



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique

Présenté par :

MERZOUGUI Houcem Eddine & BOUGUERRA Mohamed

Thème

Etude rhéologique de la transformation des polymères dans les presses d'injection

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SLAMANI M.	Professeur	Président
BEDDA A.	MAA	Encadreur
ZAQUI M.	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020



REMERCIEMENTS

*Tout d'abord je remercié **Allah** pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour mener à terme notre formation de master et pouvoir réaliser ce travail de recherche*

*Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadreur **Dr. Abdelmalik BEDDA**, pour avoir dirigé cette mémoire et son disponibilité.*

*Nous remercions ainsi Monsieur **ROKBI Mansour**, chef département de génie mécanique et tout le staff enseignants et administratifs qui ont contribué de près ou de loin pour assurer notre formation.*

*Nous souhaitons remercier le professeur **SLAMANI Mohamed** d'avoir accepté de présider le jury, **SAIB Chérif** et monsieur **FARSI Chouki** pour toute l'aide apporté.*

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

MERZOUGUI Houcem Eddine

BOUGUERRA Mohamed

DEDICASES

Je Dédie ce Modest travail

- ♥ *A mes très chère parents **MERZOUGUI AISSA** et **ma mère**, pour leur soutien, leur patience, leur encouragement durant mon parcours scolaire.*
- ♥ *A mon frère **ISSAM** et à **mes deux sœurs***
- ♥ *A mes très chers amis*
- ♥ *A toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers*
- ♥ *En témoignage de ma profonde reconnaissance et de ma très grande affection*

MERZOUGUI Houcem eddine

Résumé

Aujourd'hui, les polymères font partie des matériaux les plus importants pour les usages techniques et dans la vie quotidienne, car les propriétés des polymères peuvent être adaptées de très nombreuses manières pour être utilisées dans presque tous les champs d'application. Outre les polymères naturels, comme les protéines, les amidons, la cellulose, etc., il existe un grand nombre de polymères fabriqués comme le nylon, les silicones, le PVC, le plexiglas, etc. Certains polymères sont durs et cassants, d'autres sont solides et résistants aux chocs alors que d'autres encore sont souples et flexibles. La fabrication et la caractérisation des polymères est donc au centre de beaucoup d'industries et d'instituts de recherche spécialisée.

Les polymères montrent un comportement rhéologique qui doit être pris en compte lors de l'utilisation ou la production de ces types de matières, comme la **viscosité** du produit fondu, la fluidité, les propriétés **viscoélastiques**, le comportement thermique, la **température de vitrification**, le vieillissement, etc. Plusieurs tests et méthodes d'analyse sont utilisés pour optimiser les propriétés du polymère jusqu'à ce qu'il réponde à toutes les exigences.

Les tests rhéologiques sont utiles pour

- Contrôle de qualité des polymères, par exemple en déterminant la **viscosité**, les paramètres **viscoélastiques** et la masse molaire
- Amélioration du comportement du traitement des polymères, par exemple le moulage par injection, l'extrusion, le filage de fibre, etc.
- Optimisation du produit fini (par exemple les matériaux plastiques dans la production automobile).

ملخص

تعد البوليمرات اليوم من بين أهم المواد للاستخدامات التقنية في الحياة اليومية، لأن خصائص البوليمرات يمكن تكييفها بعدة طرق لاستخدامها في جميع المجالات. إلى جانب البوليمرات الطبيعية مثل البروتين والنشا والسليلوز وما إلى ذلك، هناك عدد كبير من البوليمرات المصنوعة مثل النايلون والسيلاكون والـ PVC والزجاج الشبكي وما إلى ذلك. بعض البوليمرات صلبة وهشة، والبعض الآخر قوي ومقاوم للصدمات، بينما لا يزال البعض الآخر طريًا ومرنًا. ولذلك فإن تصنيع البوليمرات وتوصيفها يقع في قلب العديد من الصناعات ومعاهد البحوث المتخصصة.

تُظهر البوليمرات سلوكًا ريولوجيًا يجب أخذه في الاعتبار عند استخدام أو إنتاج هذه الأنواع من المواد، مثل اللزوجة الذاتية، والسيولة، وخصائص اللزوجة المرنة، والسلوك الحراري، ودرجة حرارة التزجيج، والشيخوخة، إلخ.

يتم استخدام العديد من الاختبارات والطرق التحليلية لتحسين خصائص البوليمر حتى يلبي جميع المتطلبات. الاختبارات الريولوجية مفيدة لـ :

- مراقبة جودة البوليمرات، على سبيل المثال عن طريق تحديد اللزوجة ومعايير اللزوجة المرنة والكتلة المولية
- تحسين سلوك معالجة البوليمرات، مثل القولية بالحقن، والبيثق، وغزل الألياف، إلخ.
- تعظيم الاستفادة من المنتج النهائي (مثل المواد البلاستيكية في صناعة السيارات).

Table des matières

Chapitre I. Introduction à l'injection des plastiques	3
I.1. Introduction	3
I.2. Fonctionnement d'une presse à injection et de ses équipements	3
I.4.1. La presse horizontale en ligne	6
Caractéristiques	6
I.4.2. Les presses à injection verticales	7
Caractéristiques :	7
I.5. Le procédé d'injection	8
I.5.1. Étapes précédant l'utilisation des presses d'injection	8
1.5.1.1. Phase d'étude	8
1.5.1.2. Production d'outillages	9
1.5.1.3. Fabrication d'un moule en aluminium ou en acier.	9
I.5.2. Principales caractéristiques techniques des presses :	9
I.5.3. Pièces obtenues :	9
I.6. Les phases d'injection :	9
I.6.1. Phase de plastification	9
I.6.2. La phase de remplissage	10
I.6.3. La phase de compactage (commutation) et maintien	11
I.6.4. Phase d'éjection	12
Chapitre II. Modèles en rhéologie des polymères	13
II.1. Généralités	13
<i>Hypothèses</i>	13
<i>Classification</i>	13
II.2. Propriétés rhéologiques des polymères	14
II.3. Les différents modèles de viscosité	15
II.3.1. Modèle newtonien	15
II.3.2. Modèle Pseudo-plastique	17
II.3.2.1. Loi de puissance	17

II.3.2.2. Modèle de Carreau	19
II.3.2.3. Modèle de Ellis	19
II.3.2.4. Modèle de Cross	20
II.3.2.5. Modèle Pseudo-plastique thermo-dépendant	21
II.3.2.6. Equation d'Arrhenius	22
II.3.2.7. Equation de Williams-Landel-Ferry (WLF)	22
II.3.2.8. Loi de Carreau-Yasuda	23
II.3.2.9. Loi d'Andrade	23
II.3.2.10. Loi de puissance	23
Chapitre III. Viscosimétrie en rhéologie des polymères	25
III.1. Définition de la viscosité	25
III.2. Comportements rhéologiques des fluides	27
III.2.1 Fluides newtoniens et non newtoniens	27
III.2.2 Modélisation d'un écoulement thermoplastique	30
III.3. Viscosité en fonction de la température	32
III.4. Les mesures de viscosité	34
III.4.1. Ecoulement de couette	34
III.4.2. Rhéomètres rotatifs	35
III.4.3. Ecoulement de type poiseuille	41
III.4.4. La filière capillaire	40
III.4.5. Filière plate	41
Conclusion	43
Références bibliographiques	45

Listes des figures

Figure I.1. Schéma d'une presse à injection de plastique horizontale	4
Figure I.2. Schéma d'une presse Horizontale	6
Figure I.3. Presse d'injection plastique verticale	7
Figure I.4. Matière plastique au cours d'un cycle d'injection	8
Figure I.5. Phase de plastification	10
Figure I.6. Phase de remplissage	10
Figure I.7. Phase de compactage et maintien	11
Figure 1.8. Phase d'éjection	12
Figure II.1. Evolution de la viscosité	15
Figure II.2. Viscosité d'un fluide Newtonien	17
Figure II.3. Loi de puissance	18
Figure II.4. Loi de puissance en fonction des températures	18
Figure II.5. Modèle de Carreau	19
Figure II.6. Modèle d'Ellis	20
Figure II.7. Modèle de Cross	21
Figure III.1. Principe du cisaillement laminaire	25
Figure III.2. Mouvement laminaire de cisaillement	26
Figure III.3. Courbes de viscosité caractéristiques	28
Figure III.4. Observations des écoulements	29
Figure III.5. Courbe d'écoulement $\log(\eta) = f(\log(\dot{\gamma}))$, d'un thermoplastique fondu	30
Figure III.6. Profil de distribution des vitesses pour un fluide obéissant à une loi de puissance pour $n = 1$, $n < 1$ et $n = \infty$	31
Figure III.7. $\ln(\eta) = f(\ln(\dot{\gamma}))$	32

<u>Figure III.8.</u> Le système Couette appliqué	34
<u>Figure III.9.</u> L'écoulement Couette au rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux	35
<u>Figure III.10.</u> Le rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux	35
<u>Figure III.11.</u> Profil de distribution des vitesses pour un matériau Newtonien et non Newtonien	36
<u>Figure III.12.</u> Le système plan-plan	37
<u>Figure III.13.</u> Coupe schématique d'un rhéomètre à pression variable	39
<u>Figure III.14.</u> Rhéomètre à filière capillaire	40
<u>Figure III.15.</u> Schéma de la filière plate	42

Introduction

Introduction générale

Il est connu expérimentalement que les polymères fondus ne sont pas newtoniens. Leur viscosité apparente est fonction décroissante du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$; cette propriété est appelée la ***pseudo-plasticité***. L'écoulement du polymère dans un moule ; est généralement en fonction de la section de passage de ce dernier et le refroidissement au contact du parois de moule froid. La basse température du moule par rapport au polymère, augmente la viscosité de ce dernier, la matière aura du mal à se couler, on dit alors que le polymère est visqueux.

La vitesse d'écoulement d'un polymère fondu entre deux bords varie (entre le cœur et la paroi), cette variation est due au caractère visqueux des polymères. La modélisation de l'écoulement du polymère nécessite de trouver des fonctions qui donnent la viscosité en fonction du taux de cisaillement et la température, ces deux derniers sont les paramètres les plus influant.

La rhéologie caractérise à l'état fondu le comportement d'un polymère. Cette technique de caractérisation permet de comprendre le comportement d'un polymère lors de sa mise en forme (procédés de la plasturgie). L'écoulement élongationnel est majoritaire pour certains procédés comme l'extrusion-gonflage. Il est donc important de connaître la rhéologie élongationnelle d'un polymère afin de comprendre son comportement en élongation et de prédire ***sa processabilité***

La rhéologie élongationnelle d'un polymère peut être caractérisée en utilisant un rhéomètre équipé d'un outil qui permet d'imposer une déformation uni-axiale sur l'échantillon. Par exemple, l'outil SER (***Sentmanat Extensional Rheometer***) constitué de deux tambours qui tournent en sens inverse, permet d'appliquer un champ de déformation purement uni-axial. L'échantillon est donc fixé entre les deux tambours pour être étiré à une vitesse fixée dans le rhéomètre, et la résistance à l'étirement permet d'aboutir à la viscosité du polymère.

La viscosité d'un polymère peut servir de paramètre pour déterminer la masse molaire des thermoplastiques par la viscosité intrinsèque.

Les paramètres rhéologiques nous permettent d'ajuster les réglages nécessaires pour les presses d'injection avant de commencer la production en séries des pièces polymères.

L'étude est divisée en trois parties :

La première est une démarche descriptive dont laquelle est présenté la presse d'injection, le processus d'injection ainsi les différentes phases d'injection. Dans cette partie on peut localiser partie de l'injection ou intervienne l'étude rhéologique surtout la zone pseudo-plastique est la filière ainsi que les moules.

La deuxième partie est une démarche bibliographique qui nous à permet de rappeler tous les modèles analytiques de viscosités des de rhéologie des polymères.

La dernière partie décrit les méthodes pratique de détermination des paramètres rhéologiques ainsi le domaine d'intervention de chacune d'entre-elles.

On termine par une conclusion

Chapitre I. Introduction à l'injection des plastiques

Chapitre I. Introduction à l'injection des plastiques

I.1. Introduction

Les machines employées en injection plastique sont des presses à injecter. Elles sont utilisées pour des productions de grandes et très grandes séries allant jusqu'à plusieurs milliers de pièces. Les matériaux principalement employés sont les plastiques et les élastomères, ainsi que des métaux comme l'aluminium et le laiton.

La presse à injecter se compose de plusieurs parties. Voici les principales : buse, plateau mobile, plateau fixe, collier chauffant, trémie d'alimentation, vis sans fin (ou vis de plastification), système d'évacuation, mécanisme de fermeture et console. En outre, il est possible de catégoriser les éléments d'une presse à injecter en deux ensembles principaux.

En 2008 Premièrement, il y a un groupe d'injection plastification. Il permet plusieurs applications comme l'alimentation en granulés et la fusion de la matière, par la suite dosée et injectée sous pression.

Deuxièmement, il y a un groupe de fermeture. Ce dernier permet de verrouiller, ouvrir, fermer le moule et d'éjecter les pièces. Ainsi, il est possible de fusionner la matière et de la transférer dans le moule, l'IRSST a publié un rapport de recherche qui décrit une démarche concrète d'analyse du risque appliquée à une presse à injection de plastique. La démarche est basée sur la norme ISO 14121 :1999. Les moyens de réduction du risque de cette presse ont été analysés et commentés.

Un guide découlant du rapport a également été rédigé. Cependant, les risques liés à l'interaction entre les presses et leurs équipements périphériques (robots, convoyeurs, granulateurs, appareils de levage, escabeaux, escaliers, etc.) sont moins connus des intervenants du milieu et n'ont pas été répertoriés dans le rapport cité ci-dessus. Pourtant, ces risques mènent parfois à des accidents du travail. La présente recherche vise donc à étudier la sécurité des presses à injection ayant des équipements périphériques.

I.2. Fonctionnement d'une presse à injection et de ses équipements

La figure I.1 illustre une presse à injection de plastique horizontale et ses principaux composants.

Une presse à injection de plastique fonctionne généralement de la manière suivante : La trémie est alimentée en granules de plastique, manuellement ou par un système automatisé. Les granules sont acheminés par gravité, via une goulotte d'alimentation, dans le baril d'injection contenant la vis sans fin. Le plastique est fondu par apport de chaleur dans l'unité d'injection (température pouvant atteindre 200°C) et la matière se déplace dans le baril d'injection grâce à la vis sans fin. Cette vis, en translatant vers le moule, sert aussi de piston pour injecter le plastique fondu sous pression dans les empreintes du moule fermé, à travers la buse communiquant avec un orifice de la partie fixe du moule installée sur le plateau fixe. Les empreintes ont une température pour permettre de refroidir le plastique fondu injecté et de le solidifier.

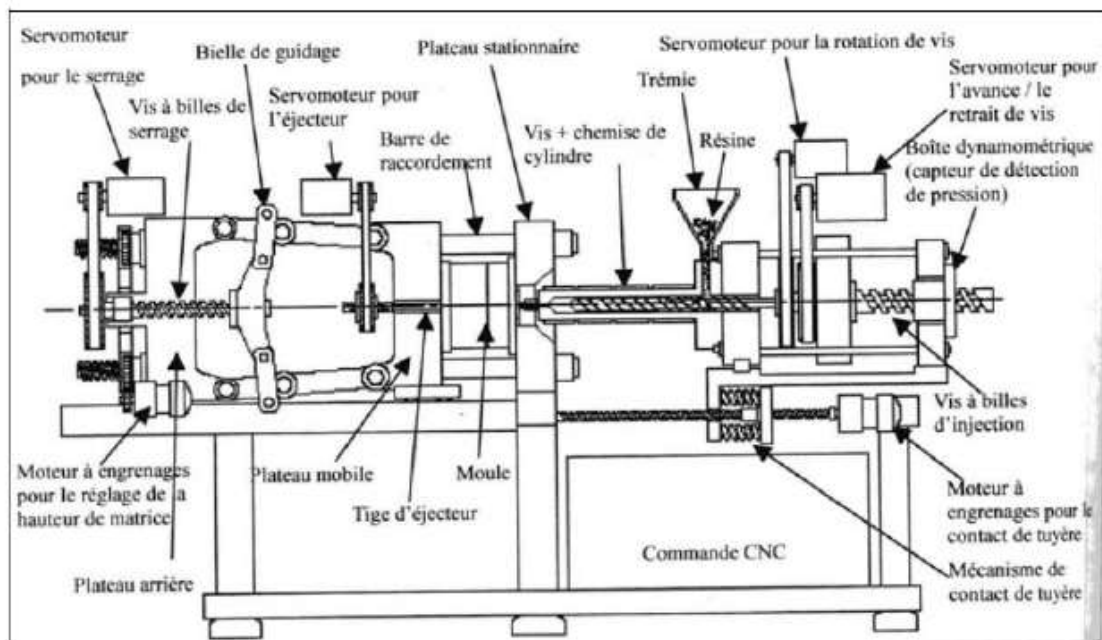


Figure I.1 Schéma d'une presse à injection de plastiques horizontales

Durant le refroidissement des pièces, la vis sans fin translate vers la trémie pour se charger en granules et se préparer pour la prochaine injection. Après un délai prédéterminé laissant aux pièces le temps de se solidifier, le moule s'ouvre.

Une fois le moule ouvert, les éjecteurs sortent pour extraire les pièces moulées ou les décoller afin de faciliter leur extraction par un robot (équipement périphérique).

Une fois les pièces extraites, le mécanisme de fermeture génère le mouvement de fermeture du plateau mobile : la partie mobile du moule se rabat sur sa partie fixe, c'est la fermeture du moule. Le moule fermé est donc prêt à recevoir l'injection de plastique fondu et le cycle

reprend. Comme mentionné plus tôt, les presses à injection de plastique peuvent être utilisées avec des équipements périphériques. *Dobraczynski et Chatain* catégorisent ceux-ci en trois groupes :

- Matériel de robotique, conçu pour le chargement et le déchargement des moules ;
- matériel de traitement des pièces injectées : dispositifs de décarottage, de triage pièce carotte, de comptage et de stockage automatique, convoyeurs et tapis transporteurs... ;
- Matériel de montage, connexion, démontage et stockage des moules. Ces auteurs avancent que le désir d'accroître la productivité et les exigences de qualité expliquent le choix du matériel robotique et du matériel de traitement des pièces.

Il existe des robots-manipulateurs pendulaires ou se déplaçant sur rail. Selon leur nature, ils accèdent à la zone du moule latéralement ou par le dessus (la « zone du moule » désigne l'espace entre les parties mobile et fixe du moule).

Les mouvements du robot, synchronisés avec ceux du moule, sont très rapides pour optimiser la durée du cycle d'injection. Le bras du robot doit quitter la zone du moule avant la fermeture de celui-ci.

Le type de pièces à produire dicte les caractéristiques requises (ex. : type, dimensions) des préhenseurs du robot. Les robots peuvent être pourvus de pinces à mâchoires articulées afin d'extraire les carottes, ou peuvent comporter des ventouses servant à extraire les pièces produites.

Ils peuvent également être destinés à trier les pièces et les carottes, à acheminer directement les carottes dans un granulateur afin de récupérer le plastique et le réutiliser lors d'un processus futur d'injection de plastique.

Les pièces peuvent être déposées sur un convoyeur qui les déverse dans des contenants. Par ailleurs, il existe des dispositifs d'extraction de pièces, apparentés à des robots, mais ne portant pas ce nom en raison de leur asservissement qui diffère complètement de celui des robots. Contrairement à ces derniers, ces dispositifs sont souvent dépourvus de boucle de rétroaction contrôlant continuellement leur position. Quant à l'utilisation du matériel de montage, de connexion, de démontage et de stockage des moules, elle se justifie par le besoin de minimiser le temps de démarrage de la production de pièces.

En effet, ce genre de matériel facilite et accélère la manutention et l'installation du moule sur les plateaux fixe et mobile de la presse. Par exemple, il existe des dispositifs de bridage rapide de moules afin de fixer le moule sur les plateaux. Des chariots équipés d'un plateau à rouleaux peuvent être utilisés pour déplacer et transporter le moule ; il s'agit de chariots ajustables à la hauteur de la presse. Pour les moules plus lourds, un palan muni d'un crochet peut être utilisé. Le palan, comme le pont roulant, est un appareil de levage pouvant servir à manutentionner les moules.

I.3. L'injection plastique

L'injection est le procédé de transformation le plus couramment utilisé dans la plasturgie. Il se décline sous différentes techniques et permet de travailler un très grand nombre de matières, appelées également résines, se trouvant initialement sous forme de granulés ou de poudres.

L'injection consiste à faire **fondre la matière** dans un ensemble vis/fourreau chauffé à une température donnée. L'ensemble de plastification amène le volume de matière nécessaire puis l'injecte dans les empreintes du moule. Après un temps programmé permettant le refroidissement de la matière, le moule s'ouvre et libère les pièces moulées.

I.4. Types de presses

I.4.1. La presse horizontale en ligne

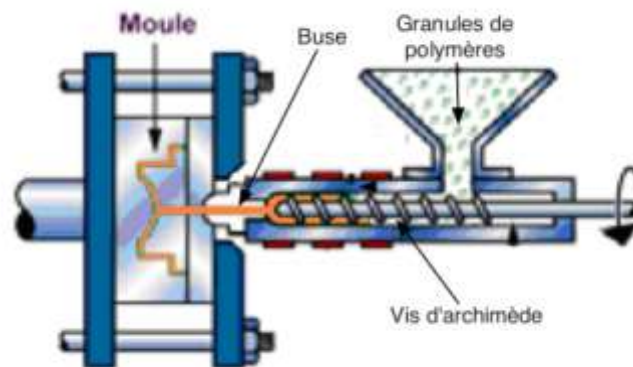


Figure I.2. Schéma d'une presse Horizontale

Caractéristiques

- Encombrante au sol,
- Mais ses organes sont très accessibles,

- Mise en place des moules est aisée
- Ne demande pas de grande hauteur sous plafond.
- Elle se prête bien à l'automatisation de la production (les pièces moulées tombent naturellement par gravité)
- Il suffit de vaincre les forces de frottement lors du déplacement de la partie mobile du moule (mouvements d'ouverture et de fermeture rapides)
- Le plus répandu (facilités d'automatisation et des cadences élevées possibles.)

I.4.2. Les presses à injection verticales



Figure I.3. Presse d'injection plastique verticale

Caractéristiques :

- A un encombrement au sol limité
- La hauteur peut devenir gênante
- Stabilité laissée à désirer.
- Mise en place du moule est pénible,
- Le chargement de la trémie peu facile
- Les organes supérieurs sont peu accessibles.
- Les cadences élevées ne sont guère possibles (il faut soulever le lourd plateau mobile à chaque cycle) ; l'automatisation est plus difficile

- Pratiquement ce type de machine garde son intérêt dans les fabrications de pièces avec insertions, car le moule est très accessible et les prisonniers tiennent souvent en place par gravité.
- Les surmoulages sont également facilités
- Ainsi que la fabrication de certaines pièces de précision (usure moins rapide des guidages du plateau mobile).

I.5. Le procédé d'injection

L'alimentation en matière plastique sous forme de granulés est assurée par la trémie. Ensuite, la chaleur présente dans l'unité d'injection fait fondre la matière plastique (la température peut aller jusqu'à 200°C). La vis sans fin permet par la suite de déplacer la matière dans le baril d'injection. Elle sert également à injecter le plastique liquide sous pression à l'intérieur du moule.

Cette injection se déroule en deux parties, la phase d'injection dynamique et la phase de maintien. La matière est insérée dans les empreintes du moule où elle refroidit pour se solidifier. En parallèle, la matière est déplacée de la trémie vers la vis sans fin pour permettre la prochaine injection. Après le refroidissement, les pièces sont extraites du moule au moyen des éjecteurs.

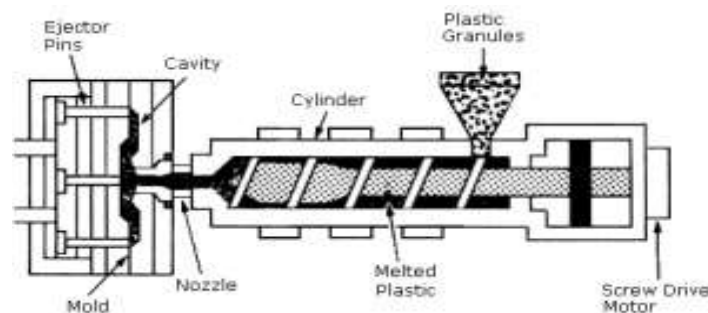


Figure I.4. Matière plastique au cours d'un cycle d'injection

Après extraction des pièces, la partie mobile du moule se ferme sur la partie fixe au moyen du mécanisme de fermeture du plateau mobile. Un nouveau cycle peut être réalisé.

I.5.1. Étapes précédant l'utilisation des presses d'injection

1.5.1.1. Phase d'étude

- Analyse des plans des pièces selon plusieurs critères (plan de joints, dépouilles, fermetures...)
- Réalisation du plan d'outillage (les fichiers 2D et 3D) selon le cahier des charges souhaité.

1.5.1.2. Production d'outillages

1.5.1.3. Fabrication d'un moule en aluminium ou en acier

- Test de l'outillage dans un centre d'injection et mise au point si nécessaire.
- Production des pièces en grande quantité grâce à une presse d'injection.

1.5.2. Principales caractéristiques techniques des presses

- Tonnage de la capacité de production.
- Presse à injecter ou presse à surmouler.
- Presse horizontale ou presse verticale.
- Forces de fermeture en K_n .
- Solution hydraulique ou solution électrique.

1.5.3. Pièces obtenues

Les pièces réalisées en injection thermoplastique sont des pièces séries. Fabriquées avec la vraie matière, elles offrent une bonne finition. Elles sont visuelles et fonctionnelles. L'injection plastique est utilisée pour divers secteurs comme l'automobile ou l'électroménager.

1.6. Les phases d'injection :

On peut distinguer quatre phases principales pendant le cycle d'injection

1.6.1. Phase de plastification

La phase de plastification a pour objectif de faire passer le polymère de l'état solide (sous forme de granulé) à l'état fondu. Cette transformation est réalisée par l'ensemble vis-fourreau dont la fonction est de broyer et de chauffer le granulé pour l'amener peu à peu à l'état fondu. Pour cela, la vis de l'unité possède un mouvement de rotation pour permettre l'auto échauffement de

la matière par malaxage, et de translation pour stocker à l'avant du fourreau la quantité de matière à injecter dans la cavité de moule (Figure 1.5)

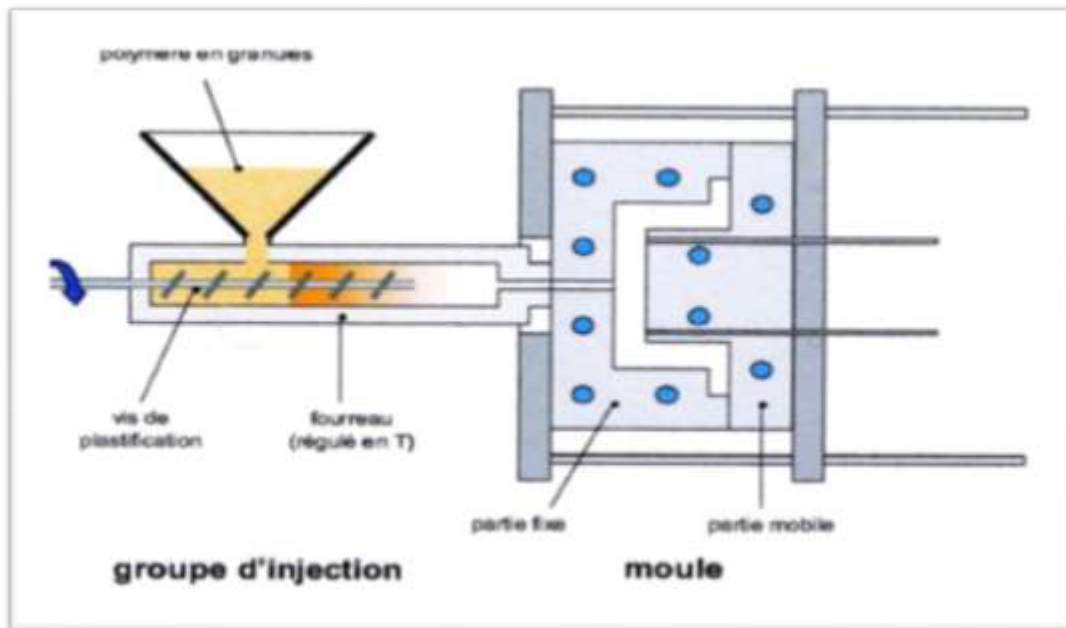


Figure I.5. Phase de plastification

I.6.2. La phase de remplissage

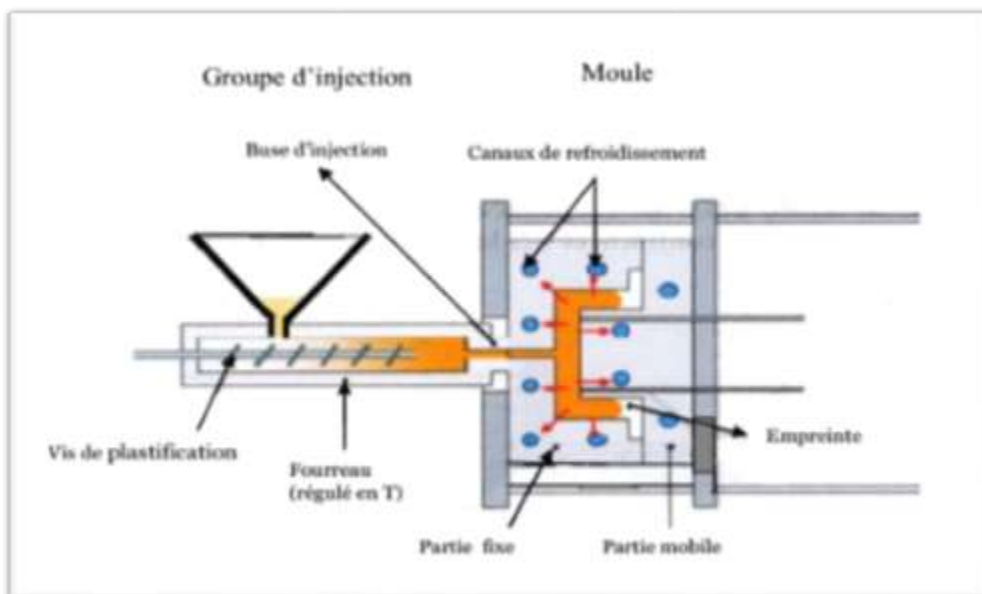


Figure I.6. Phase de remplissage

Une fois la matière accumulée en tête de fourreau, celle-ci est injectée dans l'empreinte de l'outillage par une avancée de la vis. Cette phase de cycle de transformation est appelée phase dynamique de remplissage. L'avancée de la vis est régulée en débit ou en pression pour maîtriser la vitesse d'injection du thermoplastique dans l'empreinte. Ce remplissage a une durée très courte, par rapport à celle de refroidissement (Figure 1.6).

I.6.3. La phase de compactage (commutation) et maintien

La commutation est l'instant clé du procédé d'injection. Il s'agit de l'instant de transition entre la phase de remplissage dynamique et la phase de maintien. A cet instant le pilotage de l'injection passe d'une régulation en vitesse à une régulation en pression. En générale, on choisit de commuter au moment où l'empreinte est complètement remplie. Cet instant est notifié par la présence d'un pic de pression d'injection prononcé. Cet événement est alors utilisé pour déclencher la commutation.

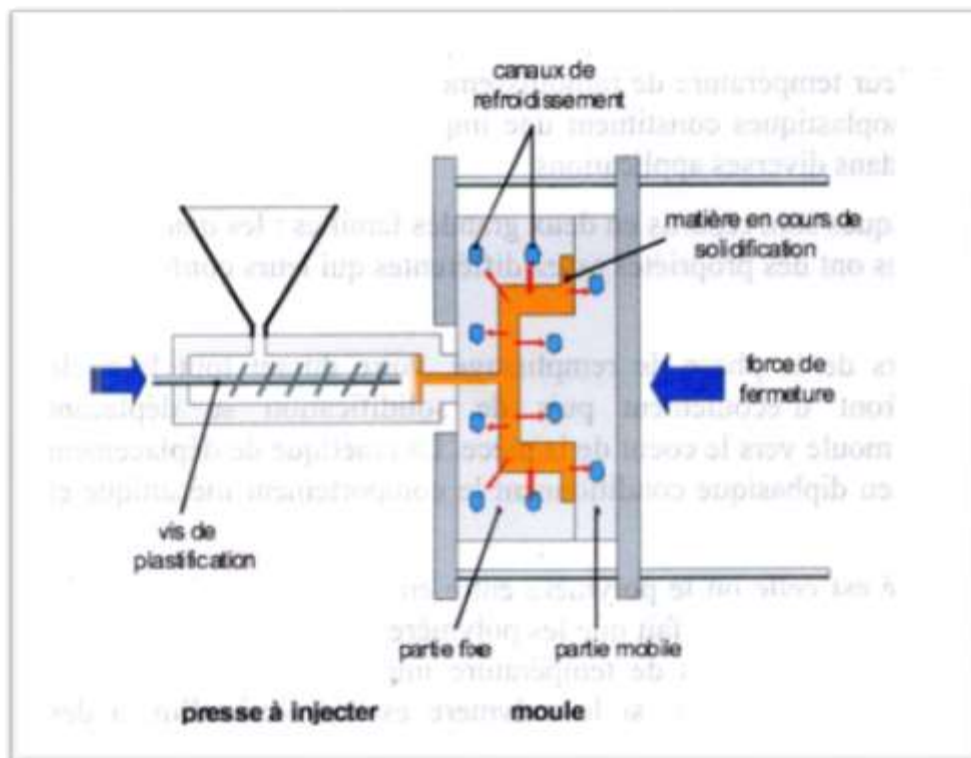


Figure I.7. Phase de compactage et maintien

Dès lors où la commutation est enclenchée, la presse applique au niveau des blocs d'injection une consigne de pression de maintien. Ceci a pour objectif de maintenir la matière dans la cavité pour compenser de retrait volumique dus au refroidissement de la matière (*Figure 1.7*)

I.6.4. Phase d'éjection

La vis de plastification recule avant de commencer un nouveau dosage de matière en vue du cycle suivant, cette opération a pu commencer dès la fin du compactage (*Figure 1.8*)

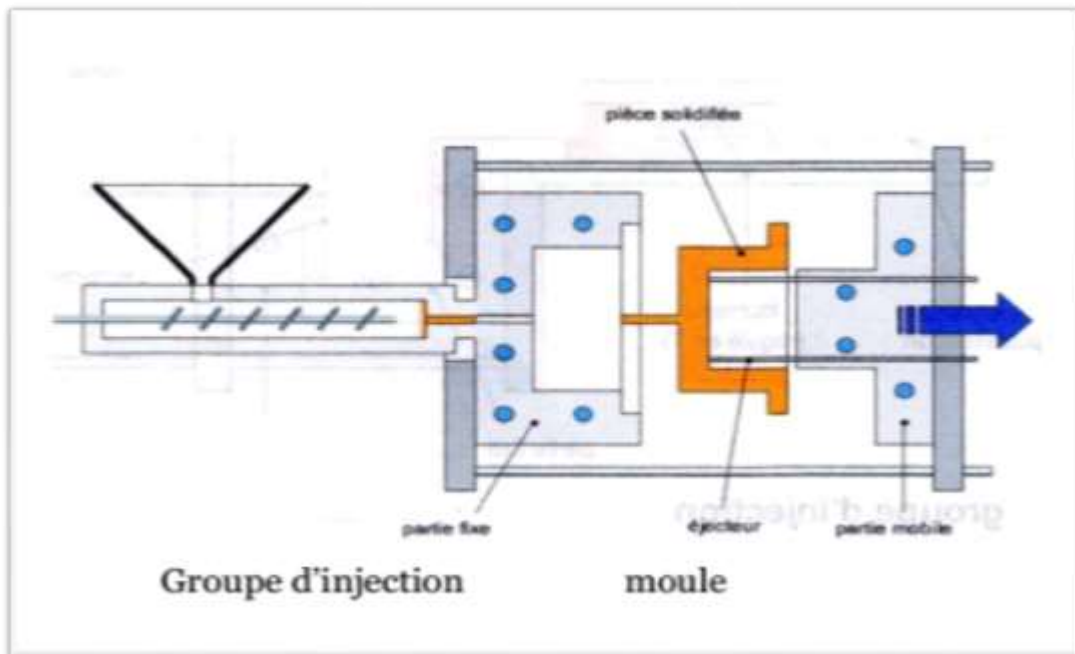


Figure 1.8. Phase d'éjection

Chapitre II. Modèles en rhéologie des polymères

Chapitre II. Modèles en rhéologie des polymères

II.1. Généralités

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées en tenant compte du temps (ou vitesse d'application de contraintes). Plus généralement, elle étudie la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps dans le matériau

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, ...) ou de la mise en forme des pièces (en métallurgie, en **plasurgie** etc....) nécessitent inmanquablement l'étude de l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de la matière pour déterminer les forces mises en jeu.

Hypothèses

- Le matériau est continu (pas de vide dans le matériau).
- Chaque point du corps se déplace de façon continue.
- Deux points du corps infiniment voisins avant la déformation le sont encore après la déformation.
- Les propriétés physiques du corps varient d'une façon continue d'un point à un autre.

Classification

- La rhéologie expérimentale : elle détermine expérimentalement la relation de comportement entre les contraintes et la vitesse de déformation.
- La rhéologie structurale : elle explique le comportement du matériau à partir de sa structure.
- La rhéologie théorique : elle fournit des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

Les corps se divisent en deux classes :

Les fluides newtoniens : ce sont tous les gaz et un grand nombre de liquides ; leur équation rhéologique est simple ces corps ne possèdent qu'une caractéristique rhéologique : la viscosité

Corps à équation rhéologique compliquée : ce sont des liquides *non newtoniens* et les solides. Dans le cas des polymères, la rhéologie n'étudie donc que les déplacements qui sont grands par rapport à la taille des macromolécules. Les mouvements intramoléculaires et l'enchevêtrement des chaînes sont des mouvements que la rhéologie par nature ne peut pas décrire. En revanche, ces mouvements locaux sont à la base de l'explication du comportement rhéologique des polymères fondus.

La viscosité est un paramètre très important dans l'étude de l'écoulement du polymère, cette dernière qui est d'environ 106 à 108 fois celle de l'eau, est fonction de certains paramètres qui sont :

1. Le poids moléculaire du polymère ;
2. La température ;
3. La pression ;
4. Le taux de cisaillement ;

La viscosité est une mesure de la friction interne d'un liquide. Pour la déterminer, on applique une force mesurable sur le liquide et l'on mesure en même temps la vitesse de déformation, ou vice versa.

Étudions le comportement d'un polymère fluide simple (un fluide newtonien dont la viscosité ne dépend pas de la vitesse de cisaillement) soumis à une contrainte.

II.2. Propriétés rhéologiques des polymères

Certains liquides n'obéissent pas à la loi de Newton. Il est connu expérimentalement que les polymères fondus ne sont pas newtoniens. Leur viscosité apparente est fonction décroissante du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$; cette propriété est appelée la pseudo-plasticité.

L'écoulement du polymère dans un moule ; est généralement en fonction de la section de passage de ce dernier et le refroidissement au contact du parois de moule froid.

La basse température du moule par rapport au polymère, augmente la viscosité de ce dernier, la matière aura du mal à se couler, on dit alors que le polymère est visqueux. La vitesse d'écoulement d'un polymère fondu entre deux bords varie (entre le cœur et la paroi), cette variation est due au caractère visqueux des polymères.

La modélisation de l'écoulement du polymère nécessite de trouver des fonctions qui donnent la viscosité en fonction du taux de cisaillement et la température, ces deux derniers sont les paramètres les plus influents (*objectif du chapitre III*).

La figure (II.2) donne des courbes typiques de la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement et de la température.

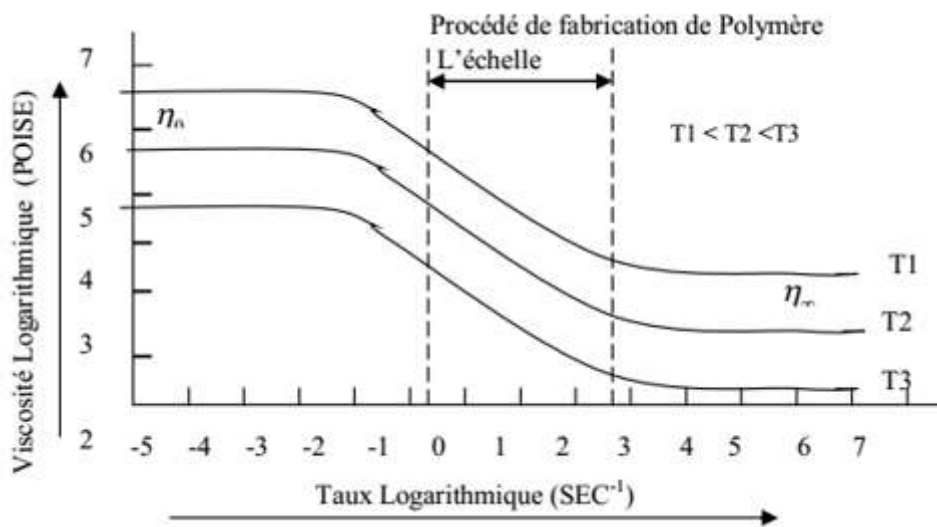


Figure II.1. Evolution de la viscosité

II.3. Les différents modèles de viscosité

II.3.1. Modèle newtonien

Un fluide est dit newtonien si sa viscosité ne dépend pas de la contrainte appliquée.

Exemple : eau, la plupart des solvants, huiles minérales, gaz rares....etc. Le cas d'un fluide newtonien contenu entre deux plateaux) le plateau inférieur est fixe. La force F nécessaire pour animer le plateau supérieur d'une vitesse u est proportionnelle à cette vitesse. $F=Ku$

Les composantes du vecteur vitesse sont les suivantes :

$$\vec{u} \begin{cases} u = \dot{\gamma} \cdot y \\ v = 0 \\ w = 0 \end{cases}$$

Cette force rapportée à la surface sur laquelle elle s'exerce est la contrainte de cisaillement

$$\tau = \frac{F}{S} \qquad \dot{\gamma} = \frac{u}{h}$$

Proportionnelle à la vitesse de cisaillement :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Le coefficient de proportionnalité entre τ et $\dot{\gamma}$ s'appelle la viscosité dynamique

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Loi de Newton})$$

Si, pour une substance newtonienne quelconque, on trace le graphe représentant la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse, on obtient une droite qui passe par l'origine. Ce graphique est un rhéogramme (*figure II.2.a*).

La viscosité représentée en fonction du gradient de vitesse donne une droite parallèle à l'axe des abscisses (*figure II.2.b*).

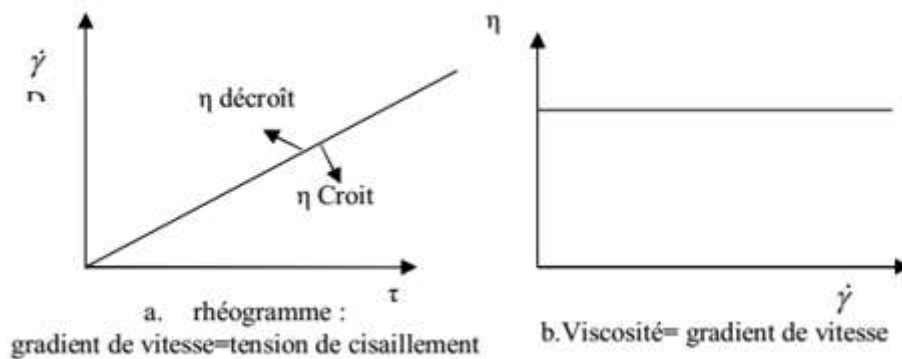


Figure II.2. Viscosité d'un fluide Newtonien

II.3.2. Modèle Pseudo-plastique

La plupart des polymères n'ont pas un comportement newtonien. Cela signifie que leur viscosité n'est pas indépendante de la vitesse de cisaillement mais décroît en fonction de la vitesse de cisaillement.

La pseudo-plastique est la propriété d'un matériau qui exprime le fait que la viscosité soit une fonction décroissante du taux de cisaillement.

Les modèles rhéologiques proposés sont :

II.3.2.1. Loi de puissance

Le premier modèle de comportement pour un fluide non gazéifié a été développé par Ostwald et de Waele.

Le modèle est basé sur l'observation d'une plage linéaire de la viscosité en fonction du taux de cisaillement sur un graphique log-log (Fig.II.4)

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \left[\frac{\dot{\gamma}}{2} \right]^{(n-1)/2}$$

En cisaillement pur

$$(\dot{\gamma} = 2 \cdot \dot{\gamma}^2)$$

Ce qui conduit au modèle suivant :

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

K : est la consistance du liquide [N.sec²/m²]

n : indice de pseudo-plasticité.

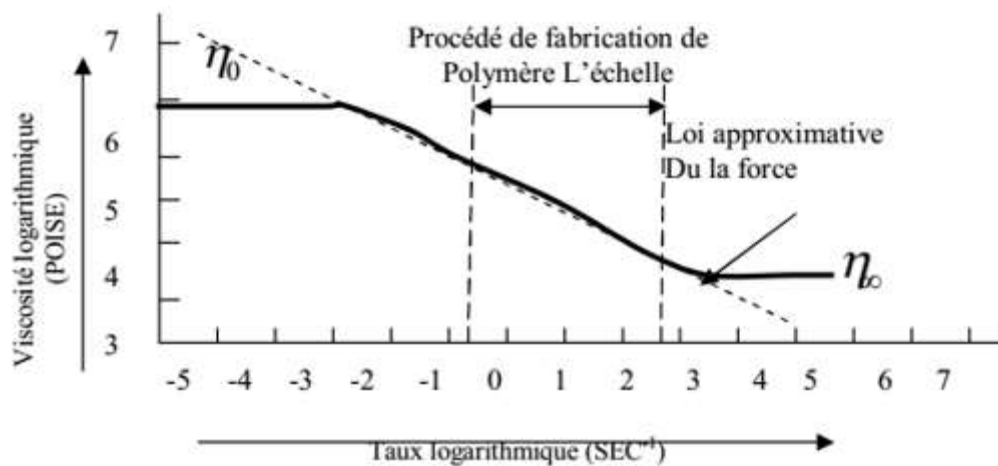


Figure II.3. Loi de puissance

La relation entre η et $\dot{\gamma}$ est en général représenté en échelles logarithmiques, la loi de puissance se traduisant alors par une droite de pente $n-1$ (Fig.II.4).

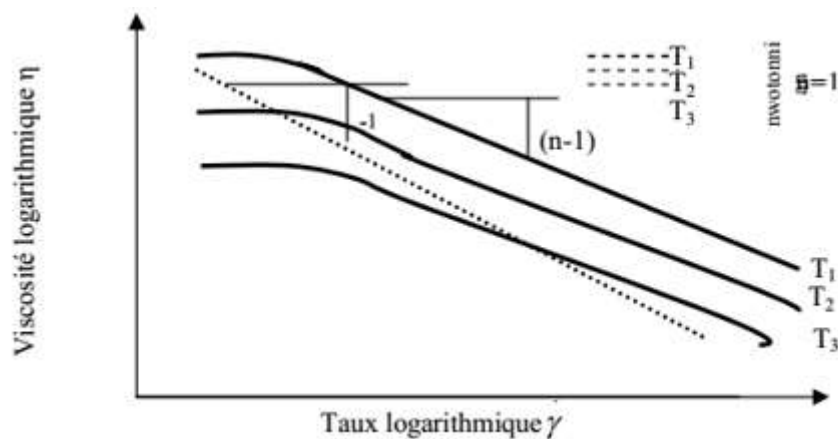


Figure II.4. Loi de puissance en fonction des températures

II.3.2.2. Modèle de Carreau

Le modèle 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-a-d 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

$$\eta = \eta_0 \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$

charge ce plateau, son modèle s'écrit :

η_0 : viscosité à cisaillement nul.

λ : constante de temps.

n : indice de la loi de puissance.

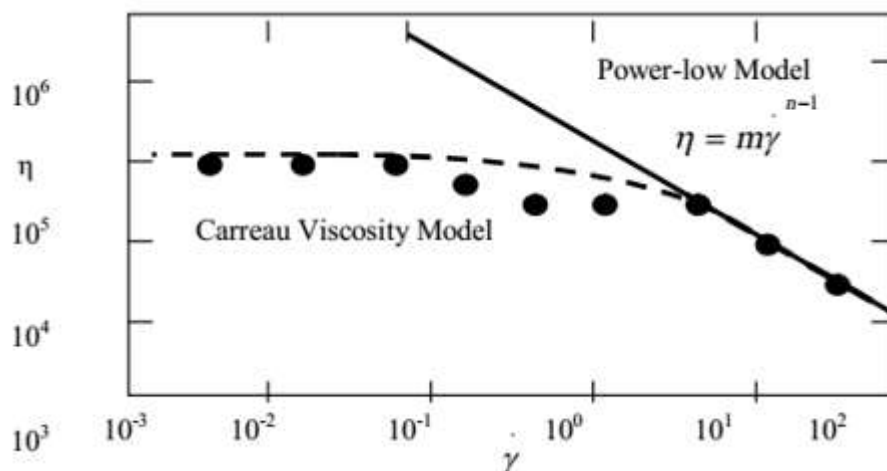


Figure II.5. Modèle de Carreau

II.3.2.3. Modèle de Ellis

Le modèle d'Ellis exprime la viscosité en fonction du taux de cisaillement. Son équation de comportement est plus difficile à utiliser que celle de la loi de puissance, mais elle y est supérieure, car elle prédit un plateau Newtonien à faible cisaillement.

$$\frac{\eta_0}{\eta(\tau)} = 1 + \left[\frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right]^{(\alpha-1)}$$

η_0 : viscosité à cisaillement nul.

$\tau_{1/2}$: taux de cisaillement à $\eta_0/2$.

$\alpha-1$: pente de $\log[\eta_0/2-1]$ versus $\log(\tau/\tau_{1/2})$ Ce qui conduit au modèle suivant

$$\tau = \eta(\tau) \cdot \dot{\gamma}$$

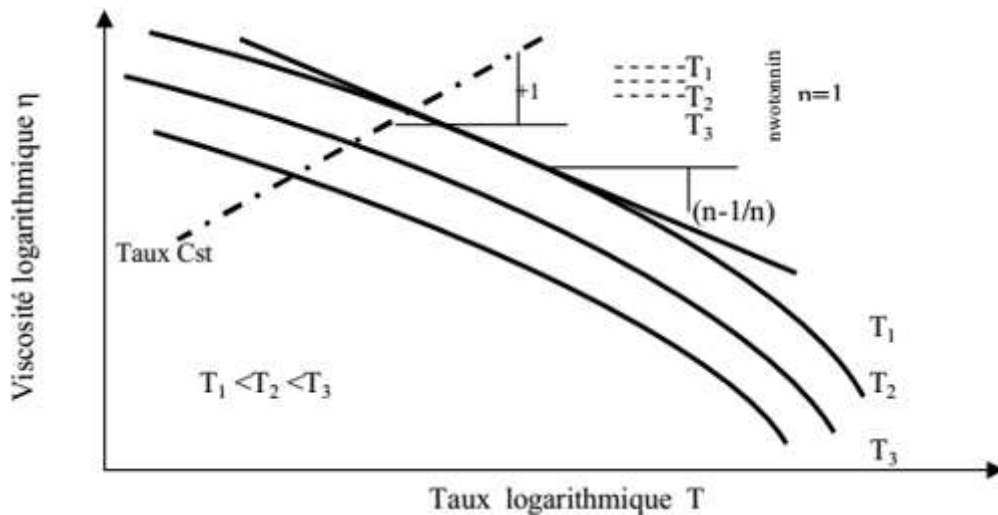


Figure II.6. Modèle d'Ellis

II.3.2.4. Modèle de Cross

Le modèle de cross est une variante du modèle carreau, il s'écrit :

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 + |\lambda \dot{\gamma}|^{1-n}}$$

Sous une autre forme :

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-n)}}$$

τ^* : taux de cisaillement marquant le début de la zone de pseudo-plasticité.

On trouve sur la figure suivante, trois courbes expérimentales de viscosité ainsi que trois courbes calculées à partir du modèle de cross pour une résine de PS.

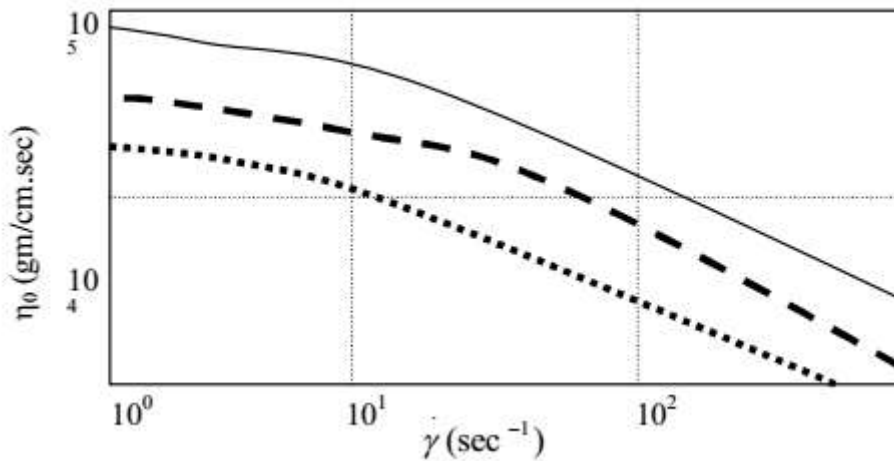


Figure II.7. Modèle de Cross

II.3.2.5. Modèle Pseudo-plastique thermo-dépendant

Le modèle pseudo-plastique thermo-dépendant tient compte de la variation de la viscosité en fonction du taux de cisaillement et de la température. Une augmentation de température résulte en une diminution de la viscosité dû à l'augmentation de mobilité des chaînes de polymères. En règle générale la viscosité des polymères amorphes est plus sensible aux variations de la température que la viscosité des polymères semi-cristallins.

Afin d'étudier l'effet de la température sur la viscosité, il est intéressant de présenter le graphique de la viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement pour différentes valeurs de la température (*Fig.II.1, Fig.II.4, Fig.II.6*).

Il est donc possible de faire glisser toutes les courbes de viscosité le long d'une ligne à un taux de cisaillement constant pour obtenir une courbe unique (à une température de référence). On peut utiliser le facteur de glissement a_T est une fonction de la température, il représente l'écart entre une courbe de viscosité à la température T et la courbe de viscosité à la température de référence.

Le facteur de glissement a_T est une fonction de la température et il peut être calculé à partir d'une *Loi d'Arrhenius* pour les polymères semi-cristallins ou de l'équation WLF

(*Williams-Landel-Ferry*) pour les polymères amorphes à une température entre T_g et $T_g+1000c$.

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_{ref})}$$

$$a_T = \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$$

a_T : facteur de glissement.

E (J/mol) : énergie d'activation.

$R = 8.31$ (J. mol⁻¹. K⁻¹) : constante molaire des gaz parfaits.

T : température.

T_{ref} : température de référence.

II.3.2.6. Equation d'Arrhenius

$$\eta = \eta_{T_{ref}} \cdot \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$$

II.3.2.7. Equation de Williams-Landel-Ferry (WLF)

$$a_T = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_{ref})} = \exp\left[\frac{-c_1(T - T_0)}{c_2(T - T_0)}\right]$$

On peut utiliser deux séries de coefficient (c_1 et c_2) en fonction de la température de référence utilisée :

$$T_0 = T_g \quad c_1 = 17.44 \quad c_2 = 51.6$$

Ou

$$T_0 = T_g + 43 \quad c_1 = 8.86 \quad c_2 = 101.6$$

II.3.2.8. Loi de Carreau-Yasuda

$$\eta_{T_{réf}}(\dot{\gamma}) = \eta_0 \left(1 + \left(\lambda \dot{\gamma} \right)^b \right)^{(m-1)/b}$$

Pour obtenir la viscosité à d'autres températures, nous utilisons le principe de superposition temps-température

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = a_T \eta_{T_{réf}}(\dot{\gamma} a_T)$$

T : la température de la matière

II.3.2.9. Loi d'Andrade

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

T : température

E : énergie d'activation.

R : constante des gaz parfaits.

η_0 : constante.

II.3.2.10. Loi de puissance

Pour exprimer cette propriété on considère que le consistance k du polymère dépend de la température suivant la fonction suivante :

$$k = A \exp(CT)$$

La viscosité est donnée par :

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = A \exp(CT) |\dot{\gamma}|^B$$

A,B et C sont des constantes du matériau

T : la température de la matière.

Une autre forme en tangente hyperbolique

:

$$\eta = \eta_0(T) \exp \left[\alpha(T) \operatorname{th} \left[\beta(T) \operatorname{Ln} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right] \right]$$

$$\operatorname{Ln} \eta = \operatorname{Ln} \eta_0 + \alpha(T) \operatorname{th} \left[\beta(T) \operatorname{Ln} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right]$$

Chapitre III. Viscosimétrie en rhéologie des polymères

Chapitre III. Viscosimétrie en rhéologie des polymères

III.1. Définition de la viscosité

La viscosité de cisaillement, plus couramment appelée "viscosité", caractérise la résistance au glissement opposée par deux couches de substance, proches l'une de l'autre, lorsqu'elles sont soumises à une contrainte appliquée dans leur plan (*figure III.1*).

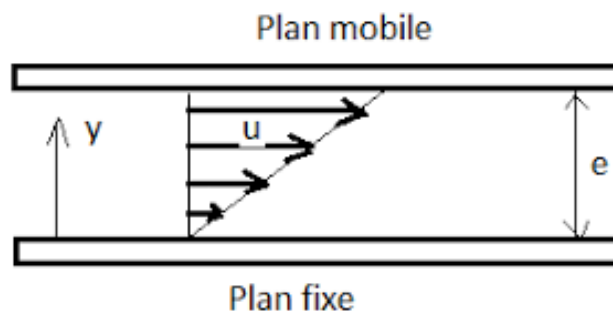


Figure III.1. Principe du cisaillement laminaire

D'un point de vue dynamique, les écoulements sont classés d'après la valeur du nombre de Reynolds définie par :

$$Re = \frac{\rho V_{moy} D}{\eta}$$

ρ : masse volumique du fluide kg.m^{-3}

V_{moy} : vitesse moyenne du fluide dans l'écoulement m.s^{-1}

D : diamètre de la conduite m

η : viscosité

Durant le mouvement laminaire de cisaillement, c'est-à-dire sans turbulence (nombre de Reynolds inférieur à 2100 [3.1]), le matériau présente une structure en lamelles, par couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces. La déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre. Il s'agit d'un mouvement strictement ordonné qui se produit sans brassage de matériau et sans variation de son volume. C'est un écoulement stationnaire dont la vitesse est stable pour tous les points du système considéré.

En hydrodynamique, l'écoulement dans un tube devient turbulent lorsque Re dépasse **2100** à **10000** (terme d'inertie $\rho V_{moy} D$ supérieur au terme de viscosité η). Re est généralement inférieur à **0.1** [3.2] lors de la transformation industrielle des polymères fondus et les termes d'inertie sont négligeables par rapport aux valeurs exceptionnellement hautes de viscosité (**102** à **105 Pa.s**).

Les conditions d'écoulement qui permettent des mesures précises de viscosité sont remplies quels que soient les cas envisagés. Le nombre de Reynolds n'est donc pas un indicateur suffisant pour caractériser l'écoulement des polymères fondus. Ainsi, il ne permet pas de rendre compte des phénomènes de rupture se produisant en sortie de filière.

La contrainte tangentielle résulte de l'application de la contrainte τ (figure III.2) qui provoque le déplacement laminaire des couches fluides. Elle est définie comme le rapport de la force F sur la surface S .

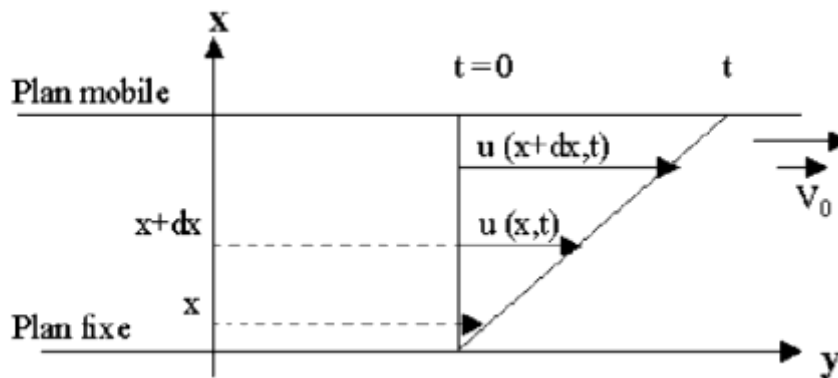


Figure III.2. Mouvement laminaire de cisaillement

$$\tau = \frac{F}{S}$$

F : force **N**

S : surface **m²**

τ : contrainte de cisaillement **N.m⁻²** ou **Pa**

La vitesse maximale de l'écoulement est située à la limite supérieure et décroît à travers entrefer y jusqu'à la vitesse minimale $V_{min} = 0$ (**m.s⁻¹**), limite inférieure correspondant au contact avec la plaque fixe (figure III.2). Le gradient de vitesse g est défini par :

$$\dot{\gamma} = dv/dy$$

dv : variation de vitesse m.s⁻¹

dy : variation de l'entrefer m

$\dot{\gamma}$: gradient de vitesse s⁻¹

Le fluide se comporte ainsi comme une série de couches parallèles dont les vitesses sont proportionnelles à leurs distances du plan fixe. Deux grandeurs rhéologiques sont couramment employées : la viscosité dynamique η et la viscosité cinématique ν . Le coefficient de viscosité dynamique est relié à la loi de *NEWTON* qui exprime la proportionnalité existante entre la contrainte et le gradient de vitesse par la relation :

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

La viscosité cinématique est une grandeur qui doit son origine à des dispositifs de mesure utilisant un temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur

Elle est égale au rapport de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide considéré :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

ν : viscosité cinématique m².s⁻¹

III.2. Comportements rhéologiques des fluides

La rhéologie se limite aux déformations mécaniques, isothermes, macroscopiques et stationnaires. Si, sous l'action d'une force appliquée constante, la déformation augmente sans cesse, il y a écoulement. Il est du type plastique lorsque les forces appliquées sont supérieures à un seuil critique τ_c pour que l'écoulement se produise. Si le seuil est nul, c'est un écoulement visqueux qui correspond évidemment à une déformation permanente irréversible.

III.2.1 Fluides newtoniens et non newtoniens

Pour un fluide Newtonien, la courbe de viscosité est une droite comme l'illustre la courbe n°1 de la *figure III.3*. Ceci sous-tend que la viscosité n'est pas affectée par la variation du gradient

de vitesse. Tous les liquides dont le comportement répond à cette caractéristique sont dénommés "Newtoniens".

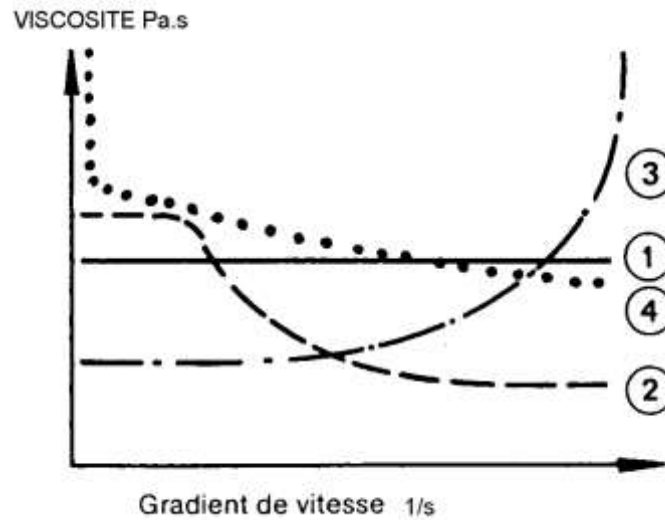


Figure III.3. Courbes de viscosité caractéristiques

- Fluides Newtoniens (courbe 1)
- Fluides rhéofluidifiants (courbe 2)
- Fluides rhéoépaississants (courbe 3)
- Fluides plastiques (courbe 4)

De nombreux autres liquides ne présentent pas ce comportement simple lors de l'écoulement, leurs viscosités, dites "apparentes", dépendent du gradient de vitesse. Ils sont dits "non Newtoniens" et peuvent être divisés en trois catégories : les fluides rhéofluidifiants, rhéoépaississants et plastiques.

Le fluide rhéofluidifiant est caractérisé par une diminution de la viscosité lorsque le gradient de vitesse augmente (figure III.3, courbe n°2). Les émulsions, les suspensions, les dispersions et les polymères fondus appartiennent à ce groupe.

Ces matériaux présentent au repos une structure organisée qui provoque une résistance à l'écoulement. La figure 4 montre que l'accélération de l'écoulement force les constituants à s'orienter de façon parallèle entre eux. L'ensemble oppose ainsi une résistance moindre à l'écoulement d'où une viscosité moins importante.

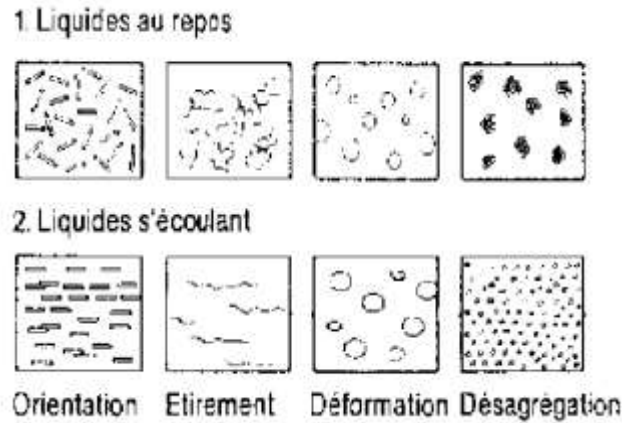


Figure III.4. Observations des écoulements

La viscosité d'un matériau rhéoépaississant s'élève lorsque le gradient de vitesse augmente (*figure III.3*, courbe n°3). C'est le cas des suspensions aqueuses de concentration élevée (fraction volumique supérieure à 0.5). Au repos, chaque particule est entourée d'une mince couche de liquide. Lors du cisaillement, des zones "sèches" dues à l'insuffisance de phase continue apparaissent à la surface des particules et créent des forces de frottements dont l'intensité augmente avec le cisaillement. Il en résulte une augmentation de la viscosité.

Enfin, les matériaux plastiques présentent le comportement soit d'un solide, soit d'un liquide selon la contrainte de cisaillement qui est imposée. Ce sont des dispersions qui, au repos, forment un réseau de forces par des liaisons intermoléculaires et inter-particules (*polaires* ou *Van Der Waals*).

Ces forces limitent le changement de position des éléments du volume et donnent à la substance un comportement de solide ayant une viscosité infiniment élevée (*figure III.3*, courbe n°4). Lorsque les forces extérieures appliquées surpassent les forces du réseau, le dépassement du seuil de contrainte τ_c , ou seuil d'écoulement, force les éléments du volume à changer irréversiblement de position. Il en résulte un effondrement du réseau qui correspond à la transition solide-liquide.

Remarques :

Les trois comportements rhéofluidifiant, rhéoépaississant et thermoplastique sont dépendants du temps d'application de la contrainte.

III.2.2 Modélisation d'un écoulement thermoplastique

Les polymères thermoplastiques possèdent deux régions où la viscosité est indépendante du gradient de vitesse (figure III.5).

Ces deux zones, dites première (zone I) et deuxième (zone III) région Newtonienne correspondent respectivement à des gradients de vitesse très faibles (inférieurs 10^{-2} s^{-1}) et très élevés (supérieurs à 10^8 s^{-1}).

Elles sont caractérisées par les coefficients de viscosité "Newtonienne" η_0 (viscosité à cisaillement nul) et η_∞ (viscosité à cisaillement infini).

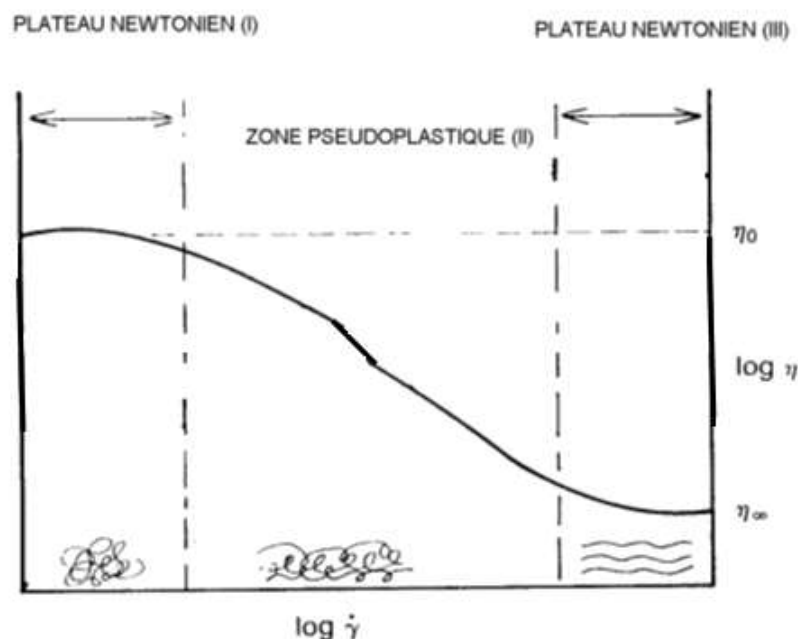


Figure III.5. Courbe d'écoulement $\log(\eta) = f(\log(\dot{\gamma}))$, d'un thermoplastique fondu

La région intermédiaire correspond à une **région rhéofluidifiante** (ou pseudo-plastique) (zone II) pour laquelle la viscosité diminue avec l'augmentation du gradient de vitesse. En effet, pour les bas gradients de vitesse, la contrainte de cisaillement générée est trop faible pour modifier la structure du polymère, la viscosité η_0 est donc constante. Par contre, la contrainte nécessaire pour atteindre les gradients de vitesse moyens désenchevêtre les structures macromoléculaires qui s'orientent dans le sens de l'écoulement et provoquent le phénomène de rhéofluidification. Enfin, pour les hauts gradients de vitesse, l'ensemble des structures moléculaires est orienté dans le sens de l'écoulement et n'est plus affecté par une augmentation de la vitesse de cisaillement. La viscosité η_∞ demeure donc constante

Lorsque le domaine de cisaillement exploré n'est pas très large, le comportement pseudo-plastique des thermoplastiques fondus est représenté par une loi de puissance :

$$\tau = K \left(\dot{\gamma} \right)^n$$

K : consistance Pa.sⁿ,

n : indice de pseudo-plasticité sans dimension

Cette loi est suivie lorsque l'indice de pseudo-plasticité **n** est constant sur une plage de gradient de vitesse. Elle est suivie pour les deux plateaux Newtoniens et pour la zone pseudo-plastique (**n < 1**). Cet indice varie par contre lors de la transition entre ces zones. L'indice de pseudo-plasticité mesure l'écart du matériau par rapport à un comportement Newtonien et permet de caractériser trois types de fluides : **n = 1** pour un fluide Newtonien, **n < 1** pour un fluide rhéofluidifiant et **n > 1** pour un fluide rhéoépaississant.

La (**figure 6**) illustre l'influence de **n** sur le profil de distribution des vitesses pour un écoulement capillaire.

Le profil des vitesses est parabolique pour un écoulement Newtonien ($V_{max}=2 V_{moy}$) [3.3] et devient progressivement équivalent à celui d'un réacteur piston lorsque **n** diminue. Ce cisaillement plus important à la paroi pour les matériaux rhéofluidifiants favorise les échanges de chaleur par convection [3.4].

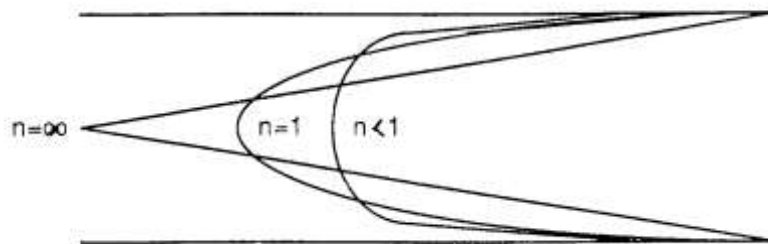


Figure III.6. Profil de distribution des vitesses pour un fluide obéissant à une loi de puissance pour $n = 1$, $n < 1$ et $n = \infty$ [3.5]

Pour sa part, la consistance K varie avec la température suivant une loi du type Arrhenius [3.6] et [3.7] :

$$K = K_0 e^{-E_k / RT}$$

E_k : énergie d'activation $J.mol^{-1}$

R : constante des gaz parfaits $8.31 J.mol.K^{-1}$

T : température absolue K

K_0 : constante $Pa.s^n$

Cette loi traduit la dépendance thermique de la consistance K . La loi de puissance ne peut cependant pas être généralisée sur l'ensemble de la courbe de viscosité.

Son exploitation n'est pas possible lorsque le gradient de vitesse est faible ou très élevé. La loi de puissance ne rend pas compte de l'existence des deux régions Newtoniennes mais seulement de la zone pseudo-plastique. Cependant, elle est très utilisée car les processus de transformation des polymères fondus se déroulent dans cette zone.

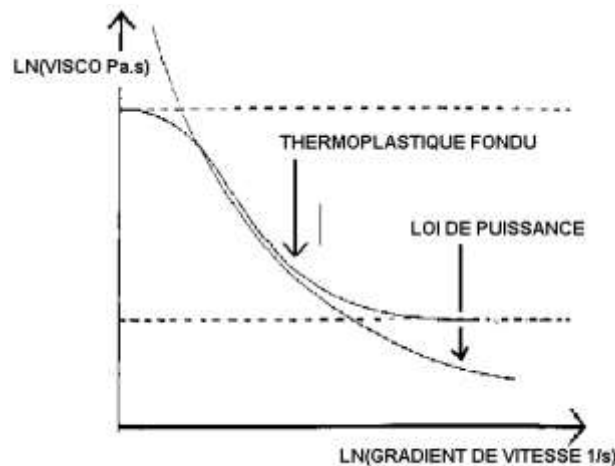


Figure III.7. $\ln(\eta) = f(\ln(\dot{\gamma}))$ [3.8]

III.3. Viscosité en fonction de la température

L'énergie d'activation caractérise la thermoplasticité du matériau. Plus sa valeur est élevée, plus la chute de viscosité sur la plage des températures considérées est importante.

Un polymère présente deux comportements rhéologiques différents suivant le gradient de vitesse atteint : Newtonien ou rhéofluidifiant. Lorsque le matériau est **Newtonien**, la viscosité et la température peuvent être reliées par une équation du type Arrhenius [3.9] :

$$\eta = \eta_N e^{E/RT} \text{ et } \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{-E}{RT} \times \frac{\Delta T}{T}$$

E : énergie d'activation -viscosité Newtonienne- **J.mol⁻¹**

η_N : constante **Pa.s**

$\Delta\eta$: variation de viscosité **Pa.s**

Cette loi est relativement suivie sur des plages de température peu étendues.

Par contre, lorsque le matériau est rhéofluidifiant, la viscosité dépend à la fois de la température et des conditions de mise en mouvement du fluide. De plus, le tracé de $\text{Ln}(\eta)$ en fonction de $1/T$ n'est linéaire que sur des plages de **20 à 30 K** environ.

La mesure des énergies d'activation **$E\dot{\gamma}$** (**J.mol⁻¹**) et **$E\tau$** (**J.mol⁻¹**) s'effectue respectivement à gradient de vitesse constant ou à contrainte de cisaillement constante. Lors d'un processus de transport, il est possible de traduire la variation de viscosité avec la température par une équation en mettant en jeu **$E\dot{\gamma}$** ou **$E\tau$** :

$$\eta = \eta_{\dot{\gamma}} e^{E\dot{\gamma}/RT}$$

$$\eta = \eta_{\tau} e^{E\tau/RT}$$

$E\dot{\gamma}$: constante **Pa.s**

η_{τ} : constante **Pa.s**

Généralement, **$E\dot{\gamma}$** diminue et **η_{τ}** augmente lorsque le gradient de vitesse croît. La valeur d'énergie d'activation à considérer dépend donc du principe de fonctionnement de l'appareil. Si celui-ci impose une vitesse constante, la variation de viscosité due au changement de température est telle que :

$$\text{Ln}\left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right) = \frac{E\dot{\gamma}}{R} \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

η_1 : viscosité à la température T1

η_2 : viscosité à la température T2

Dans ce cas, la variation de la viscosité avec la température est davantage [3.9] marquée pour les gradients de vitesse faibles. En effet, $E\dot{\gamma}$ diminue ensuite avec l'augmentation du gradient de vitesse. Une variation relative de 1 % de la température fait baisser la viscosité de 2.5 à 7.6% lorsque l'énergie d'activation varie de 10 à 30 kJ.mol⁻¹. Ceci implique un appareillage parfaitement *thermostaté pour la mise en forme des matières plastiques*.

III.4. Les mesures de viscosité

Les polymères ont dans leur ensemble un comportement résultant de la superposition de trois comportements élémentaires : élasticité, viscosité, plasticité.

L'inventaire des outils présentés ci-dessous correspond à ceux utilisés au cours des expérimentations et décrit deux grands types d'écoulements : l'écoulement Couette et l'écoulement Poiseuille.

III.4.1. Ecoulement de couette

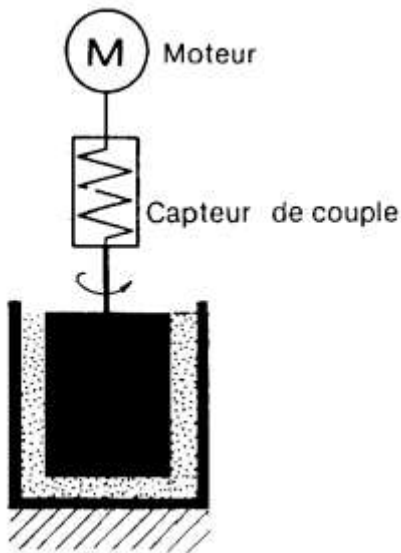


Figure III.8. Le système Couette appliqué

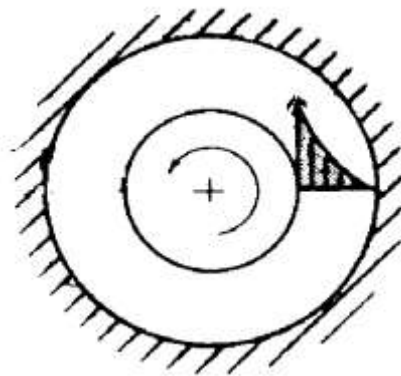


Figure III.9. L'écoulement Couette au rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux

Les deux types de rhéomètres présentés dans le présent rapport correspondent à deux applications de l'écoulement Couette : **le rhéomètre rotatif plan-plan et le rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux droits de bases circulaires** illustré par la figure 8. Le cylindre intérieur, souvent appelé rotor, tourne à une vitesse définie, la chemise cylindrique extérieure étant immobile. Le rotor force le liquide à s'écouler dans l'entrefer (*figure III.8*). La résistance du liquide cisailé entre la couche stationnaire et la couche tournante engendre sur le cylindre intérieur un couple relatif à la viscosité qui s'oppose au couple produit par le moteur. Un capteur de couple (par exemple un ressort qui se bande en fonction du couple) est placé entre le moteur d'entraînement et l'axe du cylindre intérieur. La torsion du ressort du capteur est la mesure directe de viscosité. Le principe est identique pour la géométrie plan plan qui s'obtient en remplaçant le cylindre intérieur mobile par un plan rotatif et la chemise cylindrique extérieure par un plan fixe.

III.4.2. Rhéomètres rotatifs

Dans le cas des rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux (*figure 10*), la substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution coaxiaux, de rayon R_1 (m) et R_2 (m) et de hauteur H (m). La contrainte t est liée au couple appliqué C par la relation :

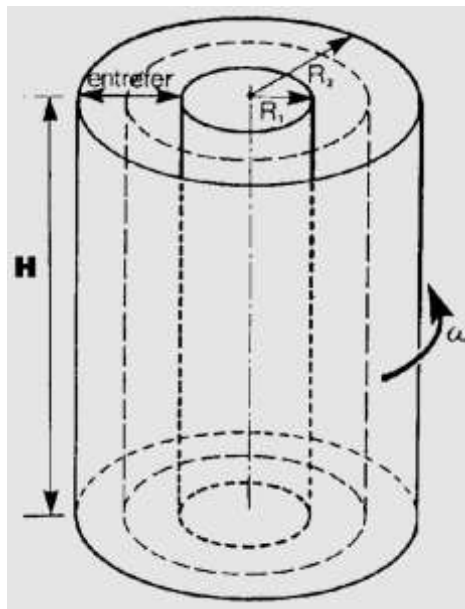


Figure III.10. Le rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux

$$\tau \times Surface \times Rayon = C$$

$$\tau = \frac{C}{2\pi R_1^2 H}$$

L'équation relative à la contrainte est valable pour tous les fluides. Par contre, une distinction est faite pour le calcul du gradient de vitesse suivant la nature rhéologique du fluide considéré. Dans le cas d'un fluide Newtonien, il est relié à la vitesse angulaire ω par la relation :

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega}{\left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2\right]}$$

Par contre, pour un fluide non Newtonien, l'expression du gradient de vitesse prend en compte l'indice de pseudo-plasticité n du matériau afin de corriger le profil de distribution des vitesses :

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega}{n \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2/n}\right]}$$

En effet, le gradient de vitesse à travers l'entrefer $y = R_2 - R_1$ ne présente pas un profil linéaire de distribution des vitesses comme le montre la figure III.11. En divisant simplement la vitesse maximale du fluide V_{max} (m.s-1) par y pour calculer le gradient de vitesse non seulement près de la surface du rotor mais pour tout point entre R_1 et R_2 , une erreur est nécessairement introduite.

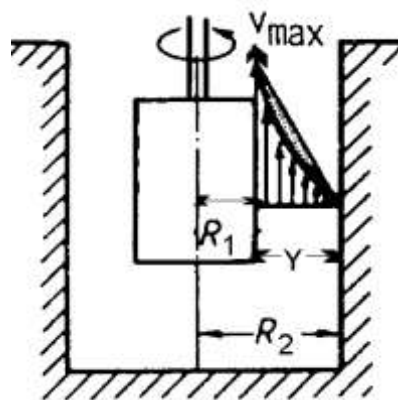


Figure III.11. Profil de distribution des vitesses pour un matériau Newtonien et non Newtonien

Enfin, les vitesses de rotation élevées, outre des effets thermiques rapidement importants, provoquent l'apparition d'un régime d'instabilité avec la formation de Tourbillons de Taylor dans l'entrefer rotor stator pour les produits Newtoniens. Ce genre de turbulence n'est pas pris en compte dans le cadre de l'étude.

Les géométries **plan-plan** et cône plan sont deux systèmes très utilisés pour les mesures de viscosité des polymères. Le principe de fonctionnement des deux géométries est identique. Le plan supérieur de rayon R_p (m) est animé d'une vitesse angulaire ω (Rad.s⁻¹) par rapport à l'entrefer h (m), le gradient de vitesse s'exprime par la relation :

$$\gamma = \frac{R_p \omega}{h}$$

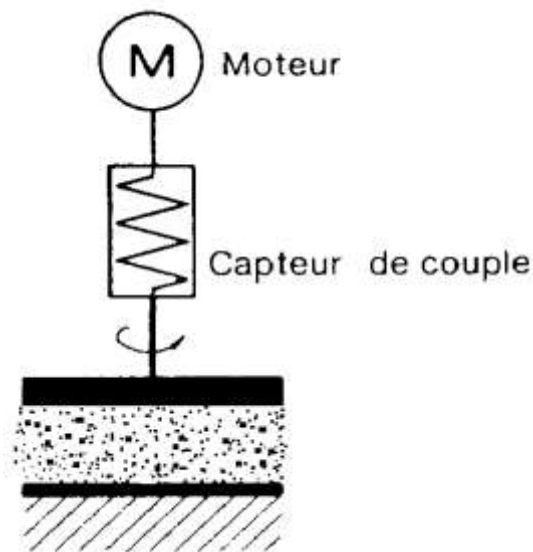


Figure III.12. Le système plan-plan

Le gradient de vitesse n'est pas constant et dépend du rayon du plan mobile. [3.10]

Maximum au bord, il est nul au centre du plan ce qui limite l'utilisation pour des mesures d'écoulements classiques.

La contrainte dépend également du rayon et s'exprime, pour un couple de rotation C appliqué, par la relation :

$$\tau = \frac{2C}{\pi R_p^3}$$

Enfin, les modules de conservation et de perte sont obtenus expérimentalement à partir des relations :

$$G' = \frac{2C_0 h}{\pi R^4 p \varphi_0} \cos \delta$$

$$G'' = \frac{2C_0 h}{\pi R^4 p \varphi_0} \sin \delta$$

C_0 : couple maximum N.m.Rad⁻¹

φ_0 : déplacement angulaire maximum sans dimension

Etant donné la nature viscoélastique des polymères, les mesures d'écoulement conventionnelles à l'aide de rhéomètres rotatifs ne permettent pas d'atteindre des gradients élevés car l'échantillon exerce une contrainte normale sous cisaillement permanent (figure 9). Cet effet engendre des fractures au sein de l'échantillon et le fluide a alors tendance à rouler dans l'entrefer ce qui se traduit par une chute brutale de viscosité (figure 20). L'artifice consiste à simuler les mesures aux vitesses de cisaillement élevées par des mesures en oscillation avec la règle de Cox Merz.

Le protocole avec ce type de géométrie consiste en des mesures d'écoulement classique pour les très faibles gradients de vitesse et des mesures en oscillation –Cox Merz- afin de simuler les gradients de vitesse élevés.

Les phénomènes de rupture se produisant en écoulement classique limitent les mesures au premier domaine Newtonien de viscosité h_0 . En conséquence, bien que le gradient de vitesse ne soit pas constant au niveau de l'entrefer, les mesures en écoulement classique sont d'une précision acceptable car h_0 , de par sa nature

Newtonienne est indépendante du gradient de vitesse [3.11].

Les lois définies pour la géométrie plan-plan s'appliquent indifféremment aux liquides Newtoniens et non Newtoniens.

Il est possible, sur les appareils haut de gamme, de mesurer la première différence de contraintes normales N_1 [3.12].

III.4.3. Ecoulement de type poiseuille

La loi de Poiseuille s'applique aux matériaux Newtoniens s'écoulant en régime laminaire sous l'effet d'une différence de pression entre les deux extrémités d'un tube. C'est le cas, par exemple, pour le rhéomètre capillaire à pression variable (figure III.12).

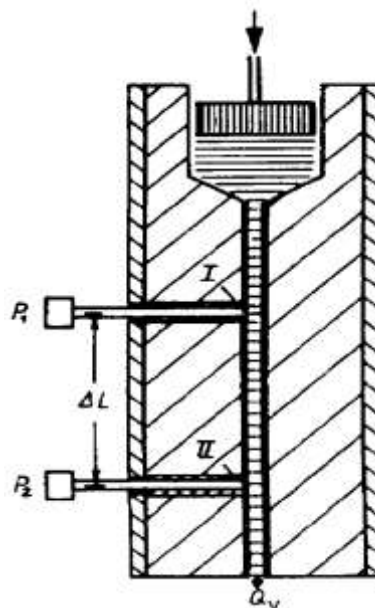


Figure III.13. Coupe schématique d'un rhéomètre à pression variable

Un piston, une extrudeuse ou toute autre source de pression pousse l'échantillon dans un capillaire de rayon R_c (m) à débit constant. La résistance à l'écoulement de l'échantillon provoque une perte de charge DP (Pa) entre les deux points I et II du capillaire (figure III.14) la sortie du capillaire. Le mouvement d'avancement du piston dans le temps définit le débit volumique Q_v ($m^3.s^{-1}$) [3.13]. La viscosité de l'échantillon testé est liée à la chute de pression ΔP et au débit Q_v dans le capillaire.

Dans ces conditions, la loi de Poiseuille s'exprime :

$$Q_v = \frac{\pi R_c^4}{8\eta\Delta L} \Delta P$$

La viscosité est calculée à partir des paramètres opératoires : la perte de charge et le débit volumique. Cependant, quatre hypothèses doivent être vérifiées : la vitesse du fluide à la paroi est nulle, le comportement rhéologique du fluide est indépendant du temps, l'écoulement est isotherme et le fluide est incompressible. Les modèles présentés ci-dessous correspondent aux deux géométries de filières utilisées durant les expérimentations : la filière capillaire et la filière plate.

III.4.4. La filière capillaire

Elle ne présente qu'un capteur de pression placé le plus proche possible de l'entrée de la filière, la pression de sortie P_s (Pa) étant considérée comme nulle (*Figure III.14*).

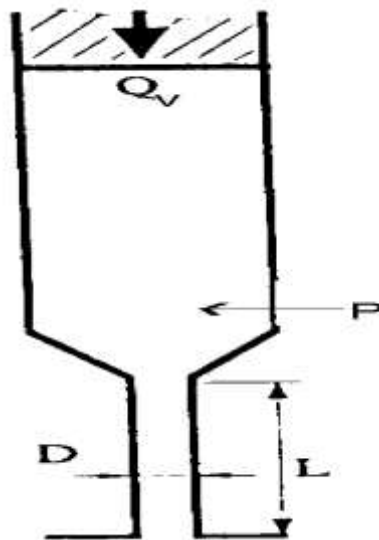


Figure III.14. Rhéomètre à filière capillaire

Ce principe est utilisé par nombre d'appareils, notamment les rhéomètres de la gamme Göttfert. La détermination de la contrainte à la paroi pour un capillaire de rayon R_c et de longueur L (m) correspond à l'expression :

$$\tau = \frac{R_c \Delta P}{2L}$$

Le gradient de vitesse admet deux expressions. Il s'exprime, pour un fluide Newtonien, par la relation suivante [3.14] :

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q_v}{\pi R^3 c}$$

Pour un **fluide non Newtonien**, la **correction** de Rabinowitsch est nécessaire. En effet, le calcul gradient de vitesse nécessite une correction dans le cas d'un polymère compte tenu de l'influence de l'indice de pseudo-plasticité sur le profil des vitesses dans un écoulement tubulaire (figure 6). Dans ce cas, l'expression devient [3.14] :

$$\dot{\gamma} = \frac{3n+1}{4n} \left(\frac{4Q_v}{\pi R^3 c} \right)$$

Le terme $(3n+1)/4n$ apparaît comme un facteur correctif par rapport à un fluide Newtonien s'écoulant avec le même débit volumique et sous la même perte de charge. Il est possible, à partir de l'expression précédente, de relier le débit volumique aux paramètres de la loi de puissance [3.15] par la relation :

$$Q_v = \left(\frac{R_c \Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{\pi R_c^3 n}{3n+1}$$

III.4.5. Filière plate

La filière plate est utilisée pour mesurer la viscosité est l'écoulement entre plaques parallèles ou plus précisément dans un chenal rectangulaire dont la largeur W (m) est grande devant l'épaisseur h (m). L'intérêt du système est de pouvoir mesurer directement le gradient de pression à la paroi, à l'aide de plusieurs capteurs affleurants et donc d'éviter les fastidieuses et délicates corrections de Bagley. Pour que les mesures soient fiables, toutes les hypothèses faites en rhéométrie capillaire doivent être vérifiées [3.16].

Deux conditions complémentaires sont également à remplir. En premier, l'écoulement ne doit pas être perturbé par la présence de parois latérales ce qui impose un rapport h/W d'autant plus faible que le polymère testé est rhéofluidifiant [3.17].

Deuxièmement, le profil des pressions mesurées doit être linéaire. Pour vérifier cette condition, il est nécessaire d'utiliser trois capteurs de pression $P'1$, $P''1$ et $P2$. Cette linéarité est meilleure pour une filière longue et des pressions mesurées loin des extrémités.

La contrainte s'exprime simplement par la relation :

$$\tau = \frac{h\Delta P}{2L}$$

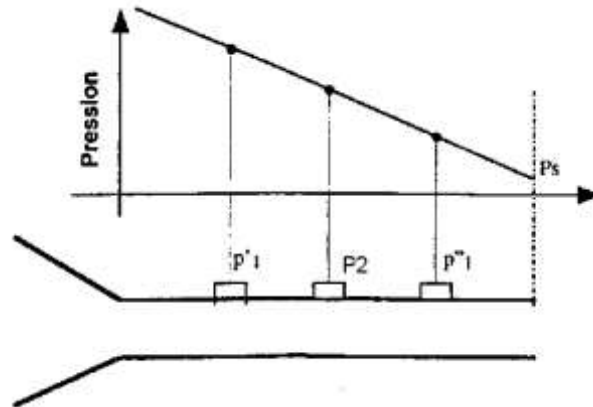


Figure III.15. Schéma de la filière plate

Il est préférable d'utiliser la formule de Laun qui prend en compte de façon approximative les effets des parois latérales :

$$\tau = \frac{h}{2\left(1 + \frac{h}{W}\right)} \frac{\Delta P}{L}$$

Pour un **fluide Newtonien**, le débit volumique Q_v donne accès à un gradient de vitesse apparent $\dot{\gamma}_{app}$ (s-1) [3.18] :

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{6Q_v}{Wh^2}$$

Dans le cas d'un **fluide non Newtonien** obéissant à une loi de puissance une correction est introduite :

$$\dot{\gamma} = \frac{2n + 1}{3n} \left\{ \frac{6Q_v}{Wh^2} \right\}$$

Le terme $\left(\frac{2n+1}{3n}\right)$ est un facteur correctif par rapport à un fluide Newtonien s'écoulant dans les mêmes conditions. Ce type de filière permet également de mesurer la première différence de contraintes normales N_1 [3.19]

Plusieurs corrections complémentaires applicables aux écoulements spécifiques filières plates et capillaires sont proposées dans la littérature dont la correction de température et la correction de l'énergie cinétique.

Conclusion

Conclusion

Le terme de rhéologie peut désigner la discipline scientifique qui s'intéresse au comportement des matériaux soumis à une déformation ou un écoulement, ou bien ce comportement lui-même. Le comportement peut être caractérisé par des lois théoriques ou empiriques décrivant la fluidité (ou la viscosité, les deux mots concernent le même phénomène d'écoulement mais s'appliquent à deux perceptions opposées de ce même effet).

Au contraire de la fluidité, la viscosité va se traduire par des phénomènes d'épaississement. La valeur de la viscosité est dépendante de la contrainte de cisaillement que l'on applique à la suspension. On distingue deux grands types de comportement rhéologiques : le comportement newtonien qui dépend peu du cisaillement, et le comportement pseudo-plastique qui voit la viscosité baisser quand le cisaillement augmente (Cas des macromolécules).

Comme les polymères sont désignés par des écoulement non Newtoniens, plusieurs modèles ont été présentés. La plupart des modèles présentés obéissent à une loi de puissance.

Certains liquides n'obéissent pas à la loi de Newton. Il est connu expérimentalement que les polymères fondus ne sont pas newtoniens. Leur viscosité apparente est fonction décroissante du taux de cisaillement ; cette propriété est appelée la pseudo-plasticité.

A l'échelle expérimentale on trouve beaucoup de dispositifs qui peuvent servir comme instrumentation d'étude des paramètres rhéologique des thermoplastiques. Malgré la variété de ces derniers mais le chemin est toujours unique et les résultats ne diffère plus d'un instrument à un autre.

L'étude rhéologique est indispensable pour prédire les paramètres à régler des presses d'injection pour réussir la production d'un objet thermoplastique.

Perspectives

- Les modèles présentés peuvent être appliqués à des cas de thermoplastique connus à savoir le Polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), les époxy ou autres polymères
- Ces modèles peuvent être l'objet d'une étude numérique ou de simulation en utilisant certains logiciels de rhéologie à savoir Matlab ou autres en Mécanique tel que SolidWorks.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1.1 Michel Chatain et Alexandre Dobraczynski, Injection des thermoplastiques : les moules, Paris, Éditions techniques de l'ingénieur, 1995 (notice BnF no FRBNF37340176, présentation en ligne [archive], lire en ligne [archive]).
 - 1.2 Agassant J.-F., Avenas P., Sergent J.-P., Vergnes B. et Vincent M., La mise en forme des matières plastiques, approche thermomécanique, Lavoisier, 1996.
 - 1.3 Dobraczynski A., Piperaud M., Trotignon J.-P. et Verdu J., Précis de matières plastiques, AFNOR-Nathan, 2006.
 - 1.4 Munch T., Du process à la pièce : l'injection des plastiques, VTP Éd., 2006.
 - 1.5 Pichon J.-F., Aide-mémoire d'injection des matières plastiques, Dunod, 2005.
-
- 2.1. S. Guillou et R. Makhloufi « Influence des paramètres d'une loi de comportement d'un fluide rhéo-épaississant sur le coefficient de frottement ». Rhéologie, Vol. 7, 35-40 (2005)
 - 2.2 HASSAN Hamdy, REGNIER Nicolas, PUJOS Cyril, LE BOT Cedric, DEFAYE Guy, « L'effet de la Position des Canaux de Refroidissement sur le Degré de Solidification d'un Polymère dans un Moule d'Injection », 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007.
 - 2.3 J.Samir, M. Hattabi, J. Echaabi, A. Saouab, C. H.Park,« Simulation du remplissage des moules par la méthode des éléments Finis / volume contrôle dans les procédés RTM », Volume 10 –2008/2009-Pages 1 à 15 –Arima.
 - 2.4 F.CHABANE, M.HECINI,« Modélisation numérique de l'écoulement et transfert thermique du polymère fondu Loi de d'Arrhenius et Carreau-Yasuda», journée **jenm 2009** à Batna.
 - 2.5 E. Mathey, L. Penazzi, F. Schmidt, F. Rondé-Oustau,« comparaison du comportement thermique des moules d'injection plastique obtenus par strato-conception selon la technique d'assemblage », CROMeP, Ecole des Mines d'Albi,

- 2.6** Serge BATKAM, Jean-François AGASSANT, Thierry COUPEZ, « Couplage Thermique Moule/Polymère En Remplissage 3d », XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3 –7 Septembre **2001**.
- 2.7** HASSAN Hamdy, REGNIER Nicolas, PUJOS Cyril, LE BOT Cedric, DEFAYE Guy, « L'Effet de la Position des Canaux de Refroidissement sur le Degré de Solidification d'un Polymère dans un Moule d'Injection », Université Bordeaux I; CNRS ; UMR 8508, Laboratoire TREFLE, **2007**
- 2.8** Melle Christelle COMBEAUD, thèse doctorat « étude des instabilités volumiques en Extrusion de polystyrène et polypropylène » ECOLE DES MINES DE PARIS **2004** p 43
- 2.9** Suhas V. Patankar « Numerical Heat Transfer and Fluid Flow » 1980 [9]. K. FRIEDRICH1, W. H. RUAN2, M. Q. ZHANG «Structure-Property Relationships of In-situ Crosslinking Modified Nano-silica Filled Polypropylene Composites» Proceeding of the 8th Polymers for Advanced Technologies International Symposium (1-3 pages with the given font types), Budapest, Hungary, 13-16 September **2005**.
- 2.10** J.F.AGASSANT, P.AVENAS et J.PH.SERGENT, « La mise en Forme des Matières Plastique ». Edition Technique et Documentation, Lavoisier (**1986**).
- 2.11** Cyril PUJOS, thèse doctorat « Estimation de La rhéologie d'un polymère dans une filière d'extrusion Simulation d'écoulement avec transferts thermiques et Inversion de mesures » **2006** p 19
- 2.12** F.CHABANE, projet de fin d'étude « Modélisation numérique de transfert thermique lors de moulage par injection de la matière plastique » UNIVERSITE Mohamed Khaider BISKRA **2004**
- 2.13** Mikaël Chailly, thèse doctorat, « Influence des Traitements de surface de moule dans le procédé d'injection moulage. Application aux défauts d'aspect », N° d'ordre 2007-ISAL-0045, **2007**
- 2.14** F. CHABANE, M. HECINI, H.SALHI, S.GAREH « Modélisation Numérique de l'écoulement de fluide complexe et l'échange thermique on prise en compte du figeage du polymère lors du remplissage de moule ». Journée septième de mécanique, JM'07 à EMP Ecole Militaire polytechnique, **2010**.
- 2.15** F.CHABANE, mémoire de magistère « contribution a la Modélisation de transfert de chaleur lors du remplissage d'un moule », université de Hadj Lakhdar Batna, **2009**

- 3.1 Couarraze G., Grossiord J. L., *Initiation à la rhéologie*, 2^{ème} EDITION, LAVOISIER TEC & DOC, PARIS, 1991, 14
- 3.2 Gueugnaut D., Propriétés thermomécaniques et rhéologiques des polymères dans les processus de mise en œuvre. Centre d'études et de recherches sur les sciences et techniques appliquées de gaz de France, (LILLE), Cours de deuxième année, 1996, 47
- 3.3 Dealy J. M., Rheometers for molten plastics, VAN NOSTRAND REINHOLD, NEW YORK, 1982, 76
- 3.4 Barnes M. A., Hutton J. F., Walters K., AN INTRODUCTION TO RHEOLOGY / RHEOLOGY SERIES, 3, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, AMSTERDAM, 1989, 34-35
- 3.5 Collyer A. A., Clegg D. W., Rheological measurement, ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHER LTD, LONDON AND NEW YORK, 1988, 9
- 3.6 Varenelli A. D., Methods of predicting the processing characteristics of rubber and plastics, WIRE AND WIRE PRODUCTS, 10 (1964), 1598-1661
- 3.7 CHUNG J. T., Torque rheometer technology and instrumentation, encyclopedia of fluid mechanics (CHAPITRE 34), GULF PUBLISHING COMPANY, HOUSTON, TEXAS, USA, TOME 7, 1988, 1092
- 3.8 Couarraze G., Grossiord J. L., Initiation à la rhéologie, 2^{ème} EDITION, LAVOISIER TEC & DOC, PARIS, 1991, 69
- 3.9 Wolf C., Dupuis D., Viscosité (R 2350), TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, TOME R5, Mesures et contrôle, Pierre Aubert, Paris, 1996, 13
- 3.10 Dealy J. M., Rheometers for molten plastics, VAN NOSTRAND REINHOLD, NEW YORK, 1982, 51
- 3.11 MR Cattiaux, TA Instruments, Rapport Technique, 13/01/1997
- 3.12 Agassant J. F., Avenas P., Sergent J. P., Vincent M., La mise en forme des matières plastiques, 3^{ème} EDITION, TECHNIQUE & DOCUMENTATION, PARIS, 1996, 90
- 3.13 Bachmann P., Tissot P., Précis de génie chimique, LIBRAIRIE DE L'UNIVERSITE, GEORG ET CIE S.A., GENEVE, 1981, 39
- 3.14 Wolf C., Dupuis D., Viscosité (R 2350), TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, TOME R5, Mesures et contrôle, Pierre Aubert, Paris, 1996, 13
- 3.15 Collyer A. A., Clegg D. W., Rheological measurement, ELSEVIER APPLIED SCIENCE PUBLISHER LTD, LONDON AND NEW YORK, 1988, 307
- 3.16 Agassant J. F., Avenas P., Sergent J. P., VINCENT M., La mise en forme des matières plastiques, 3^{ème} EDITION, TECHNIQUE & DOCUMENTATION, PARIS, 1996, 78
- 3.17 Agassant J. F., Avenas P., Sergent J. P., Vincent M., La mise en forme des matières plastiques, 3^{ème} EDITION, TECHNIQUE & DOCUMENTATION, PARIS, 1996, 77
- 3.18 Laun H. M., Polymer melt rheology with a slit die, RHEOLOGICA ACTA, 22, 1983, 171-185
- 3.19 Dealy J. M., Rheometers for molten plastics, VAN NOSTRAND REINHOLD, NEW YORK, 1982, 108

Résumé

Aujourd'hui, les polymères font partie des matériaux les plus importants pour les usages techniques et dans la vie quotidienne, car les propriétés des polymères peuvent être adaptées de très nombreuses manières pour être utilisées dans presque tous les champs d'application. Outre les polymères naturels, comme les protéines, les amidons, la cellulose, etc., il existe un grand nombre de polymères fabriqués comme le nylon, les silicones, le PVC, le plexiglas, etc. Certains polymères sont durs et cassants, d'autres sont solides et résistants aux chocs alors que d'autres encore sont souples et flexibles. La fabrication et la caractérisation des polymères est donc au centre de beaucoup d'industries et d'instituts de recherche spécialisée.

Les polymères montrent un comportement rhéologique qui doit être pris en compte lors de l'utilisation ou la production de ces types de matières, comme la **viscosité** du produit fondu, la fluidité, les propriétés **viscoélastiques**, le comportement thermique, la **température de vitrification**, le vieillissement, etc. Plusieurs tests et méthodes d'analyse sont utilisés pour optimiser les propriétés du polymère jusqu'à ce qu'il réponde à toutes les exigences.

Les tests rhéologiques sont utiles pour

- Contrôle de qualité des polymères, par exemple en déterminant la **viscosité**, les paramètres **viscoélastiques** et la masse molaire
- Amélioration du comportement du traitement des polymères, par exemple le moulage par injection, l'extrusion, le filage de fibre, etc.
- Optimisation du produit fini (par exemple les matériaux plastiques dans la production automobile).

Mots Clés : Plastiques, Polymères, Injection des thermoplastiques, Rhéologie, Viscosités, Pseudo-plastique.

ملخص

تعد البوليمرات اليوم من بين أهم المواد للاستخدامات التقنية في الحياة اليومية، لأن خصائص البوليمرات يمكن تكييفها بعدة طرق لاستخدامها في جميع المجالات. إلى جانب البوليمرات الطبيعية مثل البروتين والنشا والسيلولوز وما إلى ذلك، هناك عدد كبير من البوليمرات المصنوعة مثل النايلون والسيليكون والـ PVC والزجاج الشبكي وما إلى ذلك. بعض البوليمرات صلبة وهشة، والبعض الآخر قوي ومقاوم للصدمات، بينما لا يزال البعض الآخر طرياً ومرناً. ولذلك فإن تصنيع البوليمرات وتوصيفها يقع في قلب العديد من الصناعات ومعاهد البحوث المتخصصة.

تُظهر البوليمرات سلوكاً ريولوجياً يجب أخذه في الاعتبار عند استخدام أو إنتاج هذه الأنواع من المواد، مثل اللزوجة الذاتية، والسيولة، وخصائص اللزوجة المرنة، والسلوك الحراري، ودرجة حرارة التزجيج، والشيخوخة، إلخ. يتم استخدام العديد من الاختبارات والطرق التحليلية لتحسين خصائص البوليمر حتى يلبي جميع المتطلبات.

الاختبارات الريولوجية مفيدة لـ :

- مراقبة جودة البوليمرات، على سبيل المثال عن طريق تحديد اللزوجة ومعايير اللزوجة المرنة والكتلة المولية
- تحسين سلوك معالجة البوليمرات، مثل القولبة بالحقن، والبتق، وغزل الألياف، إلخ.
- تعظيم الاستفادة من المنتج النهائي (مثل المواد البلاستيكية في صناعة السيارات).
-

كلمات مفاتيح : المواد البلاستيكية، البوليمرات، القولبة بالحقن، الريولوجيا، اللزوجة الذاتية، ومعايير اللزوجة المرنة