoulement. D'autre part nous examinerons courtement quelques lois de comportement des fluides à comportement newtonien et non newtonien visqueux purs, dont le comportement de fluide de Carreau sera utilisé dans nos simulations.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons la présentation mathématique des équations gouvernant l'écoulement stationnaire isotherme de polymère (newtonien et non newtonien visqueux pur), avec prise en compte de glissement, à travers de filières plates 2D et axisymétriques à convergent. Un tel écoulement est très connu dans le domaine de mise en forme des polymères, notamment l'extrusion. Vu la complexité du domaine d'étude nous avons utilisé la méthode des tubes de courant 'MTC', méthode permettant la transformation de la géométrie du domaine physique, généralement complexe, vers une géométrie plus simple, où la solution sera déterminé.

II.2 Méthode des tubes de courant (MTC)

II.2.1 Définitions :(lignes de courant, tubes de courant

Dans le cas général la représentation graphique des écoulements se fait souvent à l'aide des lignes de courant. Les lignes de courant sont tangentes en tous points au champ de vitesse. Si u , v , w sont les trois composantes de vitesse en coordonnées cartésiennes, l'équation différentielle de toute ligne de courant s'écrit :

$$\frac{dx}{u(x,y,z,t)} = \frac{dy}{v(x,y,z,t)} = \frac{dz}{w(x,y,z,t)} \quad (\text{II.1})$$

Un tube de courant est la surface engendrée par les lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée C dont aucun tronçon ne coïncide avec une ligne de courant.

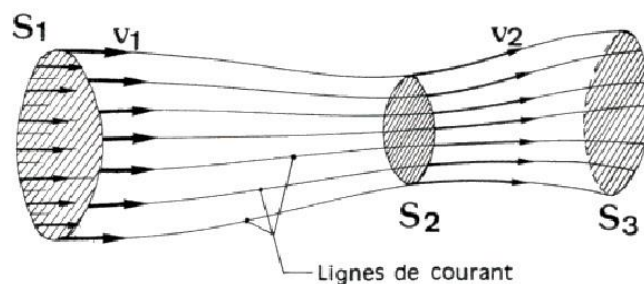


Figure II.1 : Schéma d'un tube de courant

II.2.2 Ecoulements bidimensionnels

La méthode des tubes de courant est bien adaptée à la simulation numérique des écoulements de fluides visqueux purs, notamment les fluides décrits par des lois de comportement représentatives des polymères fondus ou en solutions. L'hypothèse

fondamentale est de poser comme inconnue l'existence d'une fonction de transformation k (pour le cas plan) ou f (pour le cas axisymétrique), qui fait passer le domaine physique Ω à un domaine transformé Ω^* de géométrie simple où les lignes de courant sont rectilignes et parallèles.

II.2.3 Transformation du domaine en MTC

Les fonctions de transformation permettent de transformer le domaine physique Ω , qui représente le domaine réel d'étude, à un domaine plus simple nommé le domaine transformé Ω^* , tel que les images des ligne de courant soient des droites parallèles a une direction moyenne de l'écoulement(direction OZ), avec des variables (x, z) pour le cas plan et (r, z) pour le cas axisymétrique, comme on l'avait dit précédemment que les deux fonctions de transformation utilisés sont k pour (le cas plan) et f pour (le cas axisymétrique) :

$$\begin{cases} x = k(X, Z) \\ z = Z \end{cases} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{cases} r = f(R, Z) \\ z = Z \end{cases} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.3})$$

La forme de la section de ce dernier est semblable a celui du cas plan, et les domaines Ω et Ω^* sont limités respectivement par les sections amont et aval ' z_p, Z_p ' et ' z_2, Z_2 '

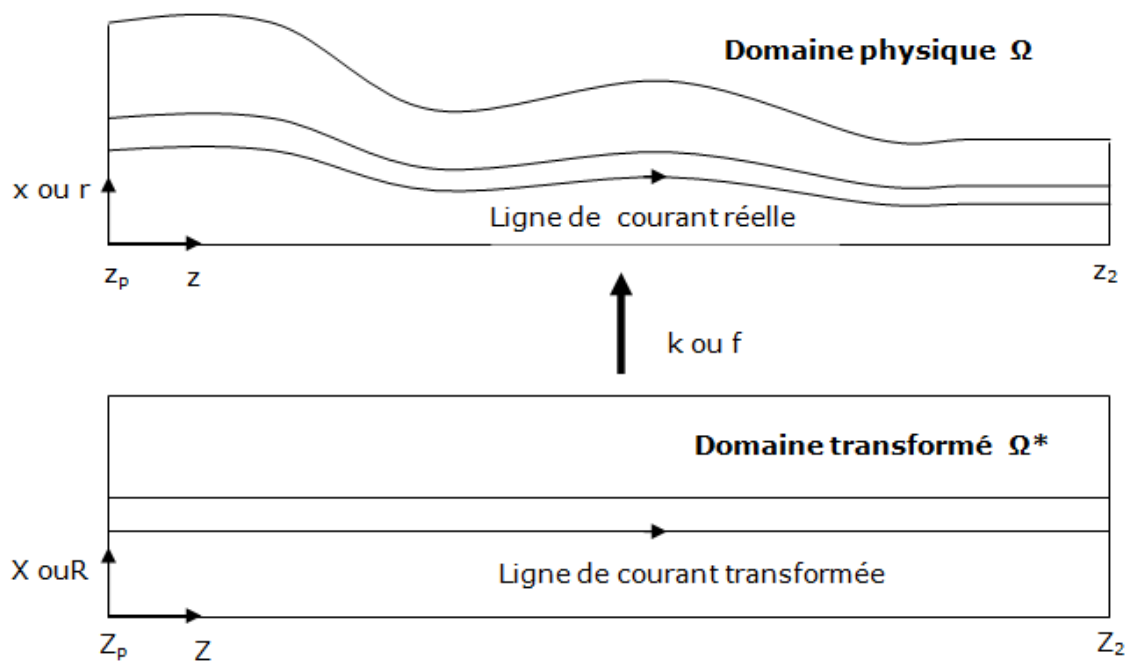


Figure II.2 : Transformation dans le Ω^* de lignes de courant du domaine Ω

Le but de cette méthode est de simplifier l'étude de l'écoulement des fluides qui sont généralement difficiles grâce à la géométrie du domaine réel.

Respectivement dans les cas plan et axisymétrique, les expressions k'_x et f'_R désignent le jacobien Δ de la transformation $T : \Omega^* \rightarrow \Omega$, donné par :

$$\Delta = \left| \frac{\partial(x, z)}{\partial(X, Z)} \right| \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.4})$$

$$\Delta = \left| \frac{\partial(r, z)}{\partial(R, Z)} \right| \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.5})$$

Qui doit être non nul partout pour qu'existe la transformation. Les calculs effectués précédemment en MTC ont confirmé, par des comparaisons avec des résultats issus de formulation classiques (prenant un exemple avec le logiciel Polyflow) ou d'étude de la littérature que les configurations d'écoulements conduisant à une divergence de l'algorithme de résolution MTC correspondaient justement à l'apparition d'écoulements secondaires.

II.3 Opérateurs cinématiques

Les opérateurs de dérivation s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial X} = \frac{1}{k'_x} \frac{\partial}{\partial X} \\ \frac{\partial}{\partial Z} = -\frac{k'_z}{k'_x} \frac{\partial}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Z} \end{cases} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{f'_R} \frac{\partial}{\partial R} \\ \frac{\partial}{\partial z} = -\frac{f'_z}{f'_R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{\partial}{\partial Z} \end{cases} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\begin{cases} k'_x = \frac{\partial k}{\partial X} \\ k'_z = \frac{\partial k}{\partial Z} \end{cases} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{cases} f'_R = \frac{\partial f}{\partial R} \\ f'_z = \frac{\partial f}{\partial Z} \end{cases} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.9})$$

A partir de l'hypothèse d'une composante de vitesse w_p connue à la section amont Z_p (par exemple écoulement de poiseuille), on obtient les relations des composantes de vitesses exprimées en fonction de w_p et de la fonction de transformation respectivement pour les deux cas plans et axisymétriques :

Avec :

$$\begin{cases} w = \frac{1}{k'_x} w_p \text{ avec } k'_x \neq 0 \\ u = k'_z w \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{cases} W = \frac{R}{ff'_R} W_p & \text{pour } f \neq 0 \\ W = \frac{1}{(f'_R)^2} W_p & \text{pour } f = 0 \\ u = f'_z W \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

A partir des relations (II.7) et (II.8), on peut facilement montrer que l'équation de conservation de la masse est vérifiée automatiquement par la formulation.

II.4 Formulation du problème à la sortie de filières bidimensionnelles par la méthode des tubes de courant

Dans le cas bidimensionnel et dans le repère orthonormé (o, x, z) (cas plan), ou (o, r, z) (cas axisymétrique) on peut simplifier l'étude du problème physique sur la base des hypothèses suivantes :

1. Ecoulement permanent bidimensionnel ;
2. Ecoulement non isotherme ;
3. Fluide incompressible : newtonien et non newtonien visqueux pur.

II.4.1 lois de conservation

II.4.1.1 Domaine réel Ω

A la sortie d'une filière les hypothèses précédentes peuvent nous conduire à écrire le système d'équations qui gouvernent l'écoulement d'un fluide non newtonien comme suit :

A Conservation de la masse

Pour un fluide de masse volumique ρ , la conservation de la masse pour un écoulement stationnaire est donnée par :

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (\text{II.12})$$

Avec :

\mathbf{V} : Vecteur de vitesse ;

∇ : L'operateur divergence.

Aussi pour les fluides incompressibles l'équation se réduit par l'écriture suivante :

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (\text{II.13})$$

Dans le cas plan la projection de l'équation (II.12) dans le repère cartésien donne :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.14})$$

Pour un repère cylindrique, la projection de l'équation (II.13) s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.15})$$

B Conservation des quantités de mouvement

L'équation de quantité de mouvement peut être écrit par :

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (\text{II.16})$$

et

$$\boldsymbol{\sigma} = -\rho \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$\boldsymbol{\sigma}$: Tenseur de la contrainte totale

ρ : Masse volumique

$\boldsymbol{\tau}$: Tenseur des contraintes

\mathbf{I} : La matrice identité

Par projection de (II.12) sur le plan (o, x, z), on obtient :

$$\begin{cases} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & \tau_{zz} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

De même manière, la projection de l'équation (II.12) sur le plan (o, r, z) donne :

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}}{r} \quad (\text{II.20})$$

II.4.1.2 Domaine transformé Ω^*

A Conservation de la masse :

D'après les équations (II.3) et (II.4) on peut confirmer que l'équation de conservation de masse est toujours vérifiée par la Méthode des Tubes de Courant (MTC).

B Conservation des quantités de mouvement

Dans le domaine transformé la MTC nous permet de mettre les équations des quantités de mouvement comme suit :

B.1 Cas plan

$$\begin{cases} \rho k'_x w \frac{\partial u}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial X} + k'_x \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial Z} - k'_z \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial X} \\ \rho k'_x w \frac{\partial w}{\partial Z} = k'_z \frac{\partial P}{\partial X} - k'_x \frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial X} + k'_z \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial Z} - k'_z \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial X} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

B.2 Cas axisymétrique

$$\begin{cases} \rho f'_R w \frac{\partial u}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial R} + \frac{f'_R}{f} (\tau_{rr} - \tau_{\theta\theta}) + f'_R \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial Z} - f'_z \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial R} \\ \rho f'_R w \frac{\partial w}{\partial Z} = f'_z \frac{\partial p}{\partial R} - f'_R \frac{\partial p}{\partial Z} + f'_z \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial R} + \frac{f'_R}{f} \tau_{rz} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial R} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

II.5 Contraintes et déformations dans un fluide

II.5.1 Tenseur des contraintes

Dans un fluide en mouvement il apparait en plus de la contrainte normale (pression hydrostatique) et des contraintes tangentielles, le tenseur des contraintes fait apparaitre d'autres types de contraintes engendrées par les forces de compression et d'élongation. C'est-à-dire non seulement les contraintes tangentielles à l'origine des cisaillements mais également les contraintes à l'origine des compressions et des élongations du fluide, reflétant l'interaction entre les couches du fluide glissant les unes par rapport aux autres.

Le tenseur des contraintes peut se décomposer sous la forme :

$$\sigma = \tau - p\delta \quad (\text{II.23})$$

Où

τ : tenseur des contraintes visqueux

p : Pression hydrostatique

δ : Le tenseur de Kronecker

II.5.1.1 Tenseur des contraintes visqueux τ

Dans le domaine physique Ω les composantes du tenseur des contraintes visqueuses sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial X} \\ \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial Z} = -\tau_{xx} \\ \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial Z} + \frac{\partial w}{\partial X} \right) \end{array} \right. \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.24})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} \\ \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{rz} = 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{u}{r} \end{array} \right. \quad \text{cas axisymétrique} \quad (\text{II.25})$$

Les composantes du tenseur des contraintes visqueux dans le domaine transformé deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xx} = \frac{2\mu}{k'_x} \frac{\partial u}{\partial X} \\ \tau_{zz} = 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial Z} - \frac{k'_z}{k'_x} \frac{\partial w}{\partial X} \right) = -\tau_{xx} \\ \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial Z} - \frac{k'_z}{k'_x} \frac{\partial u}{\partial X} + \frac{1}{k'_x} \frac{\partial w}{\partial X} \right) \end{array} \right. \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.26})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{rr} = 2\mu \frac{1}{f'_R} \frac{\partial u}{\partial R} \\ \tau_{zz} = 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial R} - \frac{f'_Z}{f'_R} \frac{\partial w}{\partial R} \right) \\ \tau_{rz} = \mu \left(\frac{1}{f'_R} \frac{\partial w}{\partial R} + \frac{\partial u}{\partial Z} - \frac{f'_Z}{f'_R} \frac{\partial u}{\partial R} \right) \\ \tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{u}{R} \end{array} \right. \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.27})$$

II.5.1.2 Tenseur des taux de déformation \mathbf{D}

Le tenseur des taux de déformation interprète la variation spatiale du champ de vitesse. Ce tenseur peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \quad (\text{II.28})$$

Avec :

\mathbf{D} : Tenseurs des déformations.

$\nabla \mathbf{V}^T$: Tenseur gradient de vitesse.

μ : Viscosité dynamique du fluide.

Noter bien que :

$$\nabla \mathbf{V}^T = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & 0 & \frac{\partial u}{\partial z} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x} & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad ((i = 1, 3), j = 1, 3) \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.29})$$

$$\nabla \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_r}{\partial r} & 0 & \frac{\partial u_r}{\partial z} \\ 0 & \frac{u_r}{r} & 0 \\ \frac{\partial u_z}{\partial r} & 0 & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.30})$$

Dans le domaine réel les composantes du tenseur des taux des déformations peuvent donner par :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.31})$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ 0 & \frac{u}{r} & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.32})$$

Les différents éléments de ces matrices doivent être exprimés en termes de la fonction de transformation et de ses dérivées. Tenant compte des relations (II.6) et (II.7), on obtient ainsi les formes analytiques suivantes, qui font intervenir la composante de la vitesse connue à l'amont, ainsi que ses dérivées :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{w_p' x}{k'_x} - \frac{k''_{xx} w_p}{(k'_x)^2} \\ \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{k''_{xz} w_p}{(k'_x)^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} = k'_z \frac{\partial w}{\partial x} + k''_{xz} w \\ \frac{\partial u}{\partial z} = k'_z \frac{\partial w}{\partial z} + k''_{zz} w \end{array} \right. \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.33})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial w}{\partial R} = \frac{R w_p' R + w_p}{f f'_R} - \frac{R \left((f'_R)^2 + f f''_{RR} \right) w_p}{(f f'_R)^2} \\ \frac{\partial w}{\partial Z} = -\frac{R (f'_R f'_Z + f f''_{RZ}) w_p}{(f f'_R)^2} \\ \frac{\partial u}{\partial R} = f'_z \frac{\partial w}{\partial R} + f''_{RZ} w \\ \frac{\partial u}{\partial Z} = f'_z \frac{\partial w}{\partial Z} + f''_{zz} w \end{array} \right. \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.34})$$

II.6 Conditions aux limites

Pour résoudre le problème de gonflement en sortie de filière on distingue deux types de conditions aux limites, le premier type c'est les conditions aux limites naturelles (doivent vérifiées par la solution finale) et le deuxième sont les conditions aux limites Essentielles (considérés comme hypothèses de calcul).

II.6.1 Conditions aux limites essentielles

Pour avoir des bons résultats, plus exacte on doit imposer des conditions tout d'abord au début du problème tel que les conditions aux limites essentielles qui vont nous expliquer la nature physique de notre problème.

II.6.1.1 Partie amont

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial k(X, 0)}{\partial Z} = 0 \\ w(X, 0) = w_{\text{poiseuille}}(X) \end{array} \right. \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.35})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial f(R, 0)}{\partial Z} = 0 \\ w(R, 0) = w_{\text{poiseuille}}(R) \end{array} \right. \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.36})$$

II.6.1.2 Axe de symétrie

Sur l'axe de symétrie, on a la condition aux limites suivantes :

$$k(0, Z) = 0 \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.37})$$

$$f(0, Z) = 0 \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.38})$$

II.6.1.3 Paroi de la conduite

La présence de la singularité cinématique à la paroi ce traduit mathématiquement par :

$$k_{\text{paroi}} = k(X_0, Z), \text{ avec : } Z \leq L_{\text{Filière}} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.39})$$

$$f_{paroi} = f(R_0, Z), \text{ avec : } Z \leq L_{Filière} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.40})$$

II.6.1.4 Partie aval

L'écoulement à l'aval de la conduite axisymétrique est supposé établi, et des conditions aux limites de type Neumann sont imposées, afin d'éviter les possibles oscillations qui viennent du mauvais choix de la longueur de la partie aval de la conduite

$$L_{Conduite} = Z_1 = L_{Filière} + L_{Gonflement}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial k(X, Z_1)}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial w(X, Z_1)}{\partial Z} = 0 \end{cases} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.41})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial f(R, Z_1)}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial w(R, Z_1)}{\partial Z} = 0 \end{cases} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.42})$$

II.6.2 Conditions aux limites naturelles

Au cours de la résolution du phénomène, l'algorithme de Newton-Raphson cherche la solution optimale qui doit vérifier ces conditions.

II.6.2.1 Partie amont

Pour les deux cas plan et axisymétrique on a :

$$\frac{\partial p(0, Z)}{\partial Z} = h \quad (\text{II.43})$$

Ici, h représente la perte de charge linéaire à l'amont de la conduite axisymétrique.

II.6.2.2 Axe de la symétrie

$$\frac{\partial p(0, Z)}{\partial X} = 0 \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.44})$$

$$\frac{\partial p(0, Z)}{\partial R} = 0 \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.45})$$

II.6.2.3 Paroi de la conduite

$$\begin{cases} w(X_0, Z) = 0, & \text{pour : } Z \leq Z_{\text{Filière}} \\ \sigma \cdot \mathbf{n} = 0, & \text{pour : } (X = X_0, Z_{\text{Filière}} \succ Z \succ Z_1) \end{cases} \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{cases} w(R_0, Z) = 0, & \text{pour : } Z \leq Z_{\text{Filière}} \\ \sigma \cdot \mathbf{n} = 0, & \text{pour : } (R = R_0, Z_{\text{Filière}} \succ Z \succ Z_1) \end{cases} \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.47})$$

II.6.2.4 Partie aval

L'écoulement à l'aval de la conduite axisymétrique est supposé établi, et des conditions aux limites de type Neumann sont imposées, afin d'éviter les possibles oscillations qui viennent du mauvais choix de la longueur de la partie aval de la conduite.

$$\frac{\partial \tau_{xz}(X, Z)}{\partial Z} = 0 \quad \text{Cas plan} \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}(R, Z)}{\partial Z} = 0 \quad \text{Cas axisymétrique} \quad (\text{II.49})$$

II.7 Modèles Rhéologiques

Le comportement rhéologique des fluides peut être décrit par plusieurs modèles. Ces modèles décrivent les comportements en mouvement des fluides complexes à l'aide des relations mathématiques traduisant la relation entre les deux fonctions \mathbf{D} , τ . Pour les comportements anélastiques (visqueux et visqueux purs) les modèles les plus couramment utilisés sont :

II.7.1 Modèle newtonien

En termes plus simplifiés, le comportement d'un fluide newtonien est caractérisé par une dépendance linéaire entre les composantes du tenseur des contraintes τ et ceux du tenseur des taux déformations \mathbf{D} . Le coefficient de proportionnalité étant la viscosité dynamique, celle-ci est par ailleurs indépendante du taux de cisaillement et constante en fonction du temps, L'équation constitutive est :

$$\tau = 2\mu\mathbf{D} \quad (\text{II.50})$$

μ : Viscosité dynamique du fluide.

\mathbf{D} : Tenseurs des déformations.

II.7.2 Modèle Non-newtonien visqueux pur

Dans la famille des fluides purement visqueux, on rencontre plusieurs types de comportements qui dépendent uniquement de la contrainte appliquée (ou le gradient de vitesse), dont les principaux sont : loi de Carreau, loi de puissance etc.... La viscosité μ n'est plus indépendante du tenseur des contraintes et elle peut se varier en fonction des tenseurs des taux de déformation. Le comportement de tel fluide peut s'écrire comme suit :

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu(\mathbf{D})\mathbf{D} \quad (\text{II.51})$$

Lorsque la viscosité n'est plus indépendante du taux de déformation, il est nécessaire d'utiliser plusieurs paramètres pour décrire le comportement rhéologique du fluide. Dans ce qui suit nous présenterons certains modèles empiriques.

II.7.2.1 Loi de puissance

Une des lois empiriques simple fréquemment utilisée en rhéologie pour les fluides visqueux incompressibles est alors la loi d'Oswald-DeWaëlle, appelée aussi "loi de puissance" ou loi "pseudo-plastique", qui s'écrit :

$$\mu(\dot{\gamma}) = K \left| \dot{\gamma} \right|^{(n-1)} \quad (\text{II.52})$$

Avec: K : la consistance du fluide $[\text{Pa}\cdot\text{s}^n]$

$\dot{\gamma}$: le taux de déformation généralisé $[\text{s}^{-1}]$

n : l'indice de la loi de puissance.

Le taux de déformation généralisé $\dot{\gamma}$ est donné par :

$$\dot{\gamma} = [4\mathbf{\Pi}_D]^{1/2} \quad (\text{II.53})$$

Où :

Π_D Représente le deuxième invariant du tenseur des taux de déformation \mathbf{D} exprimé par :

$$\Pi_D = \frac{1}{2} \left[(tr(\mathbf{D}))^2 - tr(\mathbf{D}^2) \right] \quad (\text{II.54})$$

II.7.2.2 Loi de carreau

Le model de la loi de puissance s'applique sur une plage limitée de la courbe de viscosité. En réalité à des faibles taux de cisaillement les polymères ont un comportement newtonien, c'est-à-dire que la viscosité est indépendante du taux de cisaillement. Carreau a développé un modèle qui représente complètement la courbe de viscosité et qui prend en charge ce plateau, son model s'écrit :

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu(\infty) + \frac{\mu(0) - \mu(\infty)}{\left(1 + \left(\lambda \dot{\gamma} \right)^2 \right)^{\frac{(1-n)}{2}}} \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$\mu(0)$: viscosité dynamique a vitesse cisaillement nulle

$\mu(\infty)$: viscosité dynamique a vitesse de cisaillement infinie

n : Indice de la loi de puissance

λ : Temps constant

Pour des valeurs très élevées de $\dot{\gamma}$, la loi de carreau se réduit en loi de puissance avec :

$$\mu(0) = 0 \quad \text{et} \quad K = \mu(0) \lambda^{n-1}$$

Pour les fluides incompressibles, on a $tr(\mathbf{D}) = 0$, donc (II.54) devient:

$$\Pi_D = -\frac{1}{2} (tr(\mathbf{D}^2)) \quad (\text{II.56})$$

Après les calculs, la valeur du taux de cisaillement généralisée dans Ω et Ω^* respectivement devient :

$$\dot{\gamma} = \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.57})$$

$$\dot{\gamma} = \left[2 \left(\left(\frac{1}{f'_x} \frac{\partial u}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial Z} - \frac{f'_z}{f'_x} \frac{\partial w}{\partial X} \right)^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial u}{\partial Z} - \frac{f'_z}{f'_x} \frac{\partial u}{\partial X} \right) + \left(\frac{1}{f'_x} \frac{\partial w}{\partial X} \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.58})$$

II.8 Conclusion

Les méthodes des tubes de courant comportent dans leur formulation un certain nombre de propriétés intéressantes qu'il convient de mettre en évidence :

- ✓ La conservation de la masse et automatiquement vérifiée par la formulation ;
- ✓ Le maillage est construit dans un domaine simple sur les lignes de courant transformées, ce qui rend facile la définition de schéma de dérivation de type de différence finis ;
- ✓ Les conditions géométriques associées au domaine transformé permettant de prendre facilement en compte, pour un écoulement permanent, les lois de comportement héréditaire (modèles intégraux) ;
- ✓ Le domaine transformé Ω^* est constitué par des tubes de courant s'appuyant sur les images rectilignes des lignes de courant. Ces tubes de courant peuvent être utilisés pour une résolution numérique qui est possible en considérant un sous-domaine du domaine total.

D'autre part, l'écriture des équations gouvernantes en termes de variables du domaine transformé à l'aide des opérateurs de dérivation implique une augmentation du caractère non linéaire. La formulation fonction de transformation-pression met en évidence une forte sensibilité des équations gouvernantes aux variations de la fonction de transformation. Ainsi, il convient de choisir des opérateurs de dérivation précis pour la discrétisation des équations gouvernantes. De même, la résolution du système d'équations résultant nécessite l'utilisation robuste et efficace.

Il faut souligner qu'avec le mode de discrétisation utilisé ici, la méthode ne nous permet pas la prise en compte explicite des écoulements secondaires de type recirculations.

Finalement, la méthode des tubes de courant a été expliquée avec succès pour de nombreux travaux et a permis l'obtention des résultats numériques dans des situations d'écoulement permanent non isotherme.

Chapitre III

Formulations numériques

Résumé

Dans ce chapitre nous allons parler des formulations primaires et mixtes en fonction des inconnues du problème (f, p) , il détermine les valeurs des différentes grandeurs physiques aux nœuds du maillage qui coïncident avec les lignes de courant, autrement dit, les trajectoires (cas bidimensionnel). Ces grandeurs physiques doivent en tous points vérifier les équations de quantité de mouvement. On utilise pour la résolution itérative la méthode de Newton-Raphson.

III.1 Introduction

Comme il est précisé précédemment, les lois de conservation écrites en MTC, en particulier les équations des quantités de mouvement, conduisent à résoudre des équations non linéaires (équations (II.21)-(II.22)), même pour un fluide à loi de comportement non newtonien (relation non linéaire entre contraintes et déformations). La fonction de transformation étant liée directement à la forme des lignes de courant, les procédures de résolutions des équations de la MTC doivent être robustes puisque il faut prendre en compte le fait que de faibles variations des lignes de courant induisent des modifications importantes sur les contraintes, donc sur les équations gouvernantes. La non-linéarité des équations ne permet pas d'utiliser les outils actuellement disponibles de l'Analyse Numérique (consistance, convergence).

III.2 Formulations primaire et mixte

Les recherches effectuées pour la résolution numérique des équations de la MTC se sont orientées vers des procédures efficaces permettant d'assurer la convergence dans un contexte de résolution itérative. Comme dans les approches classiques, deux formulations peuvent être associés aux problèmes MTC. Ainsi dans le cas bidimensionnel, nous pouvons définir :

1. La formulation primaire, dans laquelle interviennent, avec la pression, la fonction de transformation et ses dérivées, soit (k, p) ou (f, p) dans les cas plan et axisymétrique, respectivement. Cette formulation conduit à un système d'équations différentielles du troisième ordre ;
2. La formulation mixte, dans laquelle les composantes des contraintes sont également prises en inconnues, soit donc $(k, p, \tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz})$ ou $(f, p, \tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{rz})$ respectivement dans les cas plan et axisymétrique. Dans ces cas, la prise en compte d'une composante de contrainte conduit à écrire une équation supplémentaire. Cette formulation implique un plus grand nombre d'équations à discrétiser, mais réduit d'un degré l'ordre de différentiation.

III.3 Discrétisation des équations et des inconnues

III.3.1 Consistance et stabilité

Différentes approches ont été proposées dans le contexte de la MTC pour la discrétisation des équations et des inconnues, dans le but d'assurer la consistance et la stabilité de la procédure de résolution. Si, pour les problèmes linéaires, une condition nécessaire à la convergence d'un schéma numérique et sa consistance, il est également intéressant d'étudier les erreurs numériques pour des problèmes non-linéaires comme ceux de la méthode des tubes de courant : si l'on peut tirer de définitives sur la convergence du programme, il est utile d'explorer l'impact de ces approximations successives sur son comportement.

La consistance d'un schéma de discrétisation est la propriété suivant laquelle l'application de ce schéma a une solution connue d'un problème continu, la norme d'erreur tend vers zéro quand on raffine le maillage. Autrement dit, si l'on désigne par Δx la taille de la maille correspondante à la discrétisation dans le domaine de résolution des équations, on a la propriété suivante :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \|Eq(sol_{exacte}) - Eq(sol_{calculée})\| = 0 \quad (III.1)$$

La vérification de l'équation (III.1) nécessite la considération d'un problème dont on connaît la solution exacte (*analytique ou numérique*), en étudiant un cas particulier d'écoulement, comme par exemple l'écoulement de poiseuille. On peut autrement écrire que la consistance du schéma est garantie, pour un problème où interviennent l'espace et le temps, lorsque l'erreur de troncature E_{tronc} tend vers zéro pour des pas de discrétisation d'espace et de temps tendant eux-mêmes vers zéro. Dans un problème aux dérivées partielles, cette erreur de troncature est définie par la relation :

$$E_{tronc} = L_{Taylor} - L_{part} \quad (III.2)$$

Où L_{Taylor} représente l'écriture du schéma discrétisé dont les termes de dérivation remplacés par leur développement en série de Taylor et L_{part} représente l'opération aux dérivées partielles. En pratique la condition de stabilité permet aux erreurs d'arrondi de ne pas simplifier au fur et à mesure de la progression du calcul.

III.4 Discrétisation en Méthode des Tubes de Courant

Différentes approches d'interpolation ont été définies pour la fonction de transformation, suivant le type de formulation (primaire, mixte) adaptée au problème et à la configuration d'écoulement. Ces discrétisations sont définies dans le cadre de différences finies et de discrétisation du domaine de calcul en éléments, associés ou non à une formulation faible d'un contexte d'éléments finis. Nous résumons ici différentes procédures déjà développées en MTC pour la discrétisation des équations et inconnues, ainsi que l'approche par différences finies que nous avons mises en œuvre dans nos simulations.

III.4.1 Discrétisations par différences finies

Ces discrétisations correspondent à l'approche que nous avons développée dans ce mémoire. Pour résoudre le problème mécanique (lois de conservation et loi de comportement, en conditions non isothermes) nous considérons, dans ce travail une discrétisation par différences finies pour les équations et inconnues. Nous adoptons une formulation primaire (f, p) (géométrie axisymétrique), ce qui conduit à évaluer les vitesses à partir de la fonction de transformation, que nous avons calculées dans un programme écrit en Matlab.

La discrétisation par différences finies est mise en œuvre sur des grilles du type de celles représentées en (Fig III.1), dans le domaine transformé Ω^* . Les différents tests numériques nous ont amené à retenir un maillage régulier en R , la grille en Z pouvant être raffinée dans certaines zones du domaine transformé, en rapport avec la forme du domaine physique et la prévision de gradient élevé (maillage irrégulier).

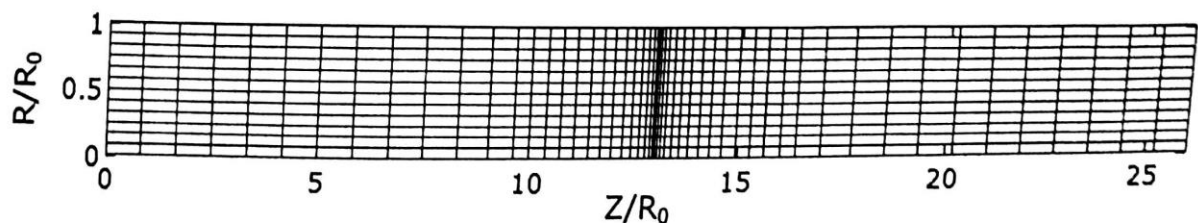


Fig III.1 : Exemple de grille de discrétisation dans le domaine transformé Ω^*

Pour la discrétisation, la stratégie développée est la suivante, dans le contexte d'un calcul de dérivées premières pour toutes les variables à prendre en compte dans les équations de la dynamique (fonction de transformation, vitesse, pression et contraintes).

III.4.1.1 Dérivées premières suivant la direction R

Les points d'abscisse R étant espacés de ΔR . Pour un point à l'intérieur du domaine, la dérivée première de la fonction f s'écrit :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial R}\right)_{R=R(i)} = \frac{1}{2\Delta R} [-f_{i-1} + f_{i+1}] \quad (\text{III.3})$$

Pour les points de l'axe et de la paroi, nous avons utilisé une formule de Lagrange à trois points :

A Pour les points de l'axe

$$\left(\frac{\partial f}{\partial R}\right)_{R=R(0)} = \frac{1}{2\Delta R} [-3f_0 + 4f_1 - f_2] \quad (\text{III.4})$$

B Pour les points de la paroi

$$\left(\frac{\partial f}{\partial R}\right)_{R=R(n)} = \frac{1}{2\Delta R} [f_{n-2} - 4f_{n-1} + 3f_n] \quad (\text{III.5})$$

Il est important de noter que, les équations (III.3.III.5) sont aussi utilisées pour le calcul des dérivées, suivant la direction R, du reste des grandeurs intervenant dans les équations gouvernantes (la vitesse, la pression et les contraintes).

III.4.1.1 Dérivées premières suivant la direction Z

Suivant la direction Z, on a utilisé un maillage irrégulier à cause de la présence des singularités cinématiques et géométriques. Comme nous l'avons signalé précédemment, une faible variation sur la valeur de f peut influencer fortement sur la convergence de la solution. Pour cette raison et après plusieurs tests de convergence, on a choisi pour la dérivée première de toutes les variables intervenant dans les équations à résoudre un schéma d'ordre un, obtenu par la sommation des deux schémas décentrés, amont et aval. Ce schéma est donné par :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)_{Z=Z(j)} = \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{dz} f_{i-1} + \frac{dz(j+1) - dz(j)}{dz(j+1)dz(j)} f_i + \frac{1}{dz(j+1)} f_{i+1} \right] \quad (\text{III.6})$$

Avec:

$$dz(j+1) = dZ(j+1) - dZ(j) \quad (\text{III.7})$$

$$dz(j) = dZ(j) - dZ(j-1) \quad (\text{III.8})$$

Il faut souligner que, pour les points en amont et en aval du domaine d'étude on a utilisé la formule de Lagrange à trois points (schéma de dérivation d'ordre 2 : (III.4), (III.5), pour éviter les oscillations engendrées par les conditions aux limites imposées.

Dans nos simulations, l'utilisation du schéma d'ordre un (III.3), n'a pas produit d'oscillations sur les inconnues calculées.

Il faut d'ailleurs préciser que, dans le cadre des différences finies utilisées dans ce travail, les quantités $\frac{\partial}{\partial R}$, $\frac{\partial}{\partial Z}$ concernant la dérivation des composantes de vitesse u et w sont calculées par différences finies à partir de leurs valeurs ponctuelles estimées et non pas avec les dérivées partielles secondes de la fonction de transformation.

III.5 Algorithme et résolution du problème

Mécanique

Cet algorithme a été utilisé pour la résolution du problème d'écoulement isotherme de fluides anélastiques dans différentes géométries (conduite avec : convergent et gonflement a la paroi).le traitement de chaque géométrie le changement des conditions aux limites. A cause du système d'équations algébrique non-linéaire des équations des quantités de mouvement obtenu par l'utilisation de la MTC, la solution de l'ensemble des équations discrètes, a été obtenue par une méthode itérative de Newton-Raphson. Les étapes de notre algorithme sont les suivantes :

1. lecture des données physiques et géométriques.
2. Construction du maillage.
3. Calcul de l'écoulement a l'amont (détermination des conditions aux limites à l'amont (écoulement de poiseuille)).

4. Initialisation de la pression et de fonction de transformation dans le reste du domaine.
5. Calcul des approximations et des dérivées des variables intervenant dans les équations à résoudre.
6. Procédure d'optimisation (résolution du système d'équations discrètes par l'algorithme itérative de Newton-Raphson).
7. Teste de convergence : la convergence de notre algorithme a été jugée par la norme des équations de la dynamique et quelques conditions aux limites qui doit être nul aux frontières du domaine d'étude (exemple : la vitesse à la paroi). Le calcul doit être arrêté si la valeur de cette norme est inférieure ou égale à un critère de convergence qui égale, dans notre cas, a $\varepsilon = 10^{-10}$ d'après notre expérimentation numérique, au-delà de la valeur de 10^{-10} , la solution reste inchangée. mathématiquement la norme des équations de la dynamique et des conditions aux limites s'écrite par :

$$\|R\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \mathfrak{R}_i^2} \quad (\text{III.9})$$

Dans cette équation :

$$\mathfrak{R} = \rho(V \cdot \nabla)V + \nabla(\rho) - \nabla \cdot \tau \quad (\text{III.10})$$

Ou bien

$$\mathfrak{R} = \text{Condition aux limites}$$

Et $\|R\| \leq \varepsilon$

Si la convergence n'est pas vérifiée, le calcul doit se refaire a partir de l'étape 5 chaque fois la convergence n'est pas lieu, et cela jusqu'à la convergence ou le calcul doit être arrêté.

III.6 Algorithme de Newton-Raphson

L'algorithme de Newton-Raphson est une méthode itérative conçu pour la résolution des équations au un système d'équations non linéaires de la forme $F(x) = 0$, en se basant sur le développement en série de Taylor de la fonction Soit X_i une valeur approchée de la solution inconnue. Posons : $x_{i+1} = x_i + h$, et cherchons l'accroissement qu'il faut donner a X_i de façon à ce que:

$$F(x_{i+1}) = F(x_i + h) = 0 \quad (\text{III.11})$$

Le développement en série de Taylor d'ordre 2 de la fonction précédente s'écrit :

$$F(x_i + h) = F(x_i) + h \frac{\partial F}{\partial x} + O(h^2) = 0 \quad (\text{III.12})$$

Ou approximativement :

$$F(x_i) + h F'(x_i) = 0 \quad (\text{III.13})$$

De cette dernière équation, on peut tirer la valeur de l'accroissement :

$$h = \frac{-F(x_i)}{F'(x_i)} \quad (\text{III.14})$$

De manière générale, la solution de F à l'itération i devient :

$$x_{i+1} = x_i - \frac{F(x_i)}{F'(x_i)} \quad (\text{III.15})$$

Si l'on veut une interprétation de la méthode, la valeur x_{i+1} représente l'abscisse du point d'intersection avec l'axe 'ox' de la tangente au graphe $y = F(x)$ en x_i

La convergence de l'algorithme vers le minimum global n'est toutefois pas garantie cependant elle est constatée le plus souvent si le choix de la solution initiale x_0 est judicieux. En pratique, on utilise cette méthode pour optimiser une solution approchée, suffisamment proche de la optimale

Par ailleurs la stabilité d'un tel processus ne peut être garantie théoriquement, surtout dans le cas où le nombre d'inconnues est grand. Plus le nombre de paramètres est important, plus cette stabilité n'est difficile à obtenir.

Dans notre problème, le vecteur inconnu \vec{x} de dimension n est formé des valeurs de la fonction de transformation et de la pression aux différents nœuds du maillage, celles ne sont pas données par une condition aux limites. Les n équations correspondantes sont les deux équations des quantités de mouvement correspondants à chacun des nœuds, ou une seule si l'autre est assurée par une condition aux limites. Les équations doivent être nulles sur tout le domaine.

A chaque itération, l'algorithme de Newton-Raphson nécessite le calcul de la matrice jacobéenne de F en $\vec{\mathcal{N}}_i$, elle est construite par colonne en calculant numériquement:

$$\frac{\partial F}{\partial \mathcal{N}_i} = \frac{F(\mathcal{N}_i + \Delta \mathcal{N}_i) - F(\mathcal{N}_i)}{\Delta \mathcal{N}_i} \quad (\text{III.16})$$

La solution initiale utilisée pour le calcul de l'écoulement est telle que les lignes de courant sont équidistantes tout le long de la conduite, et la pression est constante suivant r et donnée selon z par le gradient de pression local calculé, en se basant sur le principe de conservation de la masse.

III.7 Optimisation de la méthode de Newton-Raphson(coefficient de descente)

Pour des écoulements extrême ou la solution initiale est trop éloignée de l'écoulement réel, ou pour un nombre trop important de nœuds de maillage, l'algorithme ne converge pas. Pour essayer d'éviter la divergence du programme ou le blocage de l'algorithme dans des « minima locaux », l'algorithme de Newton-Raphson est optimisé par l'ajout d'un 'coefficient de descente'. Ainsi, une fois la 'la direction de descente' déterminée par l'algorithme, on améliore la convergence et évite les blocages dus aux minima locaux en cherchant un minimum sur la droite donnée par cette direction au lieu de prendre la distance donnée par les résidus précédents.

Dans le cadre de notre travail, la recherche d'un minimum sur la droite de descente se fait regardant la valeur des résidus en un nombre fini de points successifs. Cette recherche pourrait être facilement améliorée en utilisant d'autre technique d'optimisation.

III.8 Conclusion

Ce chapitre présente une synthèse des méthodes de discrétisations des équations de quantité de mouvement associé à la méthode des tubes de courant, pour la résolution du problème mécanique. Notre stratégie de résolution est basée sur la discrétisation par différence finis, associée à la géométrie du domaine d'étude. Ce dernier formé par des lignes de courant qui sont des droites parallèles à la direction moyenne de l'écoulement. Le système d'équations discrètes ainsi obtenu, a été résolu par la méthode itérative de

Newton-Raphson avec une procédure d'optimisation (la recherche de direction de descente).

Nous présentons dans le chapitre suivant des résultats relatifs aux problèmes d'écoulements non isothermes de fluide visqueux et visqueux purs, dans une conduite axisymétrique à section constante, en tenant compte du problème de glissement à l'aval de la conduite.

Chapitre IV

Résultats et discussion

Résumé

Dans ce chapitre nous présenterons l'ensemble des résultats numériques obtenus par nos simulations. Ces résultats ont pour but la compréhension par voie numérique du phénomène de gonflement à l'intérieur d'une filière axisymétrique. Ce phénomène, qui peut engendrer la dégradation des produits finis à base de polymère, causé par le glissement du fluide en écoulement sur une partie de la paroi de la filière. La discussion de ces résultats a été présentée aussi.

IV.1 Introduction

Ce chapitre a pour but la présentation et la discussion des résultats obtenus par les simulations numériques effectués dans ce travail. On rappelle une fois encore qu'on a effectué des simulations numériques, en utilisant la méthode des tubes de courant, d'écoulements newtonien et non newtonien visqueux pur à travers une conduite à géométrie complexe, en tenant compte du phénomène de glissement à la paroi le long d'une partie de la conduite axisymétrique. Ce type d'écoulement est très rencontré dans le domaine de mise en forme des polymères, notamment dans le procédé de l'extrusion, où le glissement du polymère avant la sortie de la filière de l'extrudeuse (*partie aval de la conduite considérée dans ce travail*) dégrade considérablement la qualité du produit finis.

Pour mieux comprendre le comportement dynamique du polymère (*Nylon*) à travers la conduite à convergent, nous avons jugé important l'étude par voie numérique de l'effet de plusieurs paramètres (*glissement, cinématique, comportement rhéologique et la géométrie du convergent*) sur le comportement du Nylon le long de la filière axisymétrique à convergent.

IV.2 Géométrie du domaine d'étude

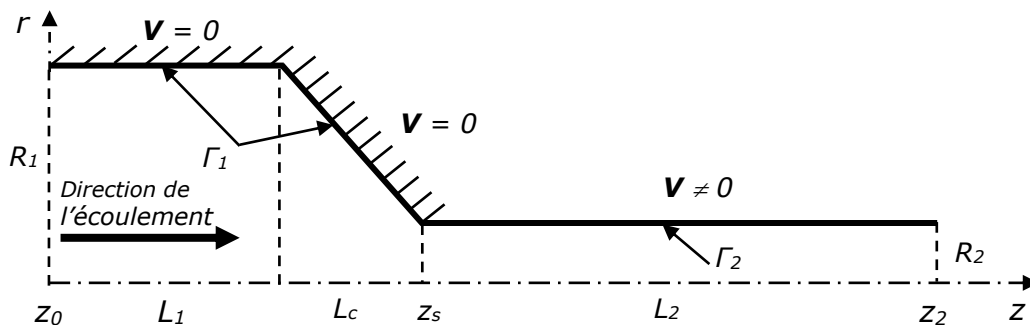


Figure IV.1 : Description géométrique du domaine d'étude :
(conduite axisymétrique à convergent)

Sur la figure IV.1 nous montrons géométriquement le domaine d'étude qui représente une filière axisymétrique à convergent. Cette dernière, dont son rayon d'entrée $R_1 = 0.01$ [m] et celui de la sortie $R_2 = 0.5 \cdot R_1$, possède une longueur totale $L_{tot} = 22R_1$. Les longueurs de la partie amont au convergent L_1 , du convergent L_c et de la partie aval au convergent L_2 sont égales respectivement à : $10R_1$, $2R_1$ et $10R_1$.

La condition d'adhérence à la paroi : $\mathbf{V} = 0$ a été considéré pour toute longueur z inférieur ou égale à : $L_1 + L_c$. Au-delà de cette longueur la vitesse non nulle est imposée. Cette dernière condition représente mathématiquement le phénomène de glissement à la paroi qui peut se produit par certaines conditions physico-chimique liées à la zone de contact entre la paroi et le fluide en écoulement.

IV.3 Résultats et discussion

Dans ce qui suit nous présenterons quelques résultats liées aux simulations qu'on a effectuées sur l'écoulement du Nylon à travers la conduite axisymétrique indiquée dans la figure IV.1.

IV.3.1 Maillage

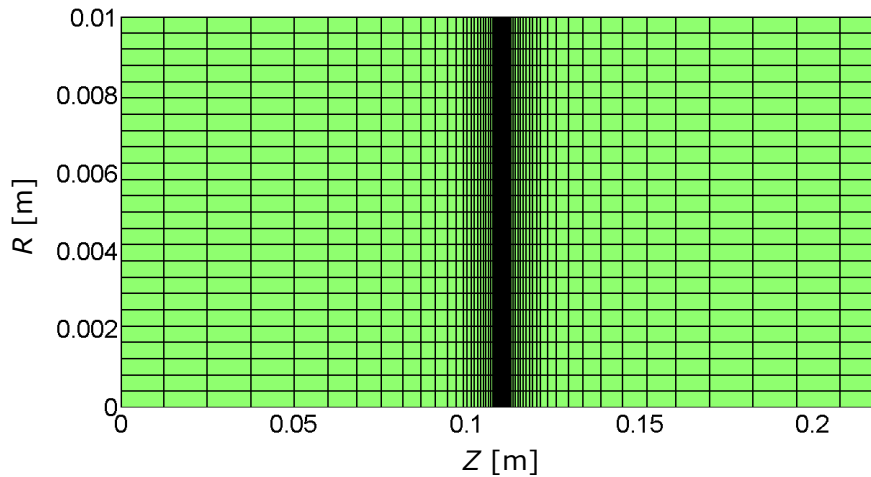


Figure IV.2 : Exemple de maillage dans le domaine transformé Ω^* : maillage hors échelle.

Après plusieurs tests de maillage, et pour annuler l'effet de la géométrie sur les résultats numériques, nous avons adopté celui indiqué dans la figure IV.2. Le maillage indiqué dans cette dernière est associé au domaine d'étude transformé Ω^* , où la filière axisymétrique à convergent (domaine d'étude réel Ω) a été transformée, grâce à une fonction de transformation $T : (x,z) \rightarrow f(X,Z)$, à une conduite axisymétrique à section constante dont sa taille est : $Longueur = 22R1$, $Rayon = R1$.

Dans le tableau IV.1 nous indiquons les caractéristiques géométriques du maillage indiqué dans la figure IV.2.

Variable	Valeur
▪ Nombre de points de maillage suivant R : N_R	25
▪ Nombre de points de maillage suivant Z : N_Z	61
▪ Taille de la petite maille $\Delta R_{min} * \Delta Z_{min}$	$0.083R_1 * 0.489R_1$
▪ Nombre d'inconnues de pression : N_p	1500
▪ Nombre d'inconnues de la fonction de transformation : N_f	1380

Tableau IV.1 : Caractéristiques géométriques du maillage adopté pour les calculs

IV.3.2 Résultats numériques

IV.3.2.1 Modèle de Carreau ($Q = 3.14 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$)

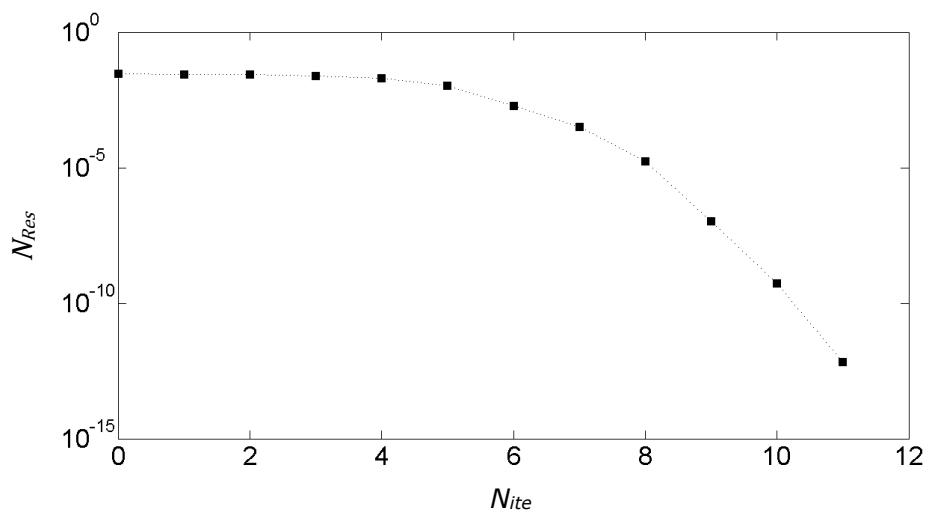


Figure IV.3 : Evolution de la norme des résidus N_{res} en fonction du nombre d'itération N_{ite} de l'algorithme de Newton-Raphson

La figure IV.13 représente la variation de la norme des résidus (*erreurs de troncature des équations des quantités de mouvement*) en fonction de nombre d'itérations de l'algorithme de Newton-Raphson. Nous constatons, selon cette figure, que la solution optimale est obtenue à $N_{ite} = 11$, où la norme des résidus diminue de 2.80×10^{-2} à 6.62×10^{-13} .

La variation de comportement rhéologique du Nylon 6.6, selon le modèle de Carreau, en fonction de taux de cisaillement apparent est présentée dans la figure IV.3.

On remarque selon cette dernière que le modèle de Carreau et pour des valeurs faibles de taux de cisaillement, représente le comportement newtonien, où la viscosité est seulement fonction de la température. Pour des valeurs de $\dot{\gamma}$ supérieur à 10 [s^{-1}] la viscosité dynamique commence à diminuer et atteint sa valeur minimale à l'infini : $\mu(\infty) = 0$.

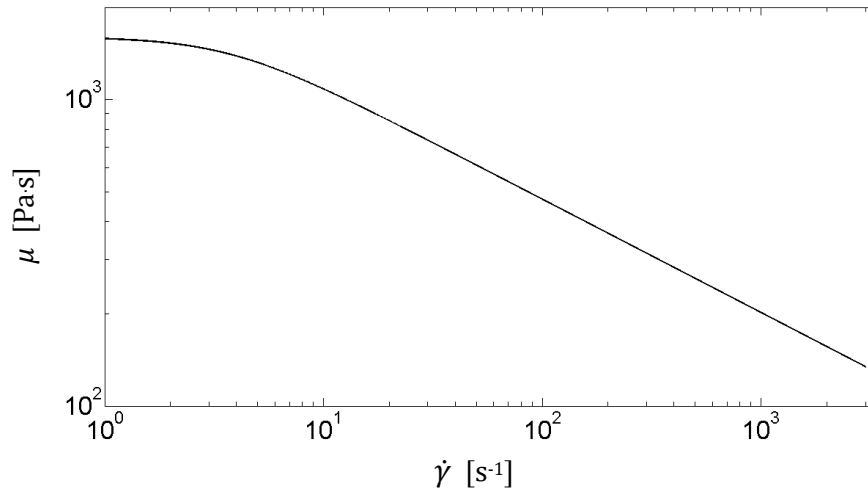


Figure IV.4 : Evolution de la viscosité dynamique μ en fonction de taux de cisaillement $\dot{\gamma}$: prédiction de la loi de Carreau pour le Nylon 6.6 ($\mu(0)=1600$ [Pa.s], $\mu(\infty)=0$, $n = 0.63$, $\lambda = 0.27$ et $T_0 = 225$ [°C]).

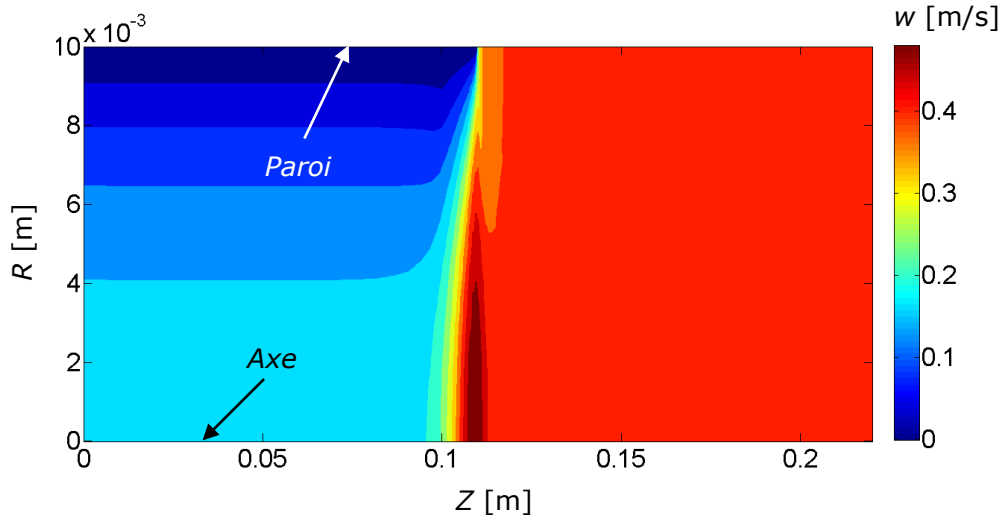


Figure IV.5 : Iso-valeurs de la composante axiale de la vitesse au sein de la conduite axisymétrique.

La morphologie des iso-valeurs de la composante axiale w de la vitesse est indiquée en figure IV.5. L'examen de cette dernière à nous permet de constater que l'écoulement est de type poiseuille à l'amont du convergent, puis elle est devenu solide

(même vitesse d'écoulement) à l'aval de cette même zone. Ce résultat peut être dû aux conditions aux limites de poiseuille et de glissement à la paroi, imposées respectivement à l'entrée de la conduite et sur sa paroi dans la zone aval au convergent. Au niveau du convergent et sur l'axe de la conduite la vitesse atteint sa valeur maximale, notamment au coin rentrant où la vitesse est devient égale à 0.5 [m/s].

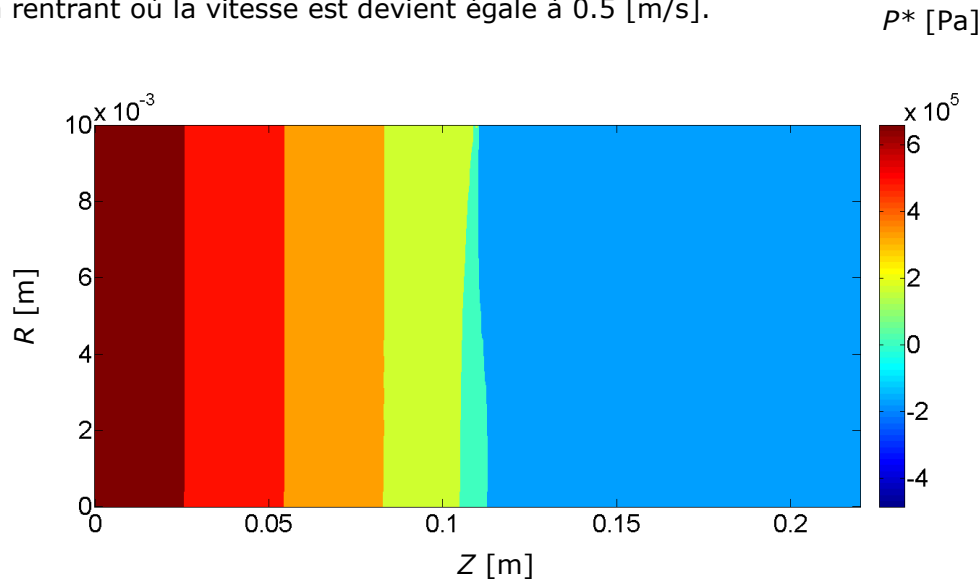


Figure IV.6 : Iso-valeurs de la pression statique (effective) p^* au sein de la conduite axisymétrique.

Les iso-valeurs de la pression statique (*pression effective*) sont indiquées sur la figure IV.6. D'après cette dernière on remarque que la pression, et dans la partie amont au coin rentrant ($Z = 0.11$ [m]), reste constante le long de la direction radiale R . Suivant la direction de l'écoulement (*direction Z*), cette pression chute linéairement jusqu'à la valeur nulle, où il l'atteint juste à l'aval du coin rentrant. Cette variation de pression probablement engendrée par la perte de charge linéaire le long de la partie amont du coin rentrant ($Z = 0.22$ [m]). Au-delà de cette longueur la pression effective est nulle (*pression statique égale à la pression atmosphérique imposée à la sortie de la conduite*) à cause de la naissance de l'écoulement solide dans cette même zone.

La distribution des iso-valeurs des contraintes de cisaillement τ_{rz} dans la filière axisymétrique est mentionnée sur la figure IV.7. Dans la zone amont au coin rentrant cette contrainte est maximale au niveau de la paroi et surtout dans le convergent, par contre elle est nulle au centre de la conduite. Cela peut être dû au frottement entre les couches fluides causé par l'adhérence à la paroi. Au coin rentrant, un pic de contrainte ($\tau_{rz} = -8100$ [Pa]) est produit qui dû sans doute au gradient de vitesse élevé dans cette zone. Au-delà de cette dernière la contrainte de cisaillement est nulle à cause de l'écoulement solide (*pas de frottement entre les couches fluides à cause du glissement de fluide sur la paroi*).

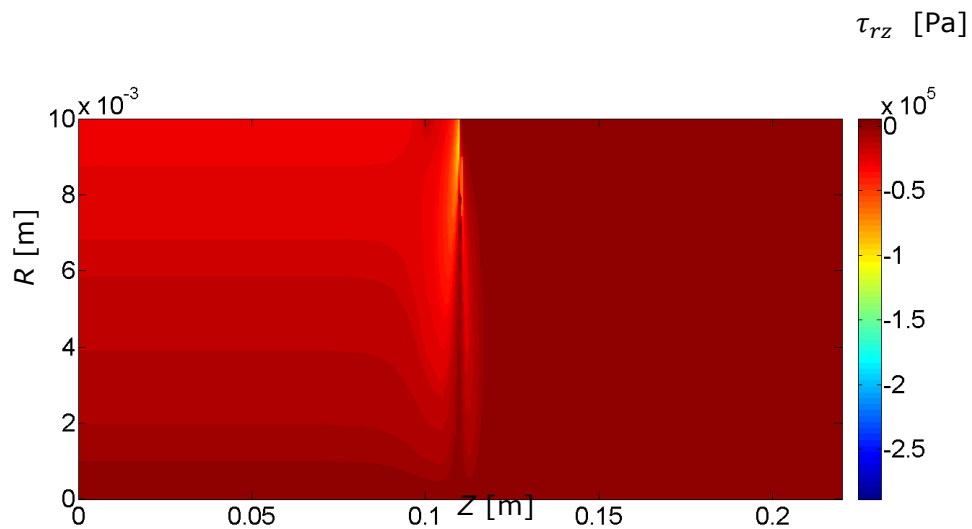


Figure IV.7 : Iso-valeurs de la contrainte de cisaillement τ_{rz} au sein de la conduite axisymétrique.

Sur la figure IV.8 nous présentons les iso-valeurs de la viscosité dynamique du Nylon 6.6 au sein de la filière axisymétrique. L'examen de cette figure indique que dans la zone amont du convergent la viscosité diminue graduellement du centre vers la paroi. A l'aval de cette zone, la viscosité dynamique reste constante est égale à celle de référence ($\mu(0) = 1600$ [Pa.s]). Ce résultat éventuellement engendré par le comportement cinématique de l'écoulement dans ces deux zones.

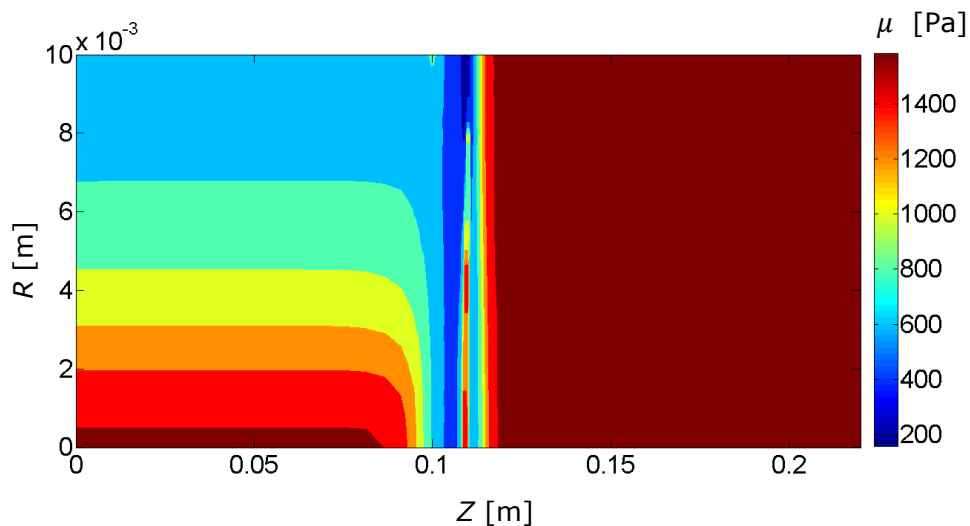


Figure IV.8 : Iso-valeurs de la viscosité dynamique μ au sein de la conduite axisymétrique.

IV.3.2.2 Effet de la loi rhéologique sur le comportement dynamique du Nylon en écoulement ($Q = 3.14 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s}]$)

Pour étudier l'effet du comportement rhéologique sur l'écoulement du Nylon 6.6 à travers la filière axisymétrique, nous avons utilisé deux lois de comportement (loi de Carreau et celui de newtonien). Dans cette partie et pour but d'éliminer l'effet de la cinématique sur le comportement dynamique du nylon en écoulement, nous avons gardé constante le débit d'écoulement pour les deux fluides.

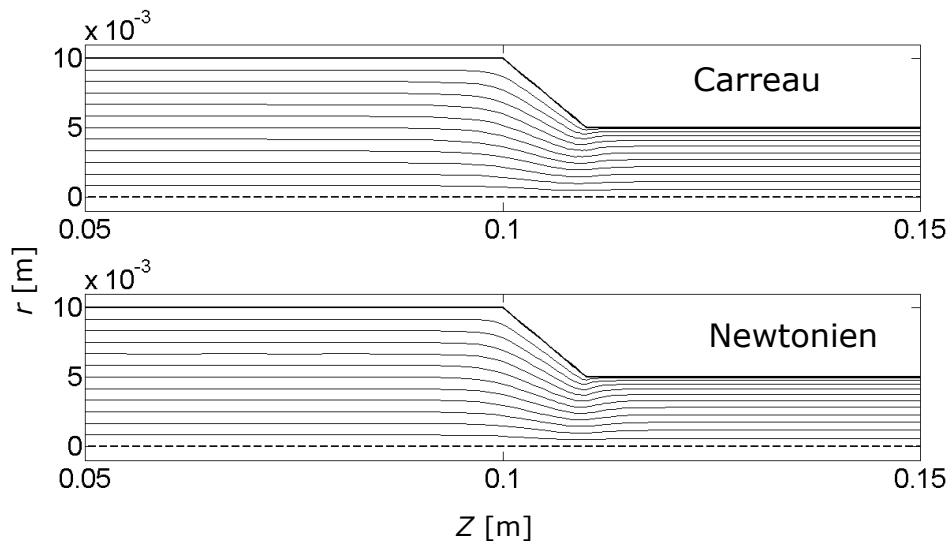


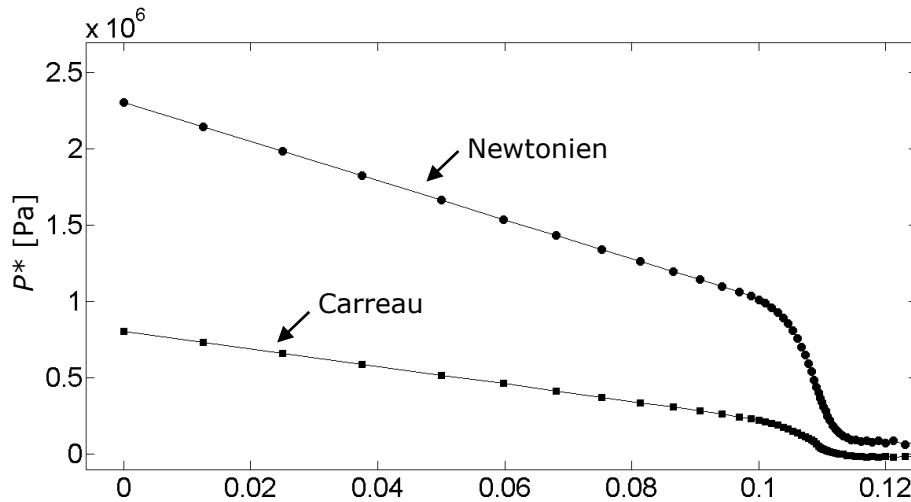
Figure IV.8 : Profils des lignes de courant calculées au sein de la filière pour le cas du fluide de Carreau et celui de newtonien.

Sur la figure IV.8 nous montrons la morphologie des lignes de courant prédite par les deux modèles rhéologiques de Carreau et newtonien, le long de la direction z de l'écoulement. Selon cette figure on constate que les lois de comportement testés ils n'ont aucune influence sur la physionomie des lignes de courant.

L'évolution de la pression le long de la direction de l'écoulement Z , fournie par les deux modèles indiqués auparavant est mentionnée dans la figure IV.9. D'après cette dernière on remarque que la poussée fournie, pour le cas newtonien, à l'entrée de la filière et dans le but de garder constante le débit d'écoulement à $2.14 \times 10^{-6} \text{ [m}^3/\text{s}]$ est supérieure à celui du fluide de Carreau. Cette différence est liée sans doute à la diminution de la viscosité de Carreau en fonction de la vitesse d'écoulement. Autrement dit le fluide de Carreau dans ce cas-là devient moins visqueux que le fluide newtonien.

La figure IV.10 montre, pour le fluide de Carreau et celui de newtonien, l'évolution des contraintes de cisaillement sur la paroi de la filière. On constate d'après cette figure

l'augmentation rapide de cette contrainte dans le convergent. Cette augmentation est plus remarquable pour le fluide newtonien que celui de Carreau. Cette différence peut



être liée à la chute de viscosité du fluide de Carreau avec l'augmentation de la vitesse.

Figure IV.9 : Profils de pression effective p^* le long de la direction Z de l'écoulement pour le cas du fluide de Carreau et celui de newtonien.

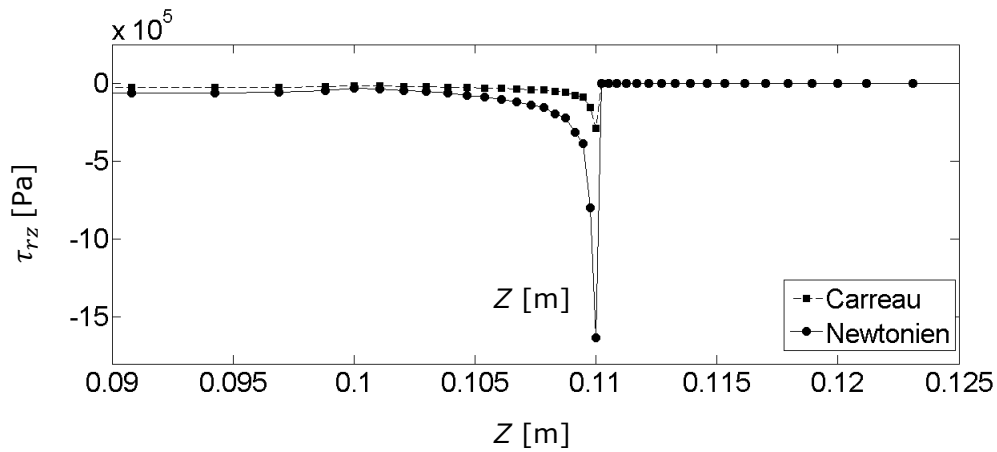


Figure IV.10 : Profils des contraintes de cisaillement τ_{rz} le long de la direction Z de l'écoulement pour le cas du fluide de Carreau et celui de newtonien.

IV.3.2.3 Effet de la cinématique sur le comportement dynamique du

Nylon en écoulement

Pour tester l'effet de l'intensité du champ de vitesse sur le comportement dynamique du Nylon en écoulement, on a choisi 4 débits d'écoulements : $Q_1 = 7.85 \times 10^{-6}$ [m³/s], $Q_2 = 1.57 \times 10^{-5}$ [m³/s], $Q_3 = 2.36 \times 10^{-5}$ [m³/s] et $Q_4 = 3.14 \times 10^{-5}$ [m³/s]. Le comportement rhéologique du fluide a été modélisé par la loi de Carreau.

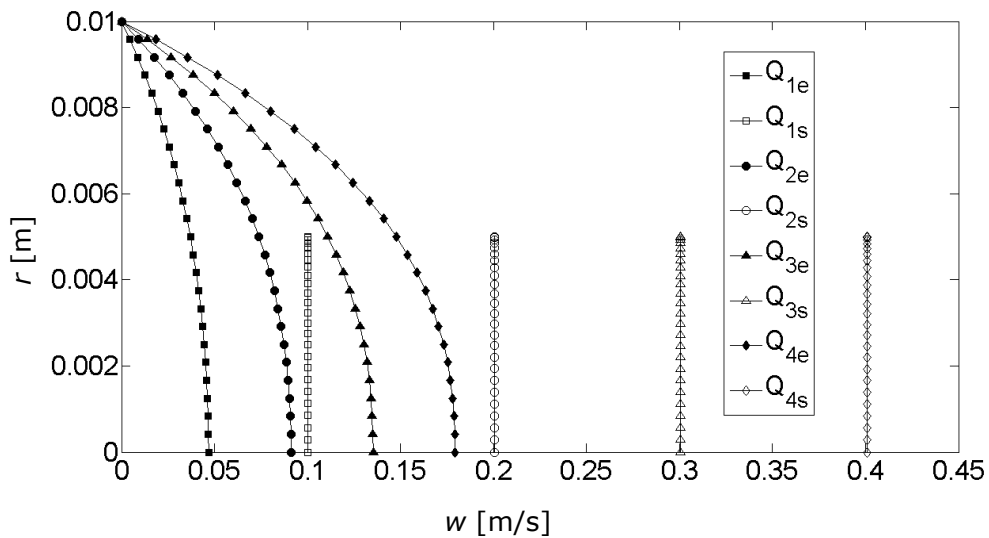


Figure IV.11 : Profils de la composante axiale w de la vitesse le long de la direction radiale r pour différents débits d'écoulement (Carreau).

Sur la figure IV.11 nous présentons les profils, à l'entrée 'e' et à la sortie 's', de la composante axiale w de la vitesse, suivant la direction radiale r , pour différentes valeurs de débit d'écoulement Q . On constate que l'écoulement, pour la gamme des débits testés, est de type poiseuille à l'amont du convergent, par contre il est de type solide à l'aval. On constate aussi que le changement de vitesse à l'amont influe considérablement sur sa valeur à l'aval.

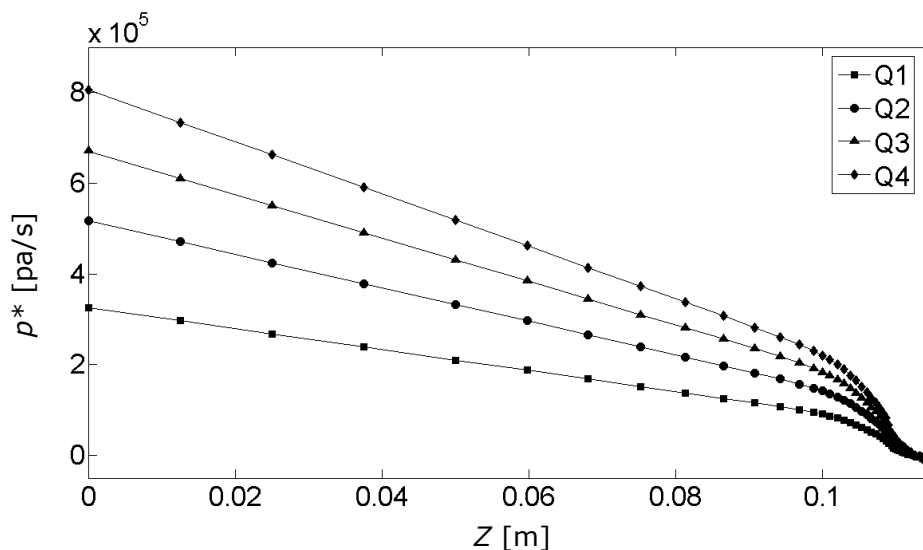


Figure IV.12 : Profils de la pression effective p^* le long de la direction axiale Z pour différents débits d'écoulement (Carreau).

En figure IV.12 nous présentons l'évolution des profils de la pression effective le long de la direction Z , pour plusieurs débits d'écoulements. On remarque que l'augmentation du débit d'écoulement est due à l'augmentation de la poussée du fluide à l'amont de la filière. La valeur nulle de la pression à l'aval du convergent est à cause de l'écoulement solide à cet endroit.

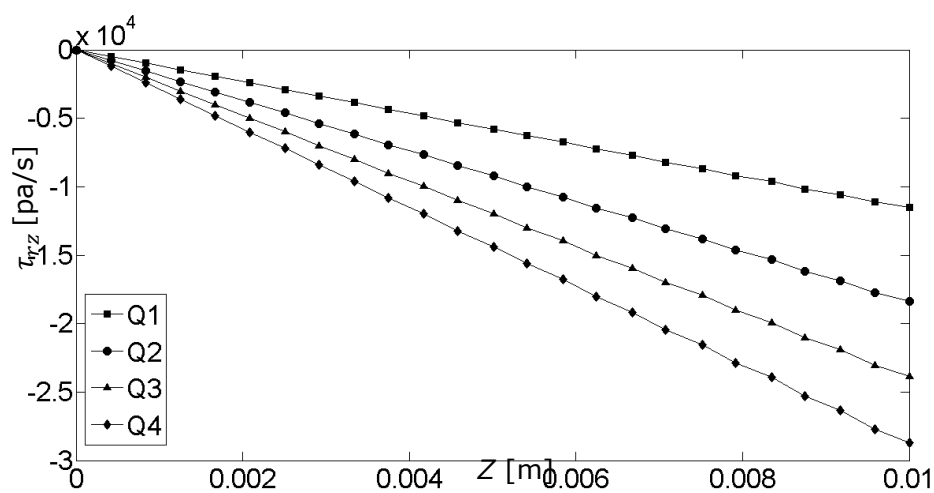


Figure IV.13 : Profils de la contrainte de cisaillement τ_{rz} le long de la direction axiale Z pour différents débits d'écoulement (Carreau).

Dans cette dernière figure nous présentons l'évolution de la composante τ_{rz} de la contrainte de cisaillement le long de la direction radiale r en fonction du débit de ce dernier. D'après cette figure nous remarquons que la contrainte de cisaillement est variée linéairement du centre vers la paroi de la filière. De plus l'augmentation du débit d'écoulement engendre une augmentation de cette contrainte. Cette dernière remarque peut être liée à l'augmentation des taux de cisaillement en fonction du débit.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des résultats obtenus par la simulation d'écoulements newtonien et non newtonien visqueux pur (*loi de Carreau*), à travers une conduite axisymétriques à convergent, avec prise en compte du glissement de fluide à la partie aval du convergent. Les paramètres des lois rhéologiques sont ceux du Nylon 6.6 mesurées à la température de référence $T_0 = 225$ °C.

Pour comprendre mieux un tel écoulement, nous avons effectué plusieurs simulations numériques. Ces dernières a pour but de savoir l'effet de quelques paramètres cinématique et rhéologique sur le comportement dynamique de l'écoulement.

Les résultats obtenus par nos simulations ont nous permettent de constater le suivant :

- ⇒ Le débit d'écoulement influe considérablement le comportement dynamique du fluide en écoulement, notamment les fluides à caractère visqueux pur ;
- ⇒ La loi de comportement peut engendre des changements non négligeables sur le comportement dynamique ;
- ⇒ Le phénomène de glissement engendre un changement brutal sur le comportement du fluide en écoulement, ce qui peut être interprète la dégradation des produits finis durant l'apparition de ce phénomène.

Conclusion générale

Pour des fluides au comportement non-newtonien comme les matières plastiques, il est important de comprendre les phénomènes liés à des situations variées d'écoulement et d'évaluer des grandeurs caractéristiques comme les vitesses, les gradients cinématiques et les contraintes au sein de l'écoulement et aux interfaces. La simulation numérique peut apporter des réponses sur ces points et depuis plus de trente années, la littérature internationale rend compte de l'importance du sujet, de l'acuité des problèmes rencontrés et des avancées dans ce domaine.

La modélisation des matériaux fluides est basée sur la compréhension de sa structure et sur la caractérisation de son comportement dans des situations d'écoulement simple. Les différents modèles rhéologiques doivent rendre compte des propriétés physiques et mécaniques des matériaux. A partir du choix de l'un de ces modèles, la simulation numérique permet de prédire le comportement du fluide en écoulement dans des géométries complexes, pour lesquelles des mesures expérimentales ne sont pas accessibles.

L'un des buts majeurs du travail présenté dans ce mémoire est de proposer des méthodes visant à satisfaire les préoccupations liées à la description des écoulements de fluides dans des conduites à paroi d'adhérence et glissement.

Le travail numérique présenté dans ce mémoire est basé sur des formulations théoriques de méthode des tubes de courant. Ces analyses, pour lesquelles on considère l'ensemble des équations gouvernantes sur un domaine simple, amènent à prendre en compte un ensemble d'équations plus compliquées que celles écrites dans le cadre des résolutions (par différences finies, éléments ou volumes finis) effectuées dans le domaine physique d'écoulement.

Le choix de cette formulation, pour le traitement numérique du problème de la transition adhérence-glissement, est basé sur les arguments suivants :

1. Le maillage est réalisé dans le domaine transformé de géométrie plus simple que le domaine réel, ce qui nous permet d'utiliser des schémas de discrétisation simples de type différences finies ;
2. Le maillage est construit sur des lignes qui sont des droites parallèles à la direction moyenne de l'écoulement ;

3. La conservation de la masse est vérifiée automatiquement par la formulation ;
4. La diminution notable du nombre d'inconnues par rapport aux formulations relatives au formalisme (vitesse-pression).

Les résultats obtenus par nos simulations, du problème de la transition adhérence-glissement avec le modèle de carreau, nous permis de constater :

1. Les lignes ne sont pas sensibles aux vitesses d'écoulement testées ;
2. Les pics sur les contraintes au niveau du point de singularité, sont proportionnels au débit d'écoulement ;
3. Les prédictions cinématique des lois de comportements utilisés dans ce travail, sont déférentes au même débit d'écoulement, ce qui rend le choix d'une loi de comportement pour la simulation numérique des fluides complexes une étape délicate.

Références bibliographiques

- [1] **Dr. Gilles olive**, Chimie des matériaux, Ecole industrielle et commerciale de la ville de Namur ; 3ème édition, 07/01/2005.
- [2] **Gottfried W.Ehrenstein**, Fabienne Montagne matériaux polymères : Structure, propriétés et applications ; Hermès science publications, 2000.
- [3] **A.Peterlin**, Molecular model of draning polyethylene and polypropylene, Journal of materials science, 1971, 6(6).
- [4] **Marc Carrega et Coll** ; Matériaux industriels, matériaux polymères ; Édition Dunod ; 2000, Paris.
- [5] **Tordella J.P.**, Unstable flow of molten polymers, in: *Rheology*, FR Eirich ed., Academic Press, New-York, vol. 5, 57 (1969).
- [6] **Bialas G.A., White J.L.**, Extrusion of polymer melts and melt flow instabilities. I. Experimental study of capillary flow and extrudate distortion, *Rubber Chem. Tech.*, 42, 675-681 (1969).
- [7] **Petrie C.J.S., Denn M.M.**, Instabilities in polymer processing, *A.I.Ch.E. J.*, 22, 209-236 (1976).
- [8] **Boudreaux E., Cuculo J.A.**, Polymer flow instability: a review and analysis, *J. Macromol. Sci.-Rev. Macromol. Chem.*, 16, 39-77 (1977-1978).
- [9] **Koopmans R.** Défauts d'extrusion, *Techniques de l'Ingénieur*, AM 3657, 1-16 (2002).

Références bibliographiques

- [10] **Den Otter J.L.**, Mechanisms of melt fracture. *Plast. & Polym.*, 38, 155-168 (1970).
- [11] **Z.TADMOR et C.G.GOGOS.** Principales of polymer processing, (1979).
- [12] **J.R. CLERMONT.** Analysis of incompressible three-dimensional flow using the concept of stream tubes in relation with a transformation of the physical domaine.
- [13] **J.R. CLERMONT, M.E. DE LA LANDE, T.PHAM, DINH, A.YASSINE.** Numerical simulation of axisymetric converging flows using the stream tube method and a trust region optimization algorithm. *Engineering Optimization*, vol 19, pp 187-208 (1991).
- [14] **J.CLERMONT , D. RADU.** Numerical study flows of complex fluids between accentric cylinders using transformation funcontions. *International Journal for the Numerical Methods in fluids*, vol.40, no.5,669-996 (2002).
- [15] **J.R.CLERMONT, M.NORMANDIN et D.RADU.** Some remarks on the concept of stream tubes for numerical simulations of complex fluid flows. Applications. *Control and cybernetics*, vol.29, no2, 535-554 (2000).
- [16] **D.GRECOV RADU, M. NORMANDIN et J.R.CLERMONT.** A numerical approach for computing flows by local transformations and domaine decomposition using an optimization algorithm. *Comput. Method in applied Mechanics and Enginering*, vol.191, no.39-40, 4401-4419 (2002).

Références bibliographiques

[17] **A.CHINE, A. AMMAR, M.NORMANDIN, J.R.CLERMONT**, « Anumericl approach for polymer flow predictions in two-dimentional geometries, involving crystallization precesses ». International journal of forming processes. Volume 10- No.4/2007, p.447-470.

[18] **Dubbeldam J.L.A., Molenaar J.**, Dynamics of the spurt instability in polymer extrusion. *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 112, 217-235 (2003).

Mémoire fin d'étude de master en génie mécanique

Option :Modélisation

Proposé et dirigé par :

Dr.Adel CHINE

Présentée par :

Ghozlene Marwa BOUAZIZ

Thème :

Simulation numérique par la méthode des tubes de courant du gonflement de polymère dans des conduites axisymétrique

Résumé :

Ce travail a pour objectif principal la compréhension, par voie numérique, des écoulements isothermes de polymère (convergent), en relation avec des problèmes industriels comme l'extrusion, l'injection pour les simulations, la méthode des tubes de courant, des approches de différences finies ont été appliquées. Le comportement complexe des fluides, notamment des polymères, nous a conduit à adopter plusieurs lois de comportements de fluides purement visqueux.

Mot clés :Polymère ,Conduite axisymétrique, convergent,méthode des tubes de courant, domaine réel, domaine transformé,polyéthylène, nylon 6,6, extrusion, injection.

Abstract :

This work's main objective is the understanding, by digital means, isothermal flow of polymer different configuration (convergent) in relation to industrial problems such as injection, extrusion. For the simulations, the current tube method, finite difference approaches were applied. The complex behaviour of industrial fluids, including polymers, led us adopt several laws.

Keywords : polyme, conduit, current tube method, convergent, physical domain, transformed domain, nylon 6,6, extrusion, injection.