جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE A. MIRA – BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

POLYCOPIÉ DE COURS

Mise en œuvre des polymères

Présenté par :

DR. I. ZEMBOUAI

Pour les étudiants Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière: Génie des Procédés

Spécialité: Génie des Polymères

Sommaire

- **Chapitre I : Généralités** 1
  - I.1. Introduction 1
  - I.2.Les matières thermoplastiques et thermodurcissables 1
  - I.3. Rhéologie des polymères fondus 4
  - I.4.Procédés de mise en forme des polymères 6
- **Chapitre II : Le procédé d'extrusion des matières plastiques** 10
  - II. 1.Présentation 10
  - II.2. Principe de l'extrusion 10
  - II.3. Composition d'une ligne d'extrusion 11
  - II.4. Principaux éléments des extrudeuses 11
  - II.5. L'extrudeuse mono-vis 17
  - II.6. Extrudeuse bi-vis 20
  - II.7. Nettoyage des extrudeuses 21
  - II.8. Applications 22
  - II.9. Les mélangeurs internes 22
- **Chapitre III : Le procédé d'injection des matières plastiques** 26
  - III.1. Présentation 26
  - III.2. Les Presses d'injection 27
  - III.3. Les phases d'injection 28
  - III.4. Système d'injection à vis mobile 29
- **Chapitre IV : Le procédé de thermoformage** 34
  - IV.1. Présentation 34
  - IV.2. Principe 34
  - IV.3. Les Types de thermoformage 36
  - IV.4. Moule pour le thermoformage 36
  - IV.5. Machines de thermoformage 38
- **Chapitre V : Le rotomoulage** 41
  - V.1. Principe 41
  - V.2. Principales étapes du rotomoulage 41
  - V.3. Moules et machines 44
  - V.4. Paramètres principaux influant sur le procédé de rotomoulage 47

V.5. Comparaison entre le rotomoulage et les autres procédés de transformation 48
- **Chapitre VI** : **Le calandrage** 49
VI.1. Présentation 49
VI.2. Description du procédé 49
VI.3. Lignes de calandrage 50
VI.4. Problèmes du calandrage 51
- **Chapitre VII** : **Extrusion-soufflage et injection-soufflage** 53
VII.1. Présentation 53
VII.2. Extrusion-soufflage 53
VII.3. Moulage des corps creux par soufflage 54
VII.4. Injection-soufflage 55
VII.5. Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud 56
VII.6. Injection-soufflage avec bi-étirage 58
VII.7. Extrusion gonflage ((gaine) 60
- **Chapitre VIII** : **Moulage par compression** 64
VIII.1. Principe 64
VIII.2. Cycle de moulage 64
VIII.3. Conditions de moulage 66
VIII.4. Choix de la méthode de moulage 66
VIII.5. Avantages et inconvénients de moulage par compression 66
VIII.6. Caractéristiques des presses de compression 67
- **Références bibliographiques** 69

Chapitre I : Généralités

I.1. Introduction

La mise en œuvre des matières plastiques regroupe les procédés de transformations des polymères en produit fini ou semi-fini. La plupart des procédés de transformation existant aujourd'hui (extrusion mono-vis ou bi-vis, injection, soufflage de corps creux, extrusion gonflage de films, calandrage…) sont nés après le deuxième conflit mondial, en même temps que se développaient les grands polymères de commodité. Certaines de ces techniques étaient, il est vrai, elles-mêmes issues de secteurs industriels parents (industrie agroalimentaire ou transformation des caoutchoucs). Dans ces domaines nous avons assisté depuis les années 1950 à un développement continu des procédés, ce qui a débouché sur des progrès spectaculaires. Le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges, etc.) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Les procédés de transformation des matières thermoplastiques sont essentiellement thermomécaniques.

I.2.Les matières thermoplastiques et thermodurcissables

Par définition, un thermoplastique est un matériau à base de polymère qui peut être mis en forme, à l'état visqueux à une température soit supérieure à sa température de transition vitreuse (T_g) (thermoplastiques amorphes) ou supérieure à sa température de fusion (T_m) (thermoplastiques semi-cristallins). Sur le plan de la microstructure, il se compose de molécules longues, linéaires ou ramifiées, mais chimiquement séparées l'une de l'autre.

A l'opposé, un thermodurcissable est un matériau polymère à base de résine qui ne peut être mis en forme, en principe, qu'une seule fois, lors de sa synthèse. Sur le plan de la microstructure, il se présente sous forme d'un réseau continu d'atomes reliés chimiquement entre eux par des liaisons fortes (covalentes)**.** Les matières thermodurcissables sont des matières susceptibles d'être transformées en un produit essentiellement infusible et insoluble lorsqu'elles sont traitées par la chaleur. Cet état est le résultat d'une réticulation aboutissant à la formation d'un réseau macromoléculaire tridimensionnel. La réticulation s'effectue pendant une opération de moulage. L'état rigide permettant le démoulage est le résultat d'une réaction chimique irréversible.

Les méthodes de mise en œuvre des matières thermodurcissables tirent le meilleur parti possible de la forme physique du produit transformé ou la modifient pour optimaliser les conditions de transformation. La mise en œuvre, sous l'action de la chaleur et/ou de catalyseurs ou de durcisseurs, correspond à la création de nouvelles associations entre les

molécules courtes. Cette transformation chimique est irréversible ; les nouvelles liaisons sont covalentes et il faut, pour les détruire, des énergies très importantes. Au cours de la mise en œuvre, les produits de base qui étaient liquides deviennent solides, les résines solides qui étaient fusibles et solubles deviennent infusibles et insolubles.

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général de la Figure I.1. Le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges, etc.) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi-cristallins) ou plastifiée (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière liquide très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit : tube, jonc, film, pièce injectée, etc. Cette matière thermoplastique mise en forme est alors refroidie, dans certains cas étirée et biétirée, pour obtenir le produit final. De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement, vont dépendre de la microstructure du polymère.

L'originalité de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques tient à un certain nombre de caractéristiques résultant de leur composition chimique et de leur structure moléculaire en longues chaînes linéaires (ou ramifiées) et enchevêtrées : forte viscosité, comportement pseudo-plastique et viscoélastique, faible conductivité thermique. En outre, si les chaînes sont régulières, elles ont la possibilité de contribuer à la formation de cristaux.

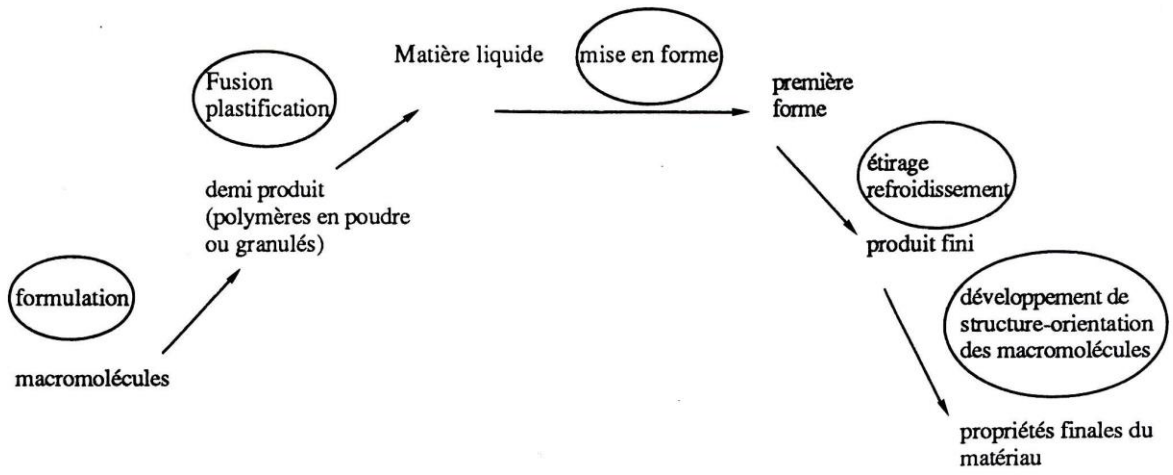


Figure I.1 : Schéma général de la mise en œuvre des polymères.

Les procédés de transformation des matières plastiques sont essentiellement thermomécaniques. Ils comportent trois étapes (figure I.1) :

- **La fusion**, c'est-à-dire le passage de l'état de solide, en poudre ou en granulés, à un état fondu, suffisamment homogène et fluide. Ce terme de fusion recouvre plusieurs phénomènes physiques différents, suivant que le polymère est semi-cristallin ou amorphe ;
- **La mise en forme à l'état fondu**, par écoulement sous pression à travers une filière ou dans un moule ;
- **La conformation** et le **refroidissement**, avec éventuellement des opérations d'étirage, bi-étirage, soufflage… Les propriétés de l'objet fabriqué dépendent, bien entendu, du polymère choisi, mais également de ce « chemin thermomécanique » qu'il a suivi pour déboucher sur cet objet. Avec la figure I.1, on peut imaginer que la mise en œuvre des polymères est un simple problème de mécanique des fluides couplé au transfert thermique. En réalité c'est plus compliqué du fait des caractéristiques physiques communes à l'ensemble des polymères thermoplastiques.

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

- L'**énergie mécanique,** fournie par la rotation de la vis (Extrudeuse, mélangeur interne) qui engendre des déformations au sein d'un milieu très visqueux ;
- L'**énergie thermique,** fournie par la régulation du fourreau.

Le rapport de ces deux termes est ce que l'on appelle le nombre de Brinkman :

$$Br = \frac{\eta v_F^2}{\lambda (T_F - \overline{T})} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec : η (Pa·s): Viscosité du polymère,

V_F (m·s^{-1}): Vitesse de la vis.

λ (W·m^{-1}·°C^{-1}) : Conductivité thermique du polymère,

T_F :(°C): Température du fourreau,

T (°C): Température moyenne du polymère.

Le volume V (m^3) déplacé à chaque tour de vis est obtenu en multipliant la section de l'anneau de matière par l'avance par tour, soit :

$$V = S * A_V \qquad \text{(I.2)}$$

D'où le débit-volume : $Q_v = V*N$ (m^3/min) = $60*V*N$ (m^3/h) (I.3)

Avec N (tr/min) vitesse de rotation de la vis.

Pour obtenir le débit-masse (kg/h), il suffit de multiplier le débit volume (m^3/h) par la masse volumique granulaire de la matière considérée : $Q_m = \rho * Qv = 60 * \rho * V * N$ (I.4)

Avec ρ ($kg*m^{-3}$) masse volumique du polymère.

I.3. Rhéologie des polymères fondus

La viscosité d'un polymère est caractérisée par une évolution non linéaire de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation. Il est possible de définir une viscosité équivalente pour chaque valeur de la vitesse de déformation (Figure I.2) : celle-ci est le rapport de la contrainte à la vitesse de déformation. A faible vitesse de déformation, la viscosité reste constante : on parle alors de plateau newtonien. A vitesse de déformation plus élevée, la viscosité décroît très significativement, ce qui correspond à une diminution de la densité des enchevêtrements entre les chaînes macromoléculaires. On comprend aisément que la pseudo-plasticité sera d'autant plus marquée que la masse molaire du polymère sera élevée.

Le comportement pseudo-plastique, a des implications très importantes dans les procédés de mise en œuvre des polymères : les couples d'entraînement des moteurs, les pressions dans les outillages évolueront modérément en fonction du débit, de la vitesse de rotation, etc. Les machines de mise en œuvre des polymères auront ainsi une plage de fonctionnement étendue.

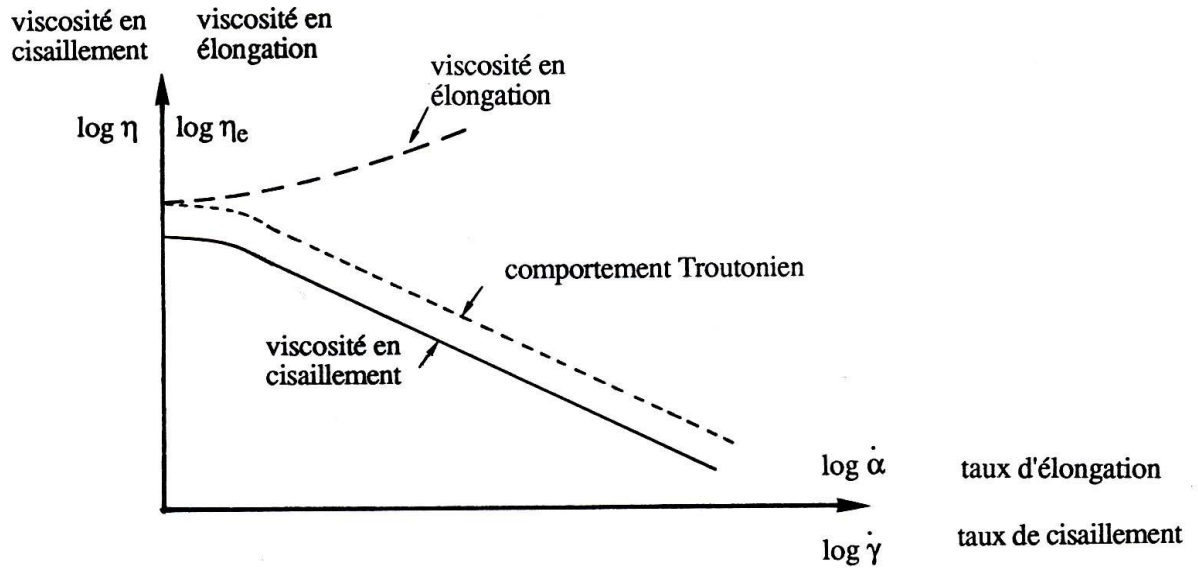


Figure I.2: Courbes typiques de viscosité d'un polymère fondu en cisaillement et en élongation.

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 γ; cette propriété est appelée la pseudo-plasticité.

I.3.1. Comportement pseudo-plastique

Les polymères fondus, aux températures de mise en œuvre, ont des viscosités (η) de l'ordre de 10^3 Pa.s, soit un million de fois plus grandes que celle de l'eau. La viscosité peut diminuer d'un facteur 5 quand on multiplie le taux de cisaillement par 10. En outre, si la viscosité des polymères était constante, le doublement du débit aboutirait à doubler la pression nécessaire à l'écoulement. La forte sensibilité de la viscosité à la vitesse de déformation et à la température autorise des variations importantes des paramètres de mise en œuvre. Pour rendre compte de ce phénomène, on utilise des lois de comportement de type « loi puissance » ou d'Oswald de Waele :

$$\delta = -P*I+S \quad (I.5)$$

$$S = 2*K*(\gamma)^{m-1}* \varepsilon \quad (I.6)$$

$$\tau=\eta*\gamma \quad (I.7)$$

δ: Tenseur des contraintes,

P: Pression,

I: Tenseur identité,

S: Déviateur des contraintes,

K : Consistance du polymère,

γ: Taux de cisaillement,

m: Coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation,

ε: Tenseur des vitesses de déformation.

La loi puissance autorise des résolutions analytiques dans un certain nombre de situations d'écoulement simples, mais elle présente l'inconvénient de ne pas rendre compte de l'existence d'un palier newtonien à faible vitesse de déformation. Pour cette raison, il est préférable d'utiliser une loi de Carreau-Yasuda :

$$S=2*\eta_{0*}[1+ (\lambda*\gamma)^{a}]^{(m-1/a)} *\varepsilon \quad (I.8)$$

η_0 : Viscosité au palier newtonien,

λ: Temps de relaxation moyen,

a : Paramètre qui permet d'ajuster la transition entre le palier newtonien et la zone ou la viscosité du polymère est sensible à la vitesse de déformation.

Ces différents paramètres sont aisément accessibles en utilisant des rhéomètres plan-plan en mode dynamique ou des rhéomètres capillaires.

I.3.2 Comportement viscoélastique

Le comportement viscoélastique joue un rôle plus subtil. Par exemple la viscoélasticité stabilise l'étirage ou le bi-étirage des polymères fondus. C'est elle qui facilite le filage des polymères à forte vitesse de déformation, le soufflage et le thermoformage en homogénéisant l'épaisseur des pièces obtenues. En revanche, les écoulements de cisaillement sont limités en débit par l'apparition d'instabilités, parfois d'origine viscoélastique, qui se traduisent par des défauts (défauts volumiques en extrusion, instabilités d'interface en co-extrusion. La viscoélasticité est responsable du gonflement à la sortie des filières, qui complique singulièrement la conception de ces outillages. On dispose aujourd'hui d'une palette impressionnante de lois de comportement viscoélastiques, certaines basées sur des approches phénoménologiques (combinaison de ressorts et d'amortisseurs) dont la plus simple est la loi de Maxwell :

$$\delta = \delta' - P*I \quad (I.9)$$

$$\delta' + \gamma*(d\delta'/dt) = 2*\pi*\varepsilon \quad (I.10)$$

$$\delta' = 3*G*(C-(1/3)*I \quad (I.11)$$

$$\tau = G*\gamma \quad (I.12)$$

Avec:

δ : Tenseur des contraintes,

δ': Tenseur des extra-contraintes,

I: Tenseur identité,

γ: Taux de cisaillement,

ε: Tenseur des vitesses de déformation,

G: Module élastique,

C: Tenseur d'orientation,

P : Pression.

I.4.Procédés de mise en forme des polymères

Les techniques de transformation des plastiques dépendent de la nature des polymères et de la destination des produits finis (applications). Les principaux procédés industriels sont:

a) **Injection**

La matière plastique sous forme de granulés, est versée dans une trémie pour alimenter une vis sans fin logée dans un tube chauffé. Elle y est comprimée, malaxée et chauffée. Ce traitement mécanique et thermique fournit une pâte fondante et homogène sans bulle qui est poussée par la vis en rotation vers un orifice. La matière expulsée sous pression par la vis d'injection à travers ce trou vient remplir un moule fermé et refroidi. Au contact des parois

froides, elle prend la forme du moule et se solidifie. Le moule s'ouvre ensuite pour faire sortir la pièce. Pour changer la forme de la pièce, il suffit de changer de moule. Ce procédé permet une transformation en discontinu des thermoplastiques. C'est une méthode de production très rapide pour produire des objets en très grande quantité. La technique de fabrication est fréquente pour fabriquer des objets moulés de qualité, parfois de forme compliquée dans le domaine de l'automobile, du jouet ou de l'électronique. On peut réaliser des objets très volumineux, par contre, il n'est pas possible de faire des parois supérieures à 6 mm.

b) **Injection soufflage**

L'injection –soufflage est un procédé utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et des flacons. On utilise des pièces semis-finies obtenues par injection. Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé. Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule. Enfin, un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule. La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille. Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule.

c) **Extrusion**

L'extrusion est un procédé de transformation en continu. Comme pour l'injection, le granulé entre dans un tube chauffé muni d'une vis sans fin. La matière molle homogénéisée est poussée, comprimée, puis passe à travers une filière pour être mise à la forme souhaitée. C'est une sorte de « machine à spaghettis » qui permet obtenir des produits semi-finis de formes diverses. On fabrique avec cette technique de transformation des produits de grande longueur comme des profilés pour les portes et les fenêtres, des canalisations, des câbles, des fibres optiques, des tubes, des grillages, des plaques et des feuilles plastique… Le tube ou le profilé sort en continu, il est refroidi pour être ensuite coupé à la longueur voulue. En additionnant plusieurs couches de matière on peut réaliser des produits ayant des propriétés combinées.

d) **Extrusion gonflage**

C'est une variante de l'extrusion qui permet de fabriquer des films plastiques. Ce procédé consiste en sortie de l'extrudeuse à dilater avec de l'air comprimé une gaine polymère précédemment formée. La sortie de l'extrudeuse est verticale, on insuffle de l'air comprimé dans la matière fondue qui se gonfle et s'élève verticalement en une longue bulle de film. Après refroidissement, des rouleaux aplatissent le film en une gaine plane qui s'enroule sur des bobines. On fabrique ainsi des films utilisés dans la fabrication

d'emballages, de sacs-poubelles, de sacs de congélation, des poches médicales pour perfusion et des feuilles souples et fines de revêtements pour serres horticoles.

e) **Extrusion soufflage**

L'extrusion soufflage permet de fabriquer des corps creux. Cela commence par l'extrusion d'un tube plein appelé la paraison. Ce tube de plastique encore chaud sortant de la filière est coupé et un moule froid en deux parties se referme autour de lui. Ensuite, de l'air est injecté dans la matière par une canne de soufflage et le polymère vient se plaquer sur les parois intérieures du moule qui est rapidement refroidit. Le procédé se termine par le démoulage, le décarottage et l'élimination des déchets de moulage de la pièce.

f) **Thermoformage**

C'est un procédé de seconde transformation dans lequel la matière arrive sous forme de plaques/feuilles ou de profilés. Le matériau est ramolli par chauffage avant d'être déformé et mis en forme par un moule métallique. La parfaite adhésion du polymère sur le moule se fait par aspiration sous vide ou par plaquage par injection d'air. Il est possible de réaliser des pièces dont les parois sont fines et des pièces de grande taille. Les plaques de thermoplastique sont particulièrement adaptées à ce type de transformation. Cette technique est utilisée pour produire des objets aux formes géométriques simples comme des pots de yaourts, des cabines de douche, des baignoires, des éléments de carrosserie.

g) **Compression**

La méthode consiste à presser directement la matière plastique dans l'empreinte d'un moule à chaud. La matière à mouler, pastillée ou non, préchauffée ou non, est introduite dans un moule chaud, puis comprimée pendant un temps bien défini. Technique surtout très utilisée pour transformer des matières en les comprimant fortement dans un moule. Ces matières (thermodurcissables) pour la plupart auront la particularité de ne plus fondre après moulage (pièces automobiles, électriques, poignées d'ustensiles ménagers, etc...)

h) **Calandrage**

Le calandrage est un procédé de laminage utilisé pour la production de feuilles et de films plastiques. La résine thermoplastique chauffée et fondue est placée entre des rouleaux chauffants qui opèrent comme les anciennes essoreuses. Les rouleaux sont de plusieurs tailles et tournent donc à des vitesses légèrement différentes pour transformer le plastique en feuilles ou en fine pellicule. Le film est ensuite refroidi puis enroulé sur de grosses bobines. Ce procédé est souvent utilisé pour transformer les polymères en produits plats de grande largeur comme des nappes, des revêtements d'ameublement ou de maroquinerie car on peut donner par exemple une texture sur des matériaux synthétiques qui imitent le cuir.

i) **Extrusion Cast**

Cette technique permet de mettre en forme des films de quelques micromètres (10 à 300 µm). La matière plastique à l'état fondue est passée au travers d'une filière plate puis étirée et refroidie sur un rouleau. Les vitesses d'extrusion sont très élevées et permettent de fabriquer des films de qualité à très grande vitesse.

j) Le rotomoulage

Le moulage par rotation est une méthode de transformation des polymères permettant la production d'articles creux avec des contenances très diversifiées (de quelques dixièmes du litre à des milliers de litres). Le moulage par rotation permet de produire des petites et des grandes séries de pièces

Chapitre II : Le procédé d'extrusion des matières plastiques

II. 1.Présentation

L’extrusion est un procédé très utilisé en plasturgie puisque la majorité des matières thermoplastiques est au moins extrudée une fois lors de sa préparation, néanmoins d’autres sortent sous forme d’objets finis. L’extrusion est largement utilisée pour la fabrication des produits semi-ouvrés tels que : plaques, feuilles, tubes.

L'extrusion est un procédé continu consistant à mettre en forme ou à transformer des polymères au sein d’un système vis/fourreau. Sauf quelques rares exceptions, les mécanismes impliqués sont purement thermomécaniques et tout processus chimique est à proscrire a priori. On parle d’extrusion réactive lorsque des transformations chimiques sont volontairement générées, de manière contrôlée. L’extrudeuse devient alors un véritable réacteur continu. L’extrusion est une très vieille technique, connue depuis très longtemps pour la fabrication des produits alimentaire : pâtes… En 1879, les extrudeuses à vis font leur entrée. Mais c’est seulement en 1939 que la première extrudeuse pour thermoplastique a été mise au point, par une société allemande. Cette extrudeuse était de conception très novatrice et a longtemps servi de référence : chauffage électrique, refroidissement par air, régulation de la température, vitesse de vis variable.

L’extrudeuse est une machine qui transporte et transforme des produits solides ou liquides à l’aide d’une ou de plusieurs vis tournant dans un fourreau et les force d’une façon continue dans une tête d’extrusion. Les matériaux mélangés et plastifiés au cours de leur transfert à l’intérieur du fourreau peuvent être chauffés, refroidis (parfois) et dégazés ; ils peuvent passer à travers un filtre avant d’être extrudés à l’aide d’une filière ou d’une filière et d’un poinçon

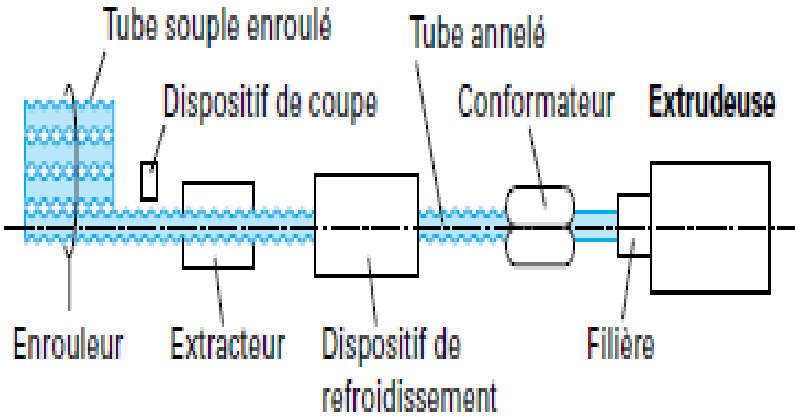
II.2. Principe de l’extrusion

L'extrusion est un procédé de transformation en continu. Cela consiste à introduire le plastique sous forme de poudre ou de granulés dans un cylindre chauffant à l'intérieur duquel il est poussé par une vis sans fin. En avançant, la matière ramollit, se comprime, puis passe à travers une filière qui lui donne la forme souhaitée.

II.3. Composition d'une ligne d'extrusion

Les lignes d'extrusion se composent généralement de la façon suivante :

- Une ou plusieurs extrudeuses, mono-vis ou bi-vis
- Une filière d'extrusion
- Un dispositif de conformation
- Un bac de refroidissement
- Un banc de tirage
- Un banc de découpe
- Un banc de réception ou enrouleur



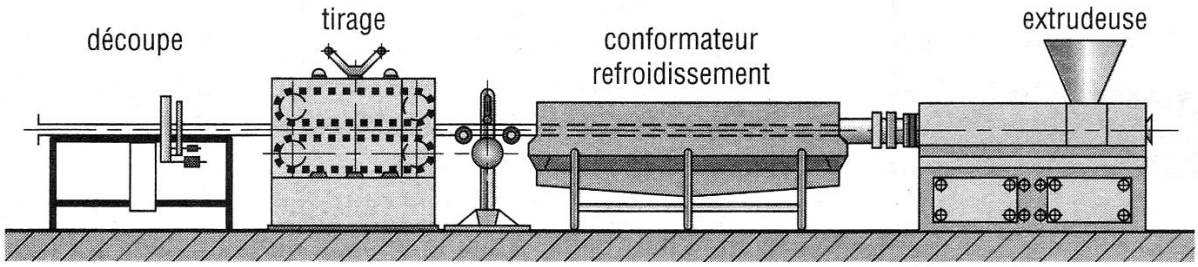


Figure II.1: Extrusion de tubes

II.4. Principaux éléments des extrudeuses

L'extrudeuse se compose de 5 modules :

- La vis-cylindre et son équipement
- La tête d'extrusion porte filière
- La centrale de commande et de contrôle
- Le groupe moteur
- Le châssis

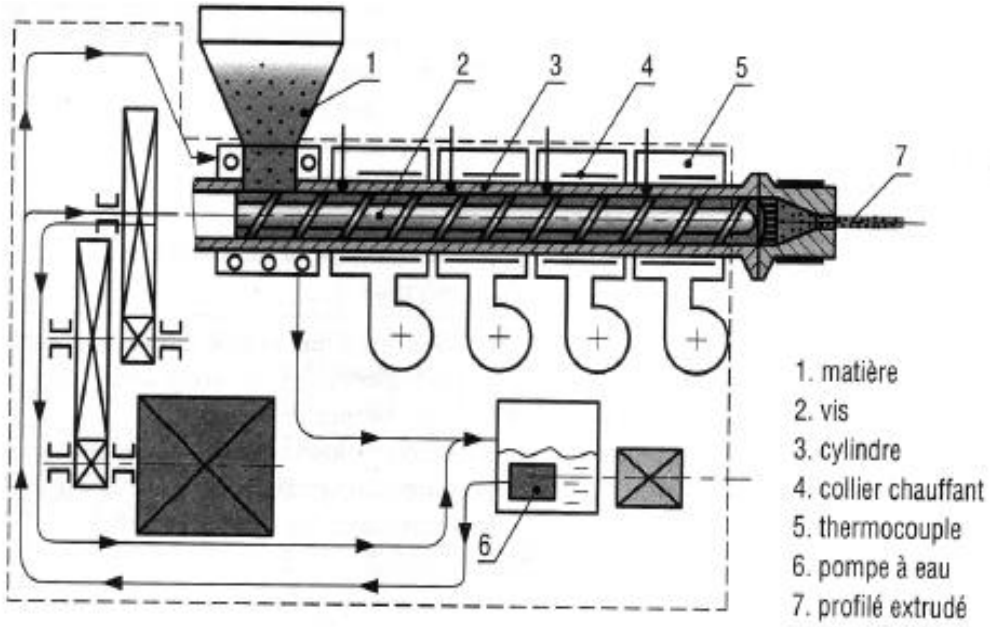


Figure II.2: Principaux élément de l'extrudeuse.

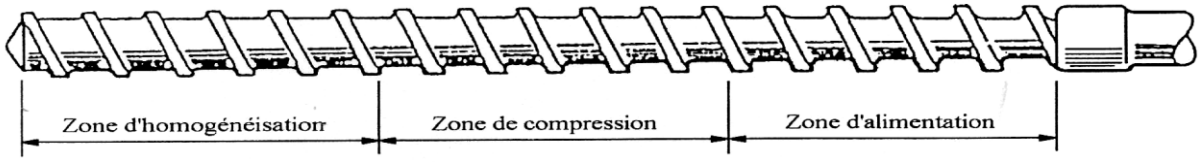
❖ **La vis**

La vis représente l'élément principal de l'extrudeuse. Elle est caractéristique à chaque matière, à chaque machine. Elle tourne à l'intérieur d'un cylindre chauffé et elle est entraînée par un moteur électrique. Une vise d'extrusion présente plusieurs caractéristiques:

- ✓ Longueur active et le diamètre extérieur de la vis. La longueur active correspond à l'écart entre le bord aval de l'ouverture d'alimentation et l'extrémité de l'alésage du cylindre.
- ✓ Le rapport L/D (Longueur active divisée par le diamètre) est devenu la caractéristique de désignation. Les extrudeuses les plus courantes ont un rapport L/D de 25 ce rapport peut aller j'jusqu'a 35 pour obtenir des pressions et des débits d'extrusion importants.
- ✓ Le jeu entre le sommet des filets de la vis et le cylindre varie de 0,8 à 0,12 mm pour les diamètres de vis inférieurs à 40 mm.
- ✓ Les vis sont en acier allié à haute résistance à la fatigue.

La vis se compose de 3 zones différentes :

- ➢ Zone d'alimentation : Transport solide des granulés et assure le débit matière.
- ➢ Zone de compression : Fusion de la matière.
- ➢ Zone d'homogénéisation : Transport liquide et donne la régularité du débit.



Les longueurs de ces différentes zones et leur profil peut être différent, On retrouvera :

- Vis à profil pour matières amorphes.
- Vis pour matières semi-cristallines
- Vis pour matières spécifique.

Figure II.3: Vis pour matière amorphe

Figure II.4: Vis pour matière semi cristalline

❖ **La tête d'extrusion porte filière**

Le rôle de la tête d'extrusion est de laisser passer la matière plastifiée par la filière qui lui donne la forme de la section voulue. Entre le cylindre et la tête est fixé le porte-tamis, appelé aussi la grille de répartition. Il se place à la jonction tête / fourreau. Elle assure le filtrage des impuretés. Il existe des tamis de différentes tailles de maille afin d'améliorer la filtration.

- ✓ Elle augmente la pression en bout de vis (obstacle à l'écoulement de la matière).
- ✓ Elle régularise le flux de matière (casse le flux hélicoïdale de la matière).
- ✓ Elle assure la jonction : c'est un élément d'étanchéité et de centrage entre la tête et le fourreau.

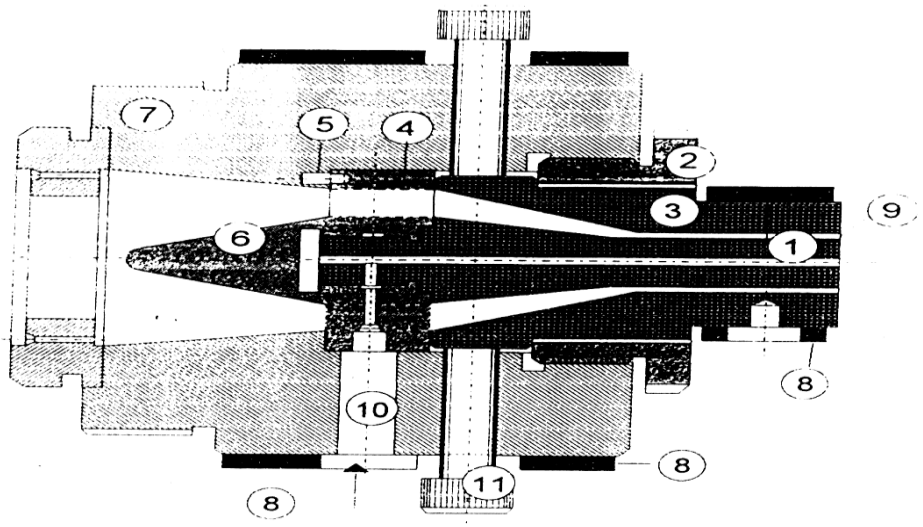


Figure II.5: Tête d'extrusion

1. Poinçon
2. Bague de serrage de la filière
3. Filière
4. Entretoise porte-poinçon ou étoile
5. Goupille de positionnement du porte-poinçon
6. Nez profilé du porte-poinçon
7. Corps de la tête d'extrusion
8. Colliers chauffants
9. Entrefer
10. Prise d'air pour gonflage
11. Vis de réglage de positionnement du poinçon.

❖ **Types de tête d'extrusion**

On distingue 4 types de têtes d'extrusion :

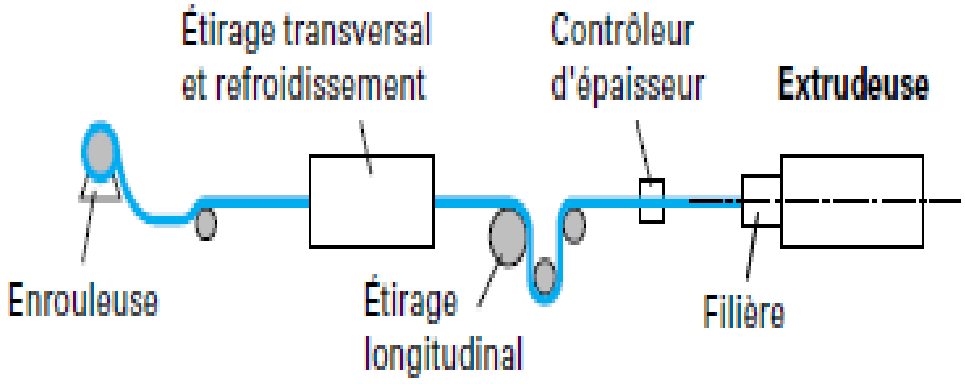
- La tête d'extrusion droite pour la fabrication des profilés et des tubes.
- La tête d'équerre verticale pour l'extrusion soufflage et l'extrusion gonflage
- La tête d'équerre horizontale ou oblique pour le recouvrement des câbles
- Les têtes spéciales pour l'extrusion de feuilles et de plaques (tête plate), l'enduction de papier et la coextrusion.

❖ **Filières**

A la sortie de l'extrudeuse, le polymère fondu entre dans une filière, qui a pour but de répartir le flux de matière et de le faire passer à travers un orifice. La filière est l'outil qui donne la forme au flux de la matière plastifiée, afin d'obtenir le profil demandé. Elle est

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

- ✓ Filières sans poinçon pour les profils pleins (joncs, fils, plaques): qui sont coupés sous eau à grande vitesse pour produire des granulés, ou qui servent à l'usinage de pièces mécaniques.
- ✓ Filières avec poinçon pour les profils creux (tube à section circulaire, rectangulaire, paraisons, gaines.
- ✓ Filières avec poinçon monté sur tête d'équerre pour la réalisation de gainage de câbles, de gaines gonflées.
- ✓ Filières pour la coextrusion (à entrées multiples pour les profils pleins, pour le gainage et pour l'extrusion de films).
- ✓ Filières pour plaques, feuilles et films *:* quand l'épaisseur du polymère est importante, de 1 à plusieurs millimètres, on parle de plaque. Celle-ci est généralement conformée et refroidie entre des cylindres, puis découpée à la dimension désirée. Les feuilles et les films sont des produits plus minces pouvant être enroulés sous forme de bobines. Une installation classique d'extrusion de film à plat, ou procédé cast-film, est schématisée sur la Figure 6. Le polymère est extrudé à travers la filière plate, étiré sur une courte distance dans l'air, de l'ordre de 10 cm, et refroidi par contact avec un rouleau thermostaté.



.

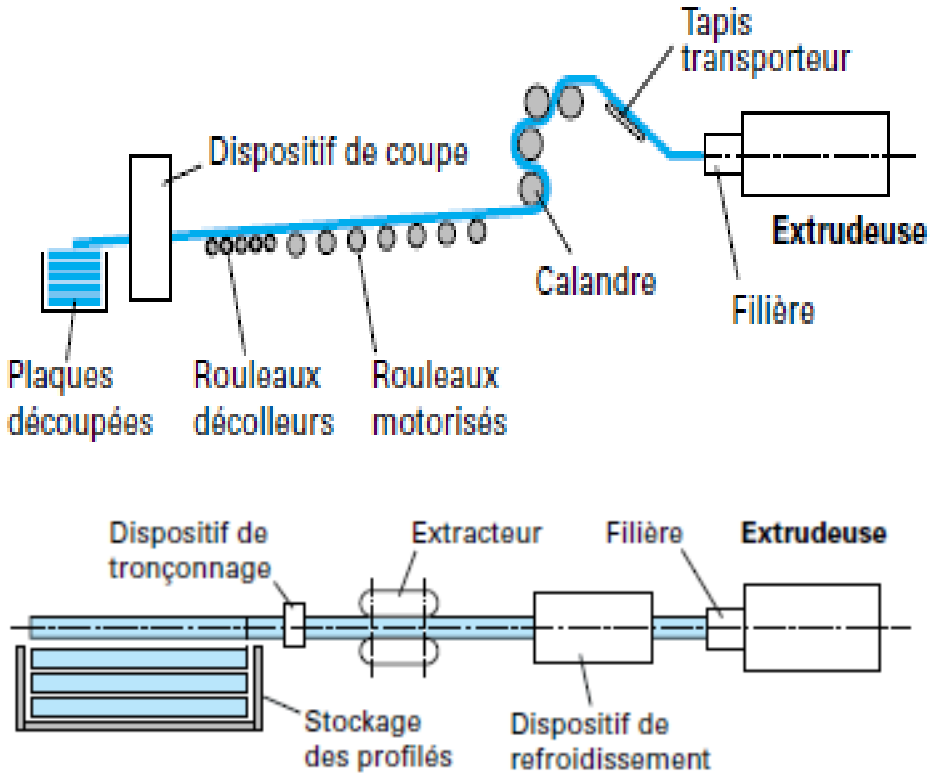


Figure II.6 : Quelques installations d'extrusion

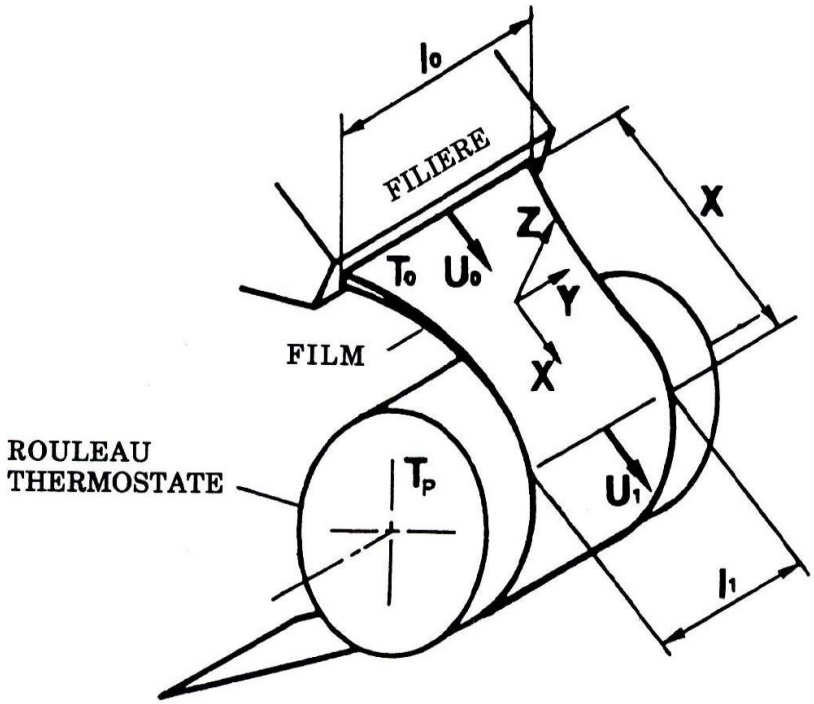


Figure II.7: L'extrusion de film Plat.

II.5. L'extrudeuse mono-vis

Une extrudeuse monovis est constituée d'une vis sans fin en rotation à l'intérieur d'un fourreau chauffé. Ce système assure les trois fonctions suivantes. La plupart des polymères passant au moins une fois dans une extrudeuse, ne serait-ce que pour être granulés. Une extrudeuse monovis est constituée d'une vis sans fin en rotation à l'intérieur d'un fourreau chauffé. Ce système, issu de l'industrie alimentaire et de l'industrie du caoutchouc, assure les trois fonctions suivantes :

- **Une fonction de convoyage :** le polymère descendant de la trémie sous forme de poudre ou de granulés est compacté et convoyé : c'est le principe de la vis d'Archimède ; Ses fonctions sont d'accepter et de convoyer les granulés en provenance de la trémie, mais également de les compacter axialement et de les agglomérer sous l'effet de la fusion partielle des granulés au contact du fourreau. Le diamètre intérieur de la vis est généralement constant dans cette zone. La profondeur minimale des filets est fixée par la taille de granulés, ce qui impose une profondeur minimale de 4 mm environ ; faute de quoi les granulés ne pourront tomber dans le filet, à moins d'utiliser des granulés spéciaux de très petite taille. La profondeur maximale des filets est limitée par l'efficacité de l'échauffement de la matière par conduction et par la résistance mécanique de la vis à la torsion lors de la plastification et au flambage lors de l'injection. La longueur utile de la zone d'alimentation, située devant l'orifice est généralement fixée supérieure à 6 *D*, c'est-à-dire six fois le diamètre de la vis. Si la course maximale de dosage est de 4 à 5 *D* et l'orifice d'alimentation de 1 *D*, la longueur totale de la zone d'alimentation sera de 12 *D*.
    - **zone de compression**, également appelée **zone de plastification**. Elle a pour fonctions de comprimer les granulés infondus, de les agglomérer à la matière déjà fondue de chasser l'air ou les gaz éventuellement présents et d'échauffer la matière par cisaillement. Le passage de l'état solide à l'état liquide est réalisé progressivement grâce à la fois à la chaleur fournie par conduction et à la dissipation d'énergie de cisaillement ; La variation de la profondeur du filet lui permet de remplir ces fonctions. Le rapport entre la profondeur de filet au début et à la fin de la zone détermine le taux de compression. Le taux de compression idéal dépend entre autre de la proportion d'air présent entre les granulés à l'entrée de la vis. Il est généralement compris entre 1,8 et 2,2. La longueur de la zone de compression détermine l'importance du cisaillement subi par la matière. Une longueur de 1 à 2 fois le diamètre conduit à une très forte augmentation de pression qui génère un cisaillement

beaucoup trop élevé. La longueur de la zone de compression est généralement fixée à 4 à 5 *D*.

- **Une fonction de pompage**: le diamètre de la vis augmente entre la zone d'alimentation et la zone terminale de l'extrudeuse, ce qui aboutit à mettre le polymère liquide en pression pour obtenir un débit régulier dans la filière. Elle transporte et homogénéise la matière fondue. La profondeur des filets est constante dans cette zone. La température de la matière y est proche de la température de transformation et le temps de séjour à cette température des matières thermosensibles est limité. Le temps de séjour est directement lié au volume de matière ; c'est pourquoi la longueur de la zone de pompage est habituellement limitée à 4 *D*.

❖ La **longueur totale de la vis**, hors tête de vis, est de 20 *D* environ. L'utilisation de vis plus longues, destinées à accroître le débit de plastification et l'homogénéité de la matière pose des problèmes de dégradation dus à l'élévation du temps de séjour de la matière, pour un gain en débit limité. La transformation de matière très sensible demande l'utilisation de vis courtes de 10 à 14 *D*, afin de limiter le temps de séjour à haute température.

❖ Le **diamètre de la vis** détermine le débit de plastification. Le volume de la moulée est également à prendre en compte, car le diamètre détermine la course de la vis. Si la course de la vis est insuffisante, les variations de volume dues à la fermeture du clapet, à la position de la vis et à l'état de la matière en fin de plastification nuisent à la nécessaire précision et la stabilité du process. On considère qu'une course correspondant à une fois le diamètre est insuffisante, même pour l'injection de pièces n'exigeant pas une grande précision. La valeur de la course d'injection considérée comme idéale sur des bases empiriques est de 3 à 4 *D*.

❖ Le **profil de la paroi du filet** n'est pas symétrique, car il est dessiné pour favoriser le transport de la matière, et surtout la formation d'une poche liquide le long du filet arrière, en minimisant la stagnation de la matière fondue. Le jeu entre la vis et le fourreau est nécessaire pour éviter les frottements.

S'il est trop faible, le cisaillement du film de matière situé dans l'entrefer est très important et provoque la dégradation de la matière. Si le jeu est trop important, les fuites de matière dans l'entrefer pendant le dosage diminuent le débit de plastification.

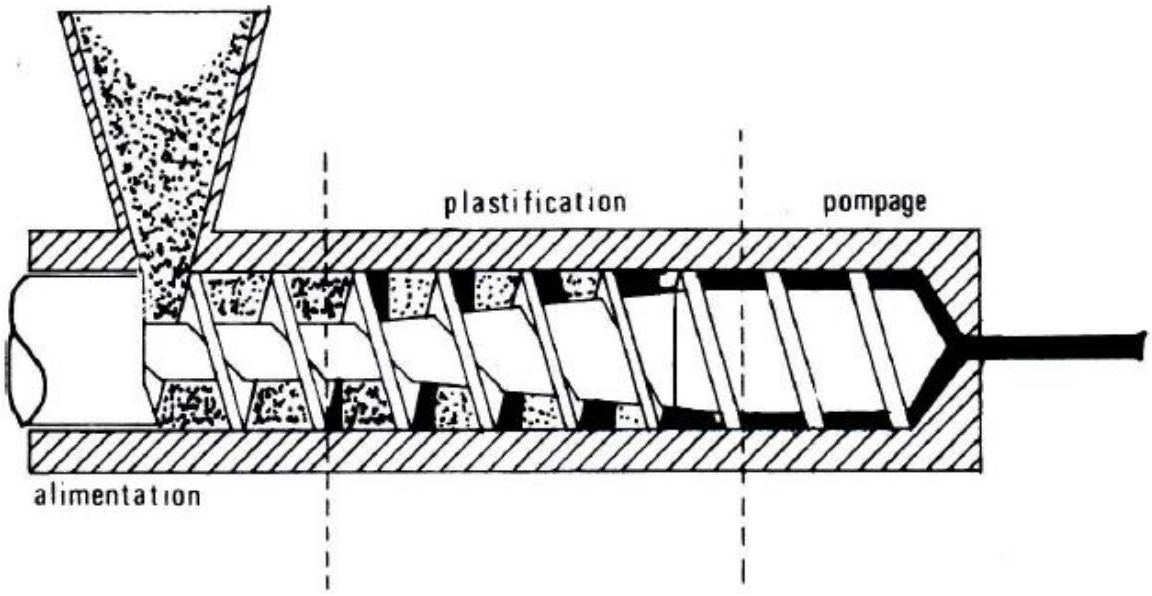


Figure II.8: Schéma de principe d'une extrudeuse mono-vis

Lors de l'injection, les forces de pression exercées sur la tête de la vis sont importantes, 100 kN pour une vis de diamètre 30 mm par exemple. Pour éviter le flambage, il faut conserver un diamètre à fond de filet suffisant. Cette contrainte et la nécessité d'une profondeur minimale des filets limitent le diamètre minimal des vis utilisables. Pour des diamètres compris entre 15 et 20 mm, des granulés spéciaux sont indispensables. Pour des diamètres inférieurs, la solution est d'utiliser un dispositif à pot de transfert. Cela est le cas de l'injection de très petites pièces qui nécessite l'injection de faibles quantités et donc le déplacement d'un piston de faible diamètre, ce qui exclut l'utilisation de vis sans fin.

Le cycle d'injection comporte une phase de dosage, où le process de fusion de la matière est proche de celui de l'extrusion monovis, suivie d'une phase où la vis est immobile où les transferts thermiques sont issus de la conduction. Cela rend difficile l'obtention d'une température homogène dans la matière fondue.

Pour améliorer l'homogénéité de la matière plastifiée, il est possible d'insérer une zone de mélangeage entre la vis standard et la tête de vis. Il est important que la longueur de la vis modifiée soit identique à la longueur de la vis d'origine afin qu'elle soit compatible avec le fourreau et le dispositif de pilotage existant.

La transformation de polymères chargés de matières abrasives comme les fibres de verre, ou corrosifs comme les ignifugeants augmente l'usure et réduit la durée de vie de la vis. Elle est également diminuée par la transformation à haute température et à pression élevée.

Il est possible d'améliorer la durée de vie de la vis par un blindage à base d'alliage de cobalt sur un acier au chrome trempé et revenu. Les meilleurs résultats sont souvent obtenus en utilisant les aciers à outils, actuellement issus de la technologie des poudres.

Lors du changement de production, il faut souvent changer de matière. Cela est problématique, notamment dans le cas où une matière à faible viscosité vient remplacer une matière à forte viscosité. Le changement de matière est facilité par la construction de la vis et tête de vis sans zone de stagnation. Malgré cela, la durée du changement de matière est quelquefois telle qu'il est préférable de remplacer l'ensemble vis et fourreau par un ensemble propre. Cette opération sera facilitée par une construction adéquate.

II.6. Extrudeuse bi-vis

L'extrudeuse se compose de 2 vis qui tournent dans deux orifices du cylindre et dont les axes sont parallèles à l'axe principal de ce cylindre.

L'extrudeuse bi-vis est conseillé pour :

- ✓ La production de profilés de grandes dimensions
- ✓ Les matières plus rigides
- ✓ Un dégazage plus facile
- ✓ L'alimentation régulière
- ✓ Des débits plus importants

❖ **Grandes familles de vis**

- Les vis corotatives : les deux vis tournent dans le même sens de rotation
- Les vis contrarotatives : les deux vis tournent dans le sens inverse de rotation

➢ Si les 2 vis tournent dans le même sens (corotatives), la matière s'écoule dans un espace en forme de 8 et subit un malaxage très fort

➢ Si les deux vis tournent en sens inverse (contrarotatives), la matière est enfermée dans un espace en forme de C et subit un broyage très fort.

Dans tous les cas, la matière doit pouvoir circuler, d'une vis à l'autre, pour permettre une meilleure homogénéisation.

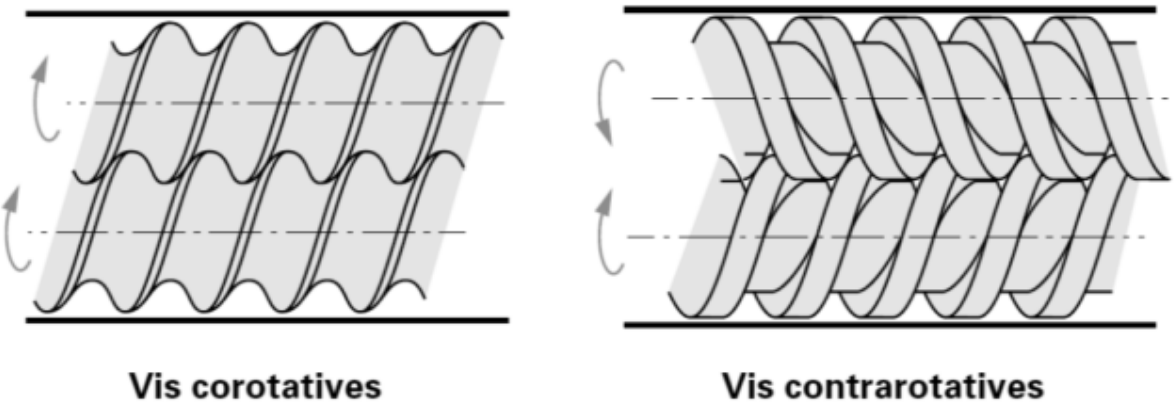


Figure II.9 : Familles de vis

❖ **Principaux éléments des extrudeuses bi-vis**

1. Poinçon
2. Filière
3. Vis de réglage
4. Tête d'extrusion
5. Extrudeuse
6. 2 Vis de plastification
7. Grille / Tamis

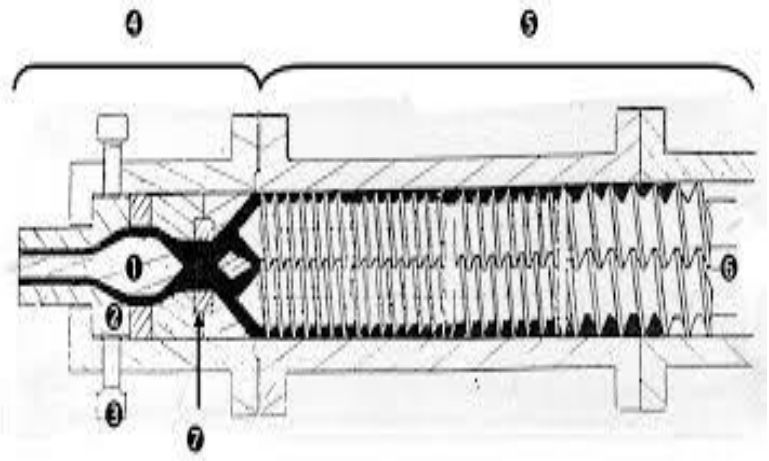


Figure II.10: Extrudeuse bi-vis

II.7. Nettoyage des extrudeuses

L'utilisation des extrudeuses impose de fréquents nettoyages des vis d'extrusion et des outillages tels que les filtres, les filières, les têtes d'extrusion. Pour ôter la matière plastique qui adhère sur les surfaces de ces composants, les opérateurs effectuent un grattage manuel pendant que les pièces sont chaudes. Ils sont exposés aux risques de brûlure par contact avec

les surfaces et par projection de matière. Lorsque ce procédé est utilisé, l'opérateur doit porter les protections individuelles adaptées.

Pour supprimer les risques liés au nettoyage manuel, il est possible d'éliminer la matière adhérant aux surfaces métalliques par trempage dans un bain de sel ou par décapage dans une étuve en présence d'un lit fluidisé d'alumine chauffée, par exemple.

II.8. Applications

Les matières thermoplastiques extrudées au travers d'une filière donnent de multiples profilés adaptés à des secteurs tels que :

- Le bâtiment,
- L'ameublement,
- L'automobile,
- Les loisirs
- L'agriculture,
- Le médical,
- L'électronique,
- L'aéronautique.

II.9. Les mélangeurs internes

❖ Description générale

Tous les mélangeurs internes fonctionnent suivant le même principe. Ils sont composés principalement de deux rotors tournant en sens contra-rotatif et d'une chambre de mélange dans laquelle la matière est introduite. Le premier fut inventé par Pfeiderer en 1876, avec des rotors plats, suivi en 1913 par le mélangeur Banbury (figure II.11).

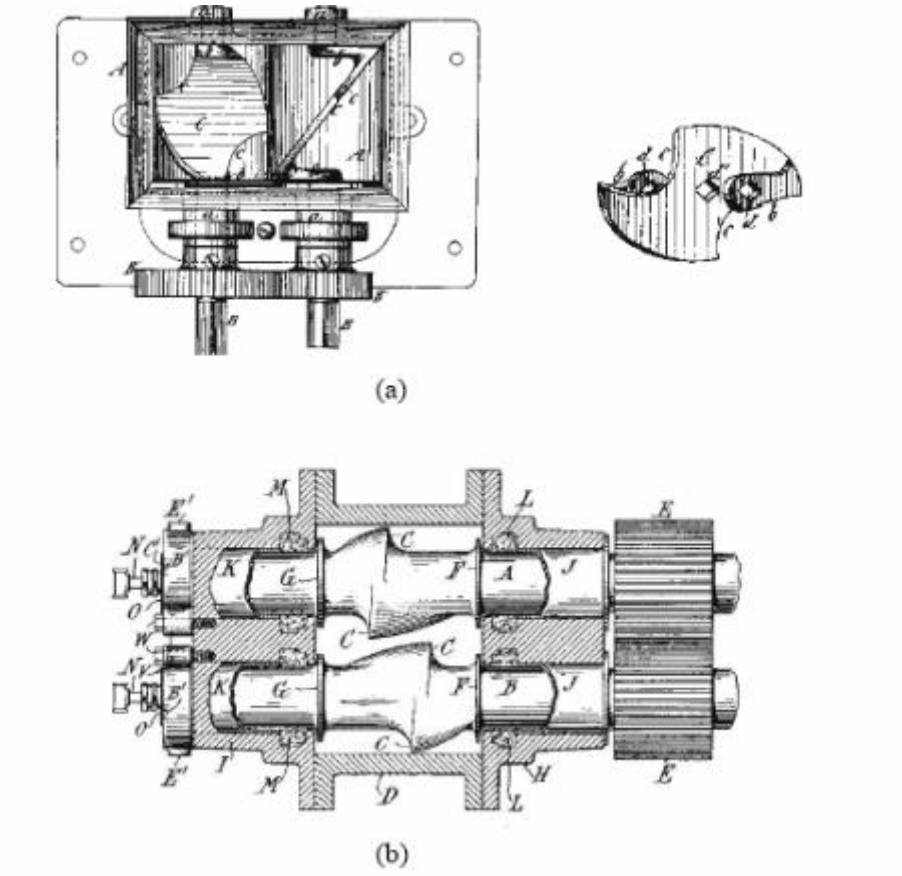


Figure II.11: (a) Mélangeur interne dessiné par Pfeiderer (1880) (b) Mélangeur interne de type Banbury (1931) (White (1995))

Le mélangeur interne que nous avons utilisé est un Haake Rheomix 600 (figure II.8) disposant d'une capacité de mélange d'environ 50 grammes. La cuve du malaxeur est composée de 3 parties :

- La paroi arrière ;
- La chambre centrale ;
- La paroi avant.

Ce dispositif est chauffé électriquement dans un domaine de température allant de 30°C à 400°C et peut être refroidi par air comprimé. Différents thermocouples permettent de connaître les températures régnant dans le mélangeur dont un, émergeant au centre de la chambre de mélange entre les deux pales, est destiné à la mesure de la température de la matière. Cet appareil permet la mesure du couple induit par la matière qui traduit le comportement rhéologique du polymère ou du mélange présent dans la chambre.

Figure II.12: Le mélangeur interne Haake Rheomix 600

❖ **La géométrie des rotors**

La géométrie des rotors peut différer selon les mélangeurs. Ils peuvent être tangentiels ou interpénétrants, ces derniers permettant d'obtenir des taux de cisaillement plus importants (figure II.13).

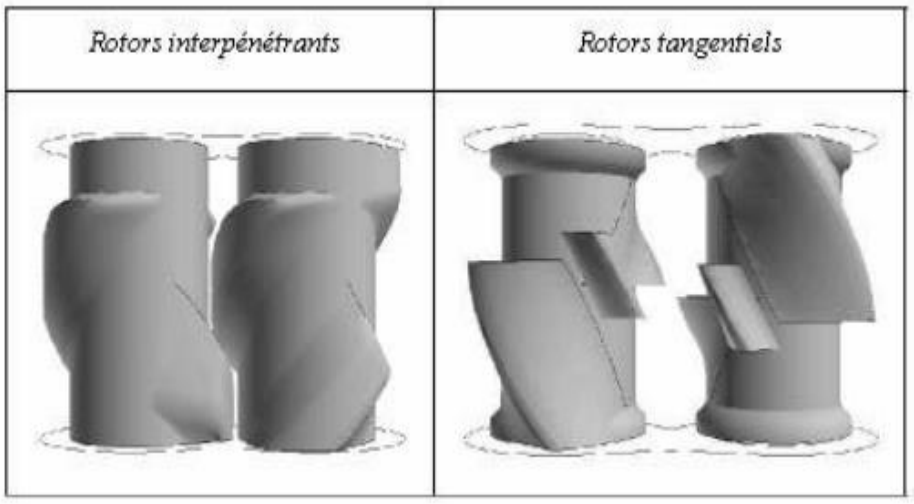


Figure II.13 : Schéma des rotors tangentiels et interpénétrants .

La figure II.14 montre quatre géométries différentes :

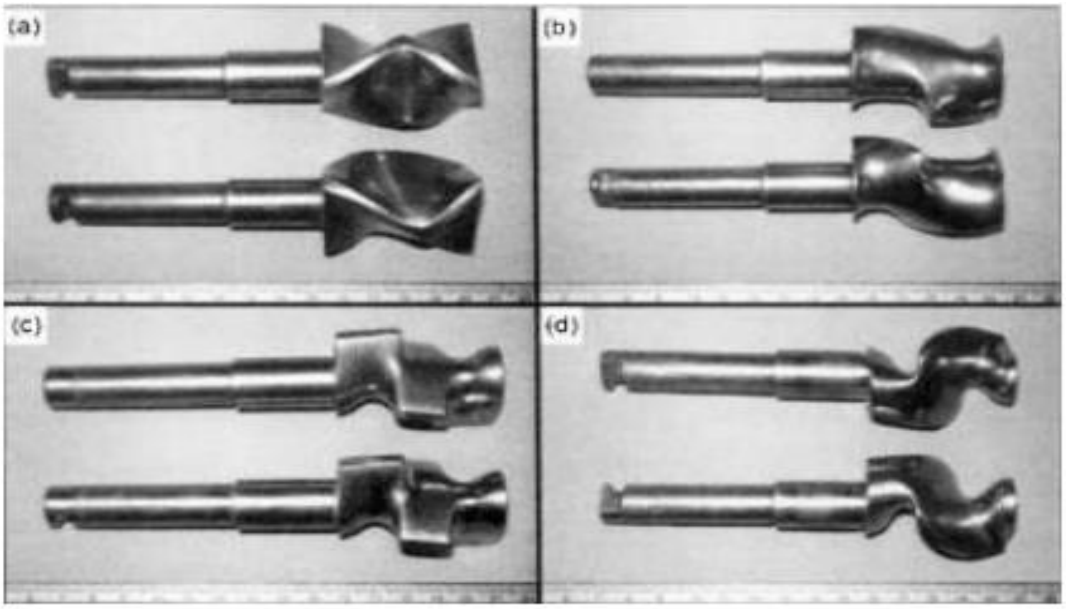


Figure II.14: Différents types de rotors pour mélangeurs internes :
(a) roller, (b) Banbury, (c) cam, (d) sigma

Pour étudier l'écoulement des fluides suivant la géométrie utilisée, il est possible d'effectuer une représentation plane d'un rotor en définissant plusieurs paramètres sa longueur L ;

- Le nombre d'ailettes et leurs positions sur le rotor lui-même ;
- Les angles de torsion ;
- La longueur des ailettes;

Chapitre III: Le procédé d'injection

III.1. Présentation

Le procédé d'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en une seule opération. Le procédé injection est destiné à produire très rapidement des objets en très grandes quantités. Cette technique permet d'obtenir en une seule opération des pièces finies en matière plastique, de formes complexes, dans une gamme de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes. La matière, en granulés, ramollie par la chaleur est injectée dans un moule sous forte pression. Après refroidissement ces moules permettent la réalisation d'objets de dimensions et formes variables, ainsi que de pièces techniques très complexes et de grandes précisions.

❖ Paramètres d'injection

L'injection plastique est sur une presse d'injection est gouverné par plusieurs paramètres sur lesquels il faut agir et les optimiser, ces paramètres sont:

- Force de verrouillage
- Temps de dosage
- Vitesse d'injection
- Débit d'injection
- Temps d'injection
- Pression d'injection
- Pression de maintien
- Temps de maintien

III.2. Les Presses d'injection

Une presse d'injection des thermoplastiques est composée par les ensembles suivants :

- Ensemble d'injection et de plastification (trémie, fourreau, vis).
- Ensemble de fermeture (moule, vérin de fermeture).
- Ensemble hydraulique (système hydraulique).
- La partie commande

Une machine est caractérisée par :

- La force de fermeture qui est comprise entre 50 tonnes et 3000 tonnes
- La pression sur la matière injectée qui peut atteindre 2000 bars
- La capacité d'injection (en cm^3 ou en kg)

Suivant le sens d'injection on distingue :

- Les presses verticales (faible capacité)
- Les presses horizontales (machines plus fréquentes).

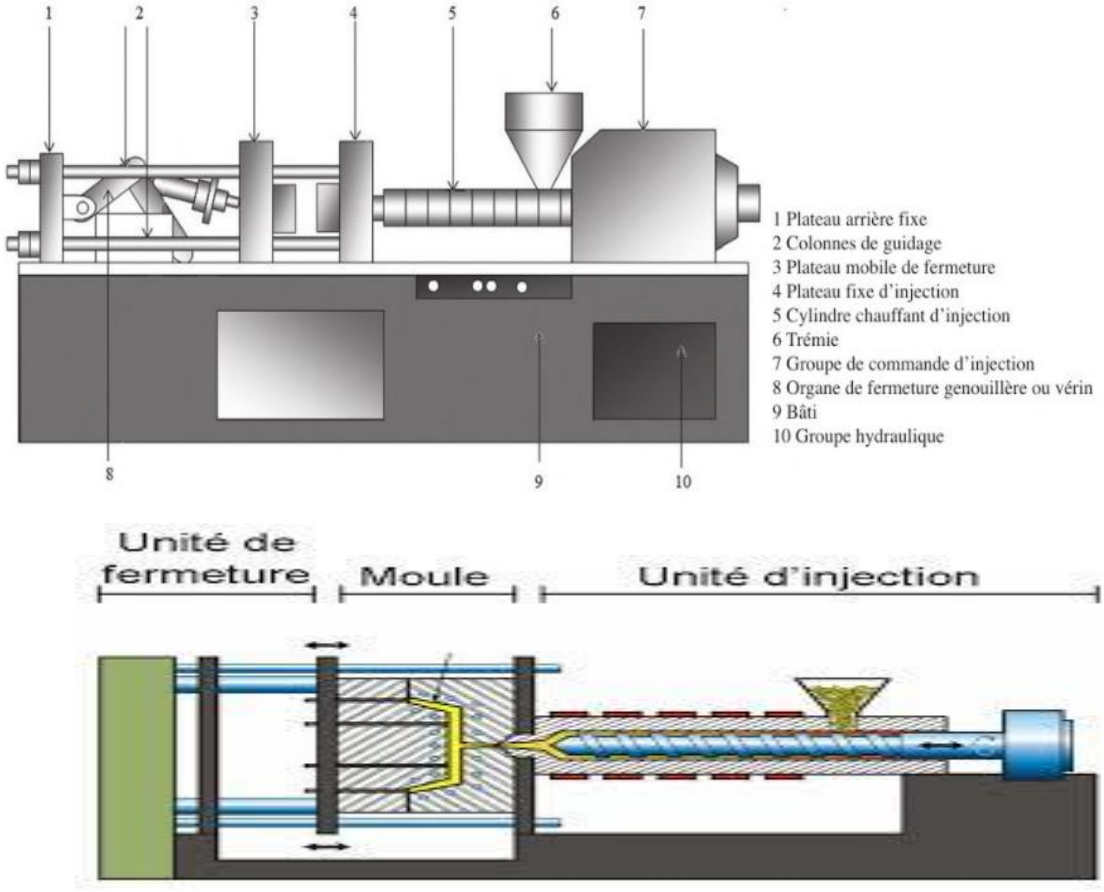


Figure III. 2. Les parties constituantes d'une Presse d'injection.

Figure III.3: Photo d'une presse d'injection industrielle.

III.3. Les phases d'injection

Les différentes phases du cycle d'injection se déroulent de la manière suivante (Figure III.4) :

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Recommencer avec la prochaine pièce.

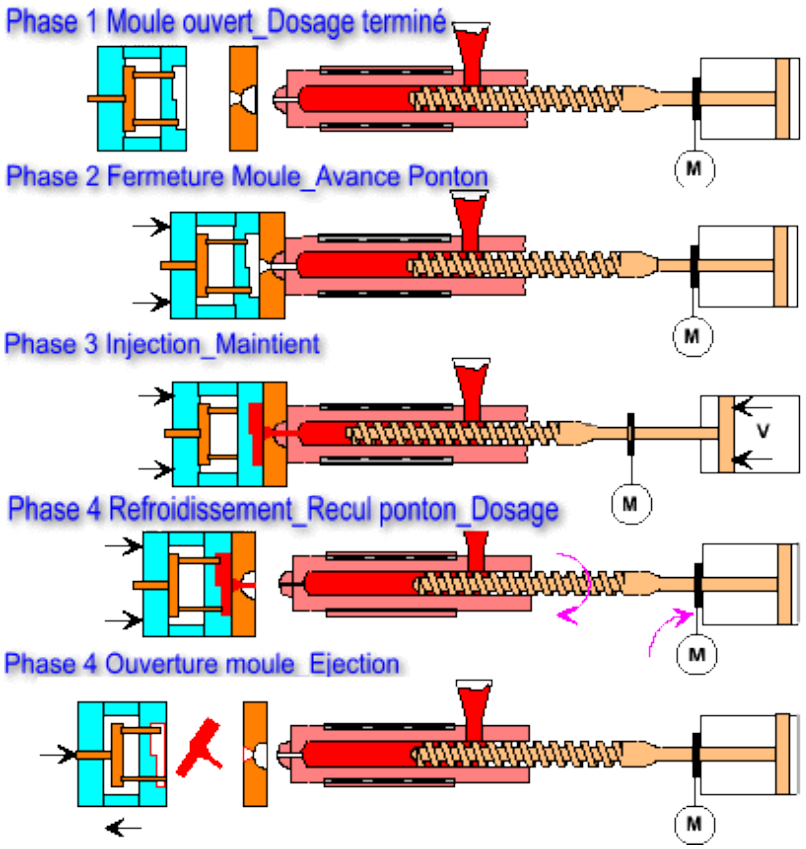


Figure III.4 : Les différentes phases du cycle d'injection.

III.4. Système d'injection à vis mobile

De loin le plus répandu, le système d'injection à vis mobile combine la plastification de la matière par un système vis-fourreau d'extrudeuse et l'utilisation de la vis de plastification comme piston d'injection.

Il se compose d'un fourreau thermo-régulé, d'un système d'alimentation en matière, d'une vis mobile, d'un système d'entraînement en rotation de la vis, d'un système d'entraînement en translation de la vis, d'un bâti mobile appelé ponton et d'un système de guidage et de mise en appui du ponton.

- Le **fourreau** est thermo-régulé afin d'avoir une température suffisante pour faire fondre la matière ou la maintenir à l'état fondu. Il comporte à une extrémité la buse d'injection et à l'autre extrémité le dispositif d'alimentation et les systèmes d'entraînement en rotation et en translation de la vis. La buse d'injection crée la continuité de l'écoulement entre le fourreau et le moule lors de l'injection, et assure son étanchéité au contact avec le moule.
- Le dispositif d'**alimentation**, généralement une trémie, alimente la presse en matière, essentiellement sous forme de granulés.
- Le système d'**entraînement en rotation de la vis** fait tourner la vis pour plastifier la matière pendant la phase de dosage. Lorsque la vis est entraînée en rotation, elle permet de transporter les granulés vers l'avant du fourreau, de faire fondre la matière et de faire progresser la matière fondue vers l'avant du fourreau. Elle agit comme un piston lors de l'injection, soit en exerçant une pression sur la matière fondue, soit en imposant un débit. Elle comporte un clapet anti-retour à son extrémité antérieure, afin d'assurer l'étanchéité avec les parois du fourreau lors de l'injection.
- Le système d'**entraînement en translation de la vis** exerce une force sur la vis ou impose un déplacement afin de créer un écoulement de matière fondue dans le moule lors de l'injection.
- Le **ponton** est mobile afin de venir en appui sur le moule lors de l'injection et de pouvoir s'écarter du moule, pour les opérations de purge et de changement de moule. Le ponton mobile porte le fourreau contenant la vis, le système d'entraînement en rotation et en translation de la vis ainsi que le système d'alimentation en matière.
- Le **dispositif de guidage du ponton** assure le positionnement de la buse par rapport au moule. Il permet ainsi le bon alignement du canal de la buse et de celui du système d'alimentation du moule.

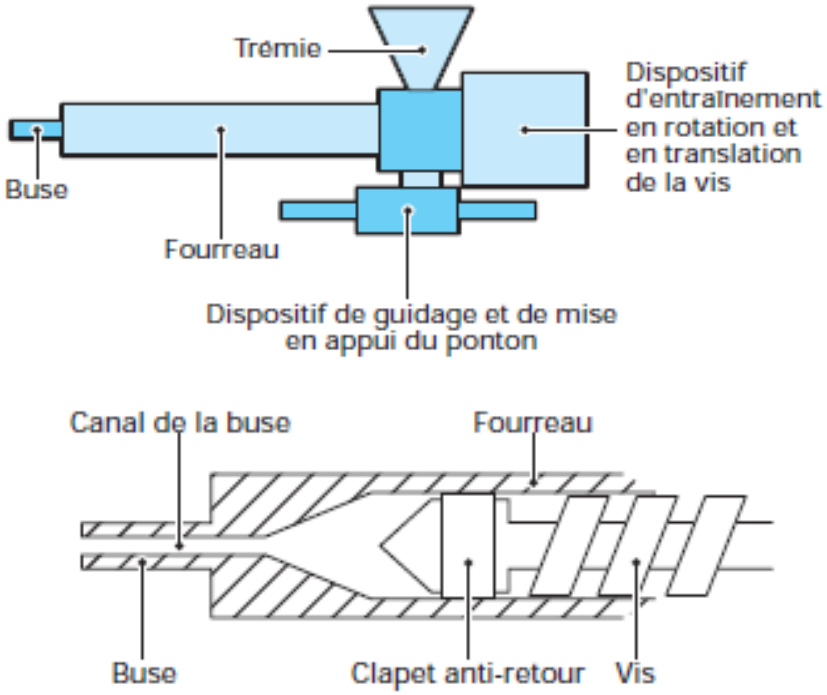


Figure III.5: Détail du système d'injection à vis mobile.

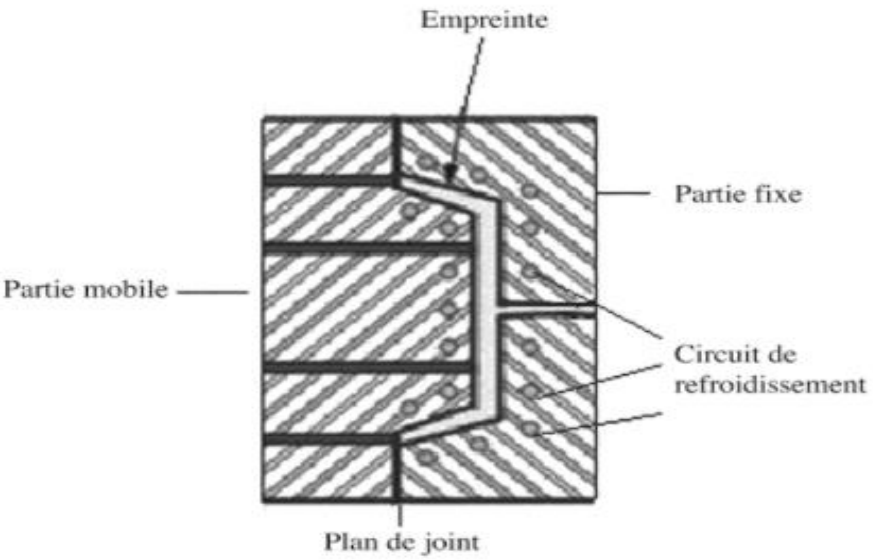


Figure III.6: Fonction du moule d'injection

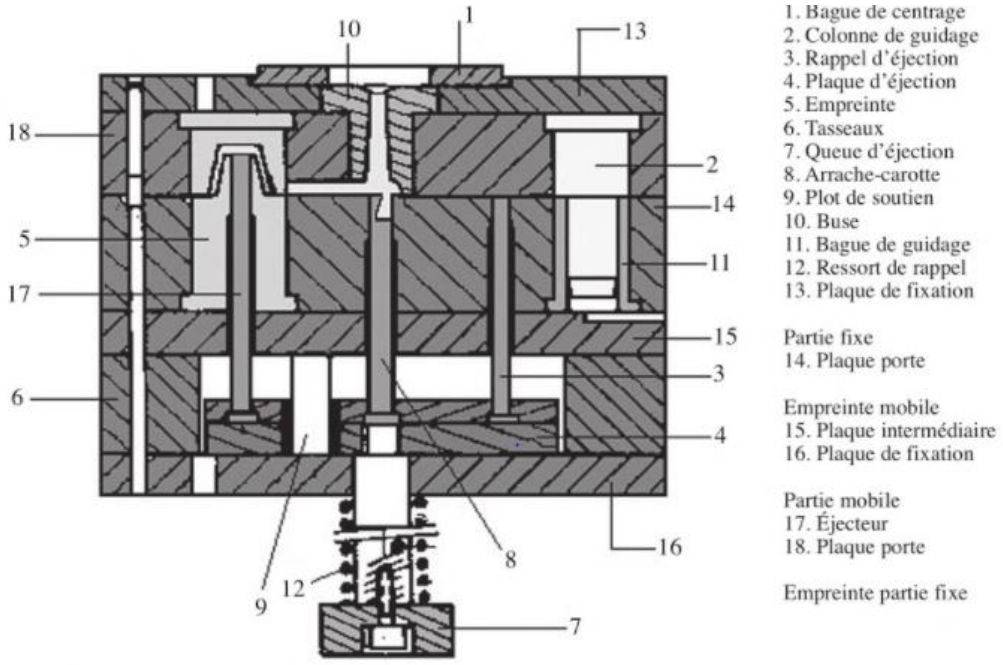


Figure III.7: Coupe d'un moule d'injection

❖ **Clapet anti-retour**

Le clapet anti-retour permet à la vis de fonctionner comme un piston pendant l'injection et comme une vis d'extrusion pendant la phase de plastification. Lorsque la vis commence à avancer. La bague reste immobile grâce aux frottements sur le film de matière formé dans l'entrefer entre le fourreau et la bague. Lors de l'avancée de la vis, la pression créée dans la matière devant la vis plaque le clapet sur son siège.

La matière située entre la bague et le siège est chassée vers l'avant et vers l'arrière de la vis. On peut supposer que la matière s'écoule majoritairement vers l'arrière à cause de la pression créée par l'avancée de la vis.

Avant la fermeture complète du clapet, un écoulement de matière s'établit entre l'avant de la vis, mis sous pression par l'avancée de la vis, et l'arrière du clapet, débouchant sur le filet de la vis. Cet écoulement de matière diminue le volume injecté dans le moule et est assimilable à une fuite de matière vers l'arrière de la vis.

Si les fuites sont constantes d'un cycle à l'autre, le procédé sera stable. Cependant des variations sont inévitables car les fuites sont le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs dont les propriétés rhéologiques de la matière.

Pour limiter les fuites de matière lors de la fermeture et leurs variations, la course de fermeture devra être aussi réduite que possible.

Lors de la phase de plastification, également appelée dosage, le système vis-fourreau fonctionne comme une extrudeuse dont la vis recule sous l'effet de la pression créée par le

pompage de matière fondue devant la vis. La matière peut rester sans dommage à une température décroît rapidement avec l'élévation de cette dernière. Dans les endroits où la matière n'est pas renouvelée au cours des cycles d'injection, son temps de séjour est important et elle subit une dégradation. Pour cette raison, la conception du clapet anti-retour devra exclure toute possibilité d'avoir une stagnation de matière. Lors de la plastification, la vis est entraînée en rotation et se déplace axialement. Le clapet est entraîné en translation par les ailettes de la tête de la vis, alors que les frottements sur le film de matière adhérant au fourreau empêchent sa rotation. La vis est donc en mouvement relatif de rotation par rapport à la bague et le flux de matière sortant de la vis vient plaquer cette dernière sur les ailettes, provoquant une usure par frottement des ailettes et de la bague. La transformation de matière très sensible à la chaleur, comme le PVC, demande une pointe de vis sans clapet anti-retour afin d'éliminer toute stagnation et de minimiser les cisaillements. La même solution est adoptée pour éviter un échauffement par cisaillement des thermodurcissables.

La tête de vis comportant le clapet anti-retour est assemblé par vissage et centrée par une portée cylindrique dans la vis. Le filetage de la vis utilisé est choisi en sens contraire du sens de rotation de la vis, de façon à être vissé lors de la plastification.

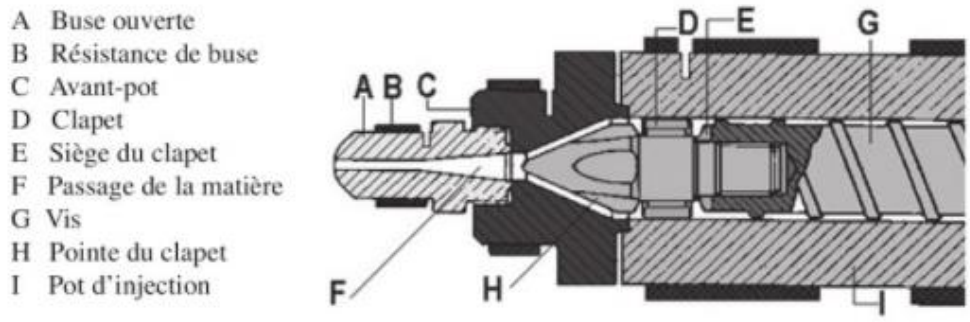


Figure III.8: Bus et clapet

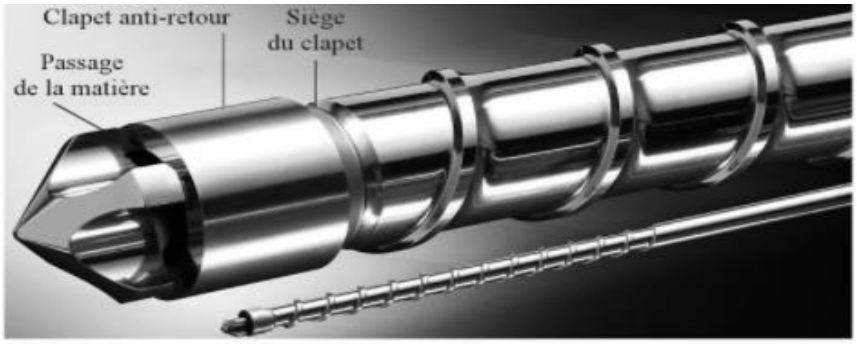


Figure III.9 : Exemple de vis d'injection

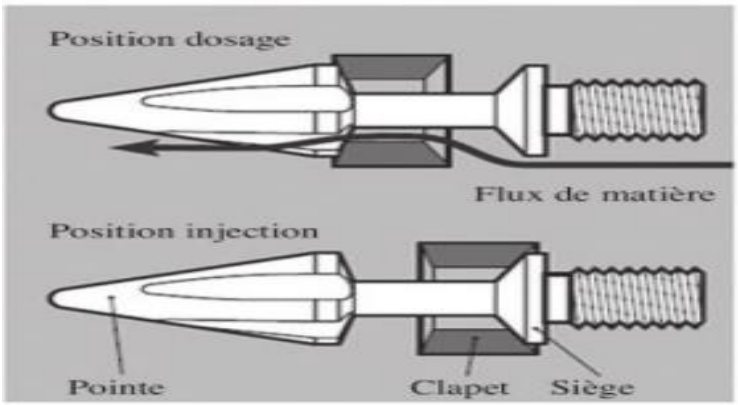


Figure III.10: Clapet anti retour

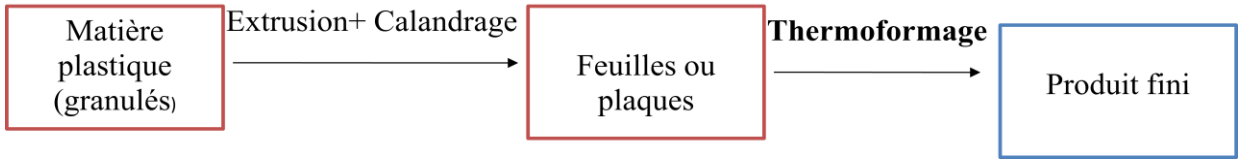
Une presse d'injection est une machine dont les réglages sont complexes. La difficulté essentielle provient de l'interdépendance de certaines grandeurs d'entrée.

Chapitre IV: Le procédé de Thermoformage

IV.1. Présentation

Le thermoformage est une technique de transformation de matières thermoplastiques qui permet la production industrielle d'objets les plus divers tels une barquette d'emballage, un pot de yaourt, une baignoire, etc. L'objet thermoformé s'obtient en deux étapes de transformation du matériau initial. La matière plastique, produite à partir de monomères, se trouve dans la plupart des cas, sous forme de granulés. La première étape de mise en forme, consiste en la fabrication d'une feuille ou d'une plaque par la technique de l'extrusion. La deuxième étape, est le procédé du thermoformage, qui va mener à l'objet final.

Le thermoformage permet de réaliser des objets d'épaisseurs très variables, de quelques dizaines de micromètres à plus d'un centimètre, de travailler à très hautes cadences de production, avec des outillages bon marché, qui compensent le handicap du coût de la matière première, un semi-produit. Aujourd'hui, le thermoformage est un des grands procédés de transformation des polymères thermoplastiques.



IV.2. Principe

Le thermoformage consiste à chauffer une feuille, ou une plaque, à une température permettant sa fusion dans un moule dont elle épouse la forme par action d'une différence de pression entre ses deux faces. Après refroidissement, on obtient l'objet désiré. La mise en forme s'effectue généralement par une pression d'air sur la feuille, ou une dépression d'air sous cette dernière, souvent assistée mécaniquement par un poinçon. C'est un procédé de transformation « basse pression », qui impose de faibles contraintes à la feuille. Les matériaux ne peuvent donc être formés que lorsque leurs propriétés mécaniques ont chuté, dans la zone du plateau caoutchoutique pour les polymères amorphes et dans la zone de la température de fusion pour les semicristallins.

Le thermoformage est basé sur le phénomène de transition vitreuse (Tg) des thermoplastiques. En effet, leur température de transition vitreuse passée, les thermoplastiques sont à l'état caoutchoutique, il devient alors facile de leur donner

une nouvelle forme. Une fois la température descendue en dessous de la transition vitreuse, le polymère retourne à l'état solide (vitreux). Les polymères les plus couramment utilisés et leurs caractéristiques de thermoformabilité de polymères courants sont les suivants:

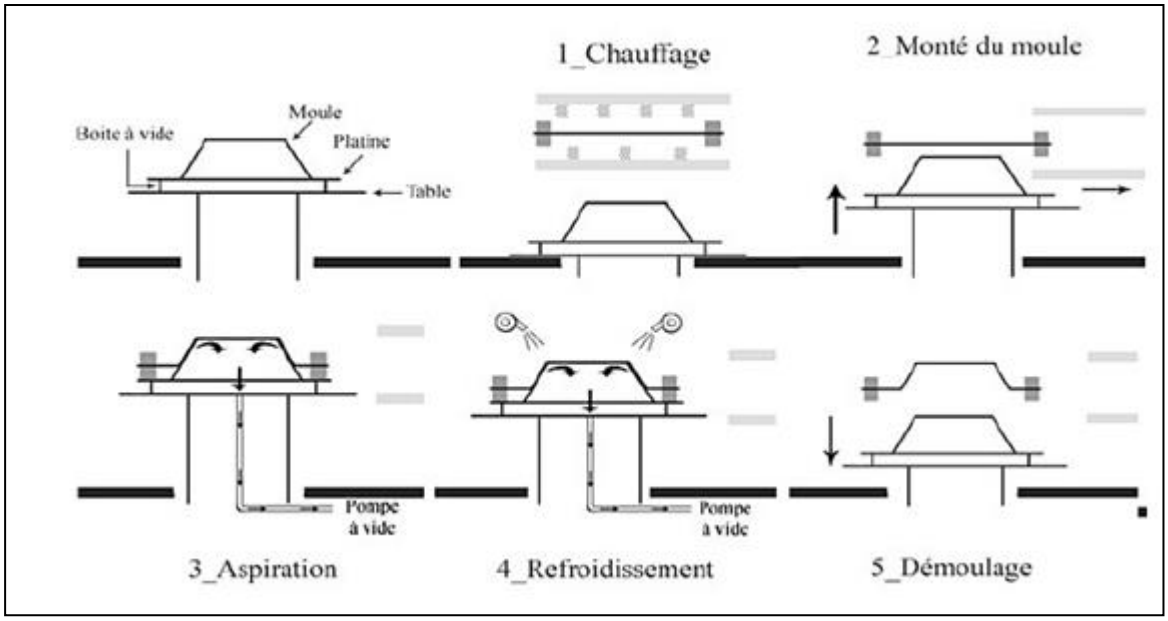


Figure IV.1 : Principe du thermoformage

Les différentes étapes du thermoformage par le vide sont (Figure IV.1) :

1. **Chauffage** : La première étape consiste à soumettre à la chaleur une feuille de plastique afin de la rendre malléable. Il est essentiel d'ajuster la durée de chauffage en fonction de l'épaisseur de la feuille, de l'efficacité du système de chauffage ainsi que de la couleur et de la nature du matériau à travailler. Il est primordial que la chaleur soit distribuée uniformément pour un résultat idéal. Une fois la température optimum de thermoformage (Tg) du matériau atteinte, on retire les appareils de chauffage puis le plateau et le moule sont élevés en position de formage .
2. **Le formage** : Une fois la feuille ramollie, elle peut facilement adopter la forme du moule auquel elle sera soumise. Des moules dit mâles (convexes) ou femelles (concaves) peuvent être drapés pour obtenir les pièces. Ainsi, le plastique malléable prend l'empreinte du moule et obtient la forme voulue.
3. Une fois la pièce formé, elle refroidit en restant sur le moule, puis elle et démouler et évacuer. Le refroidissement suit le formage et consiste en étape importante afin d'obtenir un produit conforme. En effet, il est important de prendre le temps de laisser la pièce se refroidir suffisamment pour s'assurer de la retirer du moule sans déformation, défaut ou

adhésion. La période de durcissement dépend de l'épaisseur de la pièce et de l'efficacité du système de refroidissement. Trois grandes techniques pour procéder au formage soit:

- ✓ L'évacuation d'air : la feuille colle au moule.
- ✓ L'air pressurisé : la feuille est pressée contre le moule.
- ✓ La force mécanique.

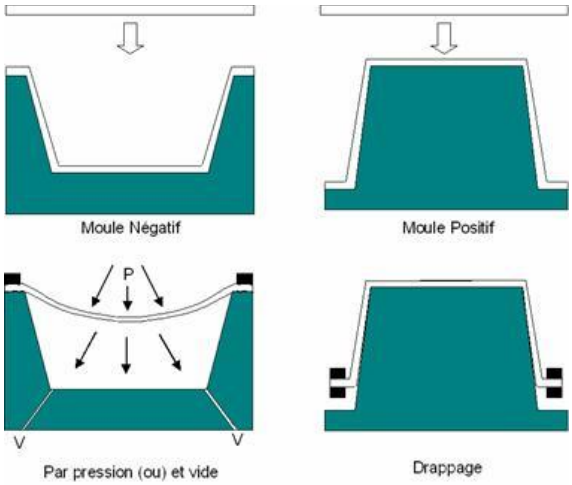
IV.3. Les Types de thermoformage

Il existe différentes méthodes pour thermoformer une pièce :

- Par le vide : le vide, créé entre la matière et le moule, force la matière à épouser la forme du moule sous l'effet de la pression atmosphérique (≈1 bar) ;
- Sous pression: la mise en forme est assurée par une pression de 3-4 bar (envoi d'air comprimé) chassant l'air entre la matière et le moule. Cette méthode permet une meilleure précision des contours et répartition des épaisseurs mais l'installation est plus coûteuse, l'air comprimé est également plus coûteux que le vide ;
- Moule mâle/femelle : méthode proche de l'emboutissage ou compression à chaud;
- Procédé Twin sheet (double coque) : dispositif permettant de réaliser simultanément deux parties d'une pièce creuse et de les souder. Pour ce faire le piston supérieur est également équipé d'une pompe à vide et fonctionne exactement comme la partie inférieure.

IV.4. Moule pour le thermoformage

Les moules sont généralement en aluminium mais peuvent être en résine époxydes pour de petites séries, voire en bois pour la fabrication d'échantillons. Les pièces sont réalisées avec des moules positifs ou négatifs .



a. Moule Positif

La fabrication et l'usinage de ce type de moule sont simples et peu onéreux. Le thermoformage avec ces moules est encore appelé « drapage » car la feuille préchauffée est

drapée sur le moule par la pression atmosphérique externe. L'air entre moule et feuille est aspiré par une pompe à vide.

Par exemple pour le moule de la figure, l'épaisseur du haut de l'objet est légèrement inférieure à l'épaisseur initiale de la feuille, les flancs par contre sont très étirés et très fins. La forte épaisseur au sommet est accentuée par le refroidissement de la feuille par contact avec le moule. Les propriétés mécaniques à cet endroit augmentent et la déformation est localisée aux endroits encore chauds, le flanc. Le frottement de la feuille sur le moule empêche également la déformation du sommet. Le chauffage du moule permet une meilleure répartition des épaisseurs, mais réduit les cadences de production, le refroidissement étant plus long. L'augmentation des rayons de raccordement des différentes faces du moule réduit aussi les écarts d'épaisseur sans nuire aux cadences.

b. Moule Négatif

Cette fois ci le moule vient au niveau de la plaque, la matière vient ensuite s'y "étaler" sous l'effet de la pression ou par le vide. Le moule est conçu comme une cavité percée de petits orifices pour l'évacuation de l'air emprisonné entre la feuille et lui-même. Pour déformer la feuille, on emploie généralement une pression d'air. Les poinçons mécaniques, en plus d'une pression d'air sont très utilisés dans le cas des thermoformages profond. Le coût de fabrication est plus élevé que pour un moule positif, car il faut, en général, enlever plus de matière dans le cas des moules métalliques (aluminium, en général). Le démoulage s'effectue sans difficulté, du fait du retrait des produits lors du refroidissement. Les angles de dépouille sont donc faibles, quelques degrés, et les angles de raccordement peuvent être vifs. Le formage négatif est le plus courant pour les applications barquette, pot, gobelet, film d'emballage. Pour les applications nécessitant de fortes épaisseurs de feuille, on trouve du formage positif ; c'est le cas des baignoires, des cuves et des portes de réfrigérateur. Un moule peut être négatif avec des parties positives.

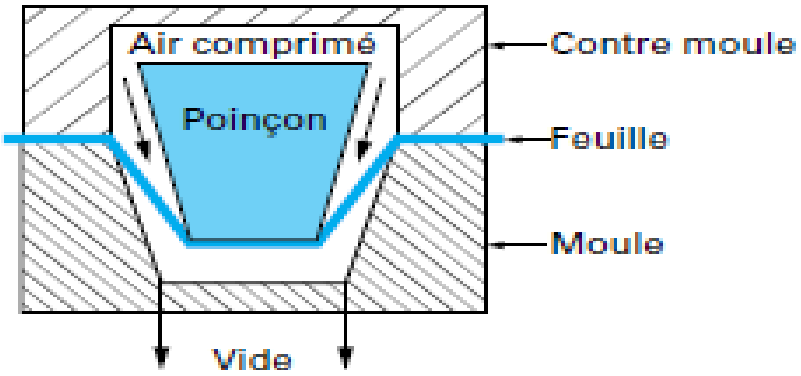


Figure IV.2: Formage négatif

IV.5. Machines de thermoformage

Il y a une très grande diversité de machines de thermoformage, en correspondance avec la diversité des produits et des applications.

Une machine de thermoformage est généralement constituée d'un poste de chauffe, d'un poste de formage proprement dit, d'un poste de découpe et d'un poste d'empilage. Pour un fonctionnement optimal de l'ensemble, chaque étape ou poste doit faire l'objet du meilleur réglage. Les machines sont en général équipées d'automates permettant le réglage et le suivi des principales opérations. Il est aujourd'hui impératif qu'elles soient fiables et qu'elles assurent la reproductibilité du cycle de formage pour que les objets thermoformés aient la qualité requise.

Dans l'emballage, les épaisseurs de feuille vont de quelques centaines de micromètres à environ 1 mm alors que pour d'autres applications, on peut atteindre plus du centimètre.

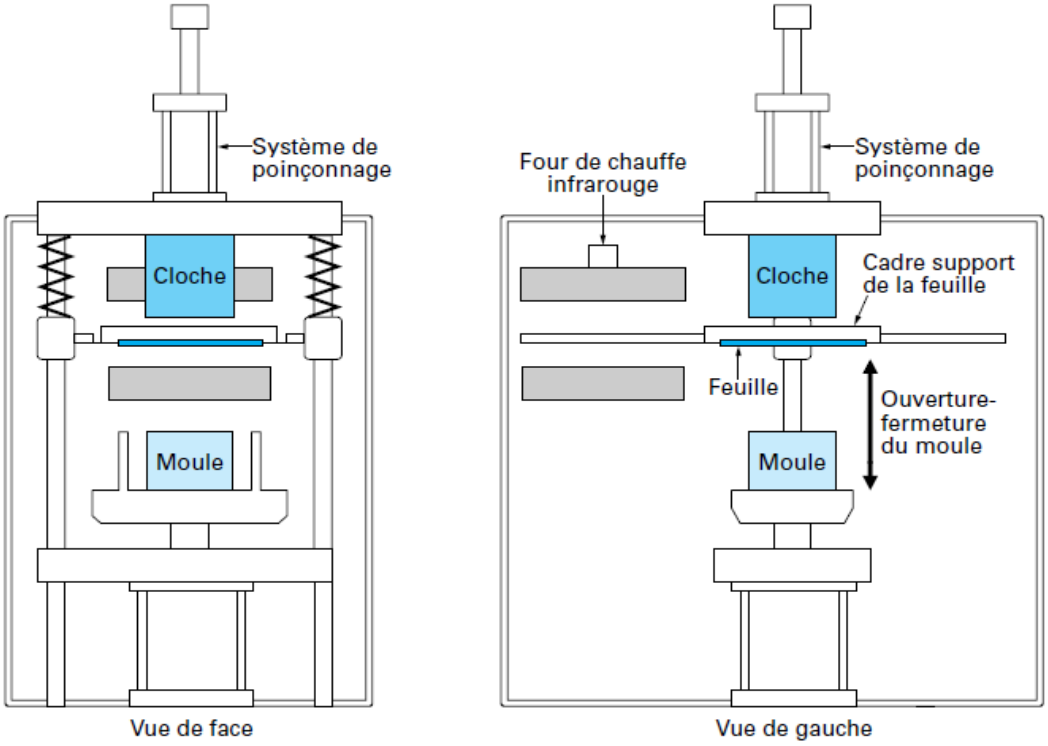


Figure IV.3 : Machine de thermoformage discontinue

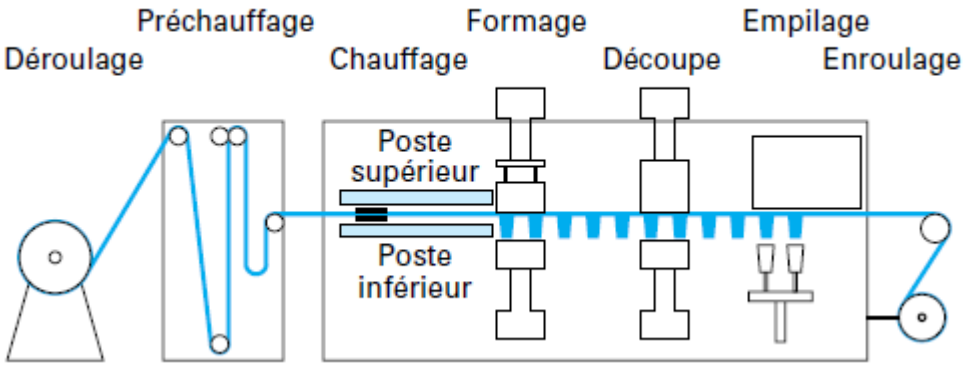


Figure IV.4 : Ligne de thermoformage continue

Les paramètres à prendre en compte pour une machine de Thermoformage discontinue (figure IV.3) sont:

- La surface utile ;
- La profondeur de thermoformage ;
- Le système de chauffe : type et puissance ;
- Le système de refroidissement : type et puissance ;
- La taille et le mouvement possible du poinçon ;
- Le système de mise sous vide et sous pression ;
- La consommation et la pression d'air utile ;
- La puissance électrique globale.

Pour une machine continue (figure IV.4), on considère en plus :

- La cadence maximale de production (la vitesse maximale est de l'ordre de 6 m/min) ;
- La possibilité de découpe intégrée au moule ;
- Le système d'empilage ;
- Le système de transport de la feuille avec les caractéristiques du moteur ;
- Le système de découpe ;
- Les mouvements des tables : mécanique ou hydraulique.

Figure IV.5 : Produits thermoformés par thermoformage

Chapitre V: Le Rotomoulage

V.1. Principe

Le rotomoulage est une méthode de transformation des polymères permettant la production d'articles creux avec des contenances très diversifiées (de quelques dixièmes du litre à des milliers de litres). Le moulage par rotation permet de produire des petites et des grandes séries de pièces.

Le rotomoulage est un procédé de mise en forme des polymères relativement récent. Il permet d'obtenir des pièces creuses grâce à la solidification du matériau chargé à l'état solide après une étape de chauffage du moule pendant laquelle on applique une rotation biaxiale autour de deux axes perpendiculaires. La quantité du matériau est prédéfinie en fonction de l'épaisseur voulue de la pièce. Les pièces creuses obtenues par rotomoulage peuvent avoir des formes complexes et des volumes très variées. Le procédé implique de faibles valeurs aussi bien de la pression que de la vitesse de cisaillement ; les articles obtenus ne renferment quasiment pas de contraintes résiduelles et de lignes de soudures. Les moules utilisés ne sont pas onéreux. Le rotomoulage est un procédé plus compétitif pour la réalisation de corps creux volumineux. Lors de la transformation, le polymère ne subit pas d'orientation ; les performances mécaniques du produit seront fonction de l'épaisseur.

V.2. Principales étapes du rotomoulage

De façon générale, on distingue quatre étapes dans le procédé de rotomoulage (figure V.1).

1. **Chargement du moule**

Après avoir positionné et fixé le moule, une quantité prédéterminée de poudre thermoplastique y est chargée. En considérant que l'épaisseur de la pièce finale est constante, la quantité de poudre est calculée à partir de la surface du moule, de l'épaisseur de la pièce désirée et de la masse volumique du polymère. La totalité de la matière est utilisée pour la fabrication du produit, il n'y a pas de déchet. Une masse de poudre m d'un polymère thermoplastique de masse volumique ρ est placée dans un moule de surface interne S. Avant chaque cycle, la quantité de poudre est calculée selon l'épaisseur e souhaitée du corps creux à élaborer. Celle-ci est déterminée à partir de l'expression suivante : $m = \rho.S.e$

2. **Le chauffage**

Une fois le moule verrouillé, la seconde étape débute. Le moule se met en rotation selon deux axes perpendiculaires dans un environnement chaud. Le transfert de chaleur est souvent effectué par convection d'air à l'intérieur d'un four mais d'autres méthodes peuvent être

utilisées comme par exemple l'utilisation d'un moule à double parois dans lequel circule un fluide caloporteur. Lorsque la surface du moule atteint une certaine température, les grains de polymère commencent à adhérer.

Les vitesses de rotation des axes sont relativement faibles et n'excèdent pas 10 rpm. Une vitesse importante aurait tendance à entrainer le polymère fondu aux endroits du moule où les vitesses sont les plus élevées, créant ainsi un problème de distribution des épaisseurs de la pièce. Pour une bonne répartition de la matière dans le moule, un ratio entre les deux vitesses des axes doit être déterminé. Celui-ci dépend de la géométrie de la pièce et ne doit pas être un nombre entier.

3. Le refroidissement

La troisième étape consiste à refroidir le moule afin de solidifier le thermoplastique et de figer la géométrie de la pièce. Durant cette phase le moule continue de tourner afin de garder l'épaisseur de la pièce constante et d'homogénéiser le refroidissement. Ici, le refroidissement est généralement effectué par convection forcée d'air associé à la pulvérisation de gouttelettes d'eau. Le refroidissement ne doit pas être trop brutal afin d'éviter le gauchissement de la pièce dû au retrait différentiel.

4. Le démoulage

La rotation est stoppée après le refroidissement du moule et la solidification de la pièce. Le moule est ensuite ouvert et la pièce retirée. Un nouveau cycle peut alors débuter. Un agent démoulant est souvent utilisé avant le remplissage du moule pour faciliter le démoulage. Cetagent démoulant est un liquide que l'on étale sur la paroi pour éviter à la matière de se coller sur le moule.

Comme nous venons de le voir, le polymère doit subir plusieurs transformations physiques pour être mis en forme. Grâce à un cycle thermique, le matériau peut passer de l'état solide à l'état liquide pour épouser les formes du moule, puis inversement de l'état liquide à solide pour figer les géométries de la pièce. Il est donc important de suivre l'évolution de la température durant ce cycle thermique. Expérimentalement il est possible de placer des thermocouples à différents endroits afin de mesurer le changement de température. La figure V.2 représente de manière schématisée l'évolution de la température au cours des différentes étapes du procédé.

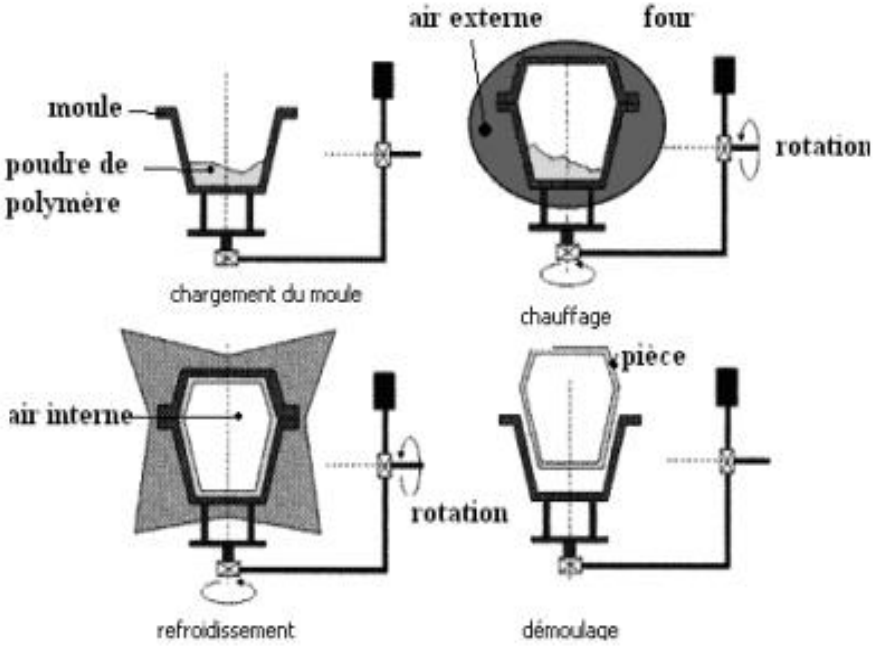


Figure V.1 : Les différentes phases d'obtention d'une pièce par rotomoulage

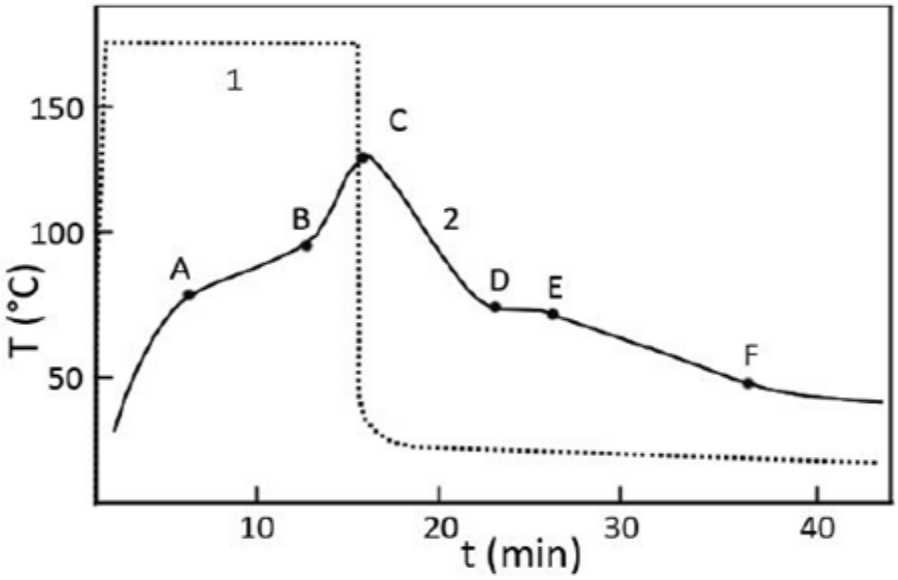


Figure V.2 : Evolution de la température au cours du rotomoulage des poudres

La figure V.2 montre l'évolution de la température dans le four et de l'air interne du moule. Les variations de la seconde courbe nous informent sur le comportement de la matière dans le moule ainsi que sur ses changements de phases. Ce diagramme permet de suivre le changement d'état physique du polymère au cours du procédé. Il permet de distinguer plusieurs étapes lors de cette transformation :

1. Du début de la courbe au point A, la température du moule augmente jusqu'àatteindre une température proche de la température de fusion du matériau (dans lecas d'un polymère semi-cristallin).
2. Entre les points A et B, les grains de polymère commencent à fondre et à fusionner, c'est le phénomène de coalescence. Le matériau dans le moule est alors un mélange de grains solides et de polymère fondu. Les couches de matière commencent à se former les unes après les autres contre la paroi.
3. Au-delà du point B, la totalité de la matière est à l'état liquide. Lors de la coalescence des poudres, les espaces entre les grains ont provoqué des bulles de gaz ce qui est dommageable pour le produit fabriqué. Entre les points B et C on assiste donc au phénomène de densification qui consiste à extraire ces bulles du matériau fondu. Ici, la température du polymère augmente ce qui fluidifie la matière et permet au gaz de se diffuser dans le polymère fondu.
4. Finalement entre C et F, on observe le refroidissement du matériau. Le polymère reste tout d'abord à l'état liquide puis commence à se solidifier. Entre D et E on a à nouveau un mélange liquide/solide puis au-delà de E le matériau s'est totalement solidifié et la pièce est formée.

V.3. Moules et machines

a. Moules

Les moules de rotomoulage sont réalisés en deux parties démontables. Après sa fermeture, le moule est complètement étanche. La matière utilisée pour la fabrication du moule possède une conductivité thermique très élevée afin de transmettre rapidement la chaleur au polymère à l'intérieur du moule et également d'évacuer rapidement la chaleur lors du refroidissement. Il existe quatre types de moules différents.

✓ **Moules coulés en aluminium**

Quelques avantages et inconvénients :

❖ **Avantage** :

- Il est possible de réaliser des formes complexes.
- La conductivité thermique de l'aluminium est élevée ce qui est favorable pour un transfert thermique rapide.
- La durée de vie de ce type de moule est élevée.

❖ **Inconvénients** :

- Le coût de la réalisation de ce type de moule est élevé.

- La durée nécessaire pour la production du premier moule est élevée.
- La réalisation de moules de très grandes dimensions est difficile.
- Des porosités se forment au cours de la fabrication du moule.
- La résistance thermique de l'aluminium est faible (problème du retrait...)

✓ **Moules chaudronnés en tôle**

Ils sont constitués de feuilles de métal relativement fines, mises en forme puis soudées les unes aux autres. Le moule est fini par polissage.

❖ **Avantages** :

- La durée de production du premier moule est courte.
- Le prix du premier moule n'est pas élevé.
- La résistance thermique de l'acier est élevée.
- La stabilité dimensionnelle du moule est bonne.
- La réalisation de moules de grandes dimensions est possible.

❖ **Inconvénients** :

- Il est difficile de fabriquer des moules de formes géométriques complexes.
- Le moule est relativement lourd.
- L'état de surface interne du moule n'est pas très bon.

✓ **Moules obtenus par électroformage**

Ils sont utilisés pour des pièces de formes très complexes avec des détails de surface fins. Ils sont très chers. Les moules sont fabriqués en nickel, en cuivre ou dans un alliage des deux avec une bonne conductivité thermique.

✓ **Moules spéciaux**

Il existe des moules spécifiques en composite à matrice organique ou des moules avec système de chauffage et de refroidissement incorporé.

b. Machines de rotomoulage

Les machines de rotomoulage ont des dimensions variées. En effet, avec ces machines on peut fabriquer des articles creux d'une capacité de 0,2 litre à 50 000 litres. La figure V.3 montre une machine de rotomoulage de laboratoire pour la fabrication des pièces de dimensions moyennes.

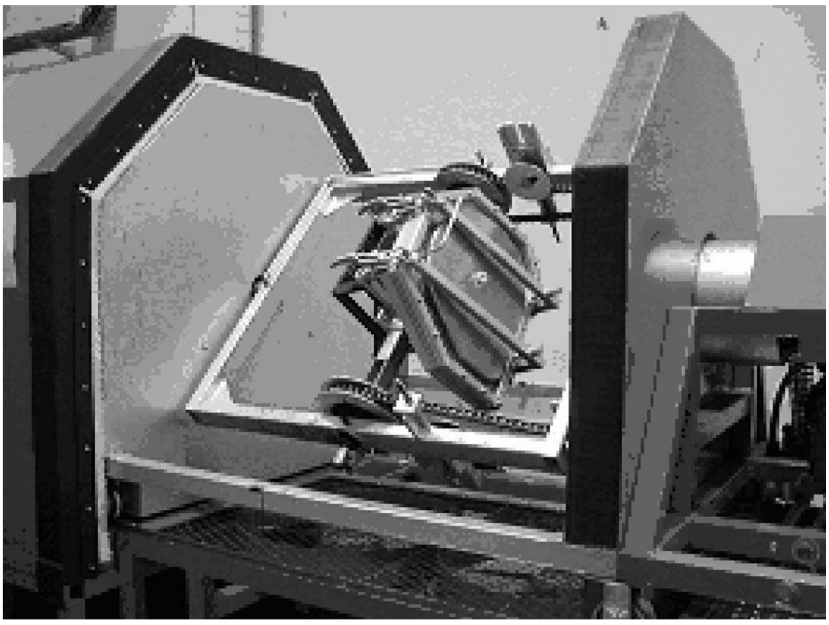


Figure V.3: Petite machine de rotomoulage

Dans l'industrie, nous pouvons distinguer les types de machines suivants :

- **Machine de rotomoulage à carrousel**

Cette machine est très courante dans l'industrie. Elle est utilisée pour la fabrication de diverses pièces, par exemple canoë. Pour augmenter la cadence, la machine est constituée de plusieurs bras, ce qui permet la fabrication de plusieurs pièces simultanément (figure 4). Ces bras sont soit fixes soit indépendants.

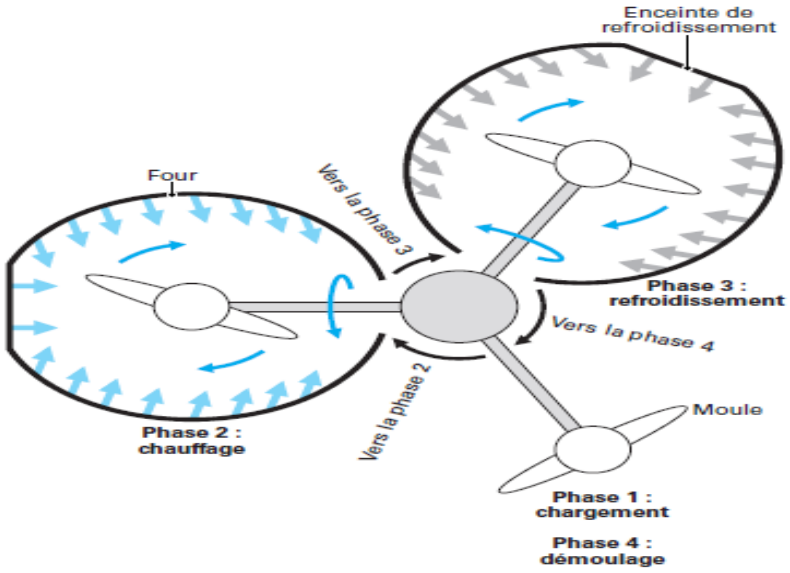


Figure V.4 : Schéma d'une machine à carrousel à trois bras

V.4. Paramètres principaux influant sur le procédé de rotomoulage

1) Le polymère

Trois caractéristiques du polymère jouent un rôle majeur : sa masse molaire, sa stabilité thermique et sa vitesse de cristallisation.

- La **masse molaire** doit être supérieure à une valeur critique correspondant au seuil d'enchevêtrement. Si elle est inférieure, le matériau fondu est très fluide, et il devient très fragile à l'état solide car les déformations plastiques, responsables de la ténacité élevée du matériau, nécessitent la présence de chaînes longues par rapport à la distance entre enchevêtrements.
- La **cristallisation** du polymère permet d'assurer une rigidité et une limite élastique suffisantes. Cependant la cristallisation est un phénomène cinétique caractérisé par le fait que sa vitesse est nulle à $T < T$g (température de transition vitreuse) et à $T > T$F (température de fusion), et passe par un maximum à une température Tcrist intermédiaire entre Tg et TF.
- **La nature du polymère**

La granulométrie de la poudre est un autre paramètre ayant un rôle très important dans la mise en œuvre. En rotomoulage, les grains de poudre doivent être assez fins pour les diverses raisons suivantes :

- faciliter la fusion homogène de la totalité de la matière ;
- éviter d'emprisonner trop d'air dans la matière ;
- éviter que les grains ne collent les uns aux autres seulement à la surface (mais fusionnent afin que les chaînes s'interpénètrent pour former un liquide homogène), ce qui peut être la cause de la fragilisation de la pièce finie.

2) La température et le temps

Nous sommes confrontés à divers phénomènes couplés, en particulier :

- la diffusion thermique ;
- l'écoulement du polymère ;
- la dégradation thermique ;
- la cristallisation.

Les conditions critiques propres à chacun de ces phénomènes peuvent se traduire (en première approche) par une frontière dans l'espace temps-température.

V.5. Comparaison entre le rotomoulage et les autres procédés de transformation

Pour indiquer la place du rotomoulage dans l'industrie de la plasturgie, il est intéressant de comparer ce procédé avec les autres techniques utilisées pour la fabrication des pièces analogues. Ainsi, dans le tableau V.1, le rotomoulage est comparé avec l'extrusion soufflage et le thermoformage.

Tableau V.1: Comparaison entre le rotomoulage, le thermoformage et l'extrusion-soufflage

Caractéristique	**Soufflage**	**Thermoformage**	**Rotomoulage**
Volume de la pièce (cm^3)	10 à 10^6	1 à 10^6	10 à 10^8
Forme de la matière	Granulé /poudre	feuille	poudre
Coût de la préparation du polymère pour le procédé	Nul	Jusqu'à 100 % du produit initial	Jusqu'à 100 % du produit initial
La réalisation des pièces en polymère chargé est-elle possible ?	Oui	Oui	Oui (difficile)
Prix du moule	Élevé	Élevé	Moyen
L'épaisseur de la pièce est-elle homogène ?	Non	Non	Epaisseur uniforme possible
L'utilisation directe des inserts métalliques dans le moule est-elle possible ?	Oui	Non	Oui
Orientation du matériau dans la pièce	Élevée	Très élevée	Pas d'orientation
Contrainte résiduelle dans la pièce	Moyenne	Forte	Faible

Le rotomoulage est un procédé plus compétitif pour la réalisation de corps creux volumineux. Lors de la transformation, le polymère ne subit pas d'orientation ; les performances mécaniques du produit seront fonction de l'épaisseur.

Chapitre VI : Le calandrage

VI.1. Présentation

Le procédé de calandrage est basé sur un écoulement à température élevée d'une matière thermoplastique viscoélastique entre au moins deux cylindres entraînés. Le calandrage est un procédé de fabrication de feuilles (> 100 mm) ou de films (< 100 mm) en polymères par compression de la masse plastique fondue entre plusieurs cylindres chauffés et entraînés mécaniquement.

Comparativement aux procédés d'extrusion-soufflage et d'extrusion à travers une filière plate, qui permettent également de produire des films et des feuilles de matières thermoplastiques, le calandrage se différencie par :

a. un niveau d'investissement beaucoup plus important, typiquement d'un facteur 20 ;
b. des débits très élevés : de 2 t/h à 6 t/h selon que l'on transforme.. Ces chiffres sont 3 à 4 fois plus élevés que ceux obtenus par extrusion filière plate et 2 à 3 fois plus élevés que par extrusion soufflage ;
c. des largeurs importantes : 4 000 mm sans étirage pour les feuilles, ou avec étirage pour les films. Ces largeurs sont comparables à celles obtenues par extrusion soufflage
d. une très bonne qualité des films et feuilles, c'est-à-dire : planéité, profil, fini de surface, stabilité dimensionnelle ;
e. une gamme d'épaisseur plus restreinte qu'en extrusion (10 mm en extrusion-soufflage ou extrusion filière plate plus étirage à 2 mm pour l'extrusion avec filière plate).

On peut donc dire que calandrage et extrusion se complètent : le calandrage est bien adapté aux productions de grandes séries où l'on recherche à la fois qualité et débit ; l'extrusion, qui peut être facilement dimensionnée à la taille des séries, est surtout recherchée pour sa polyvalence..

VI.2. Description du procédé

Le procédé de calandrage est basé sur un écoulement à température élevée d'une matière thermoplastique viscoélastique entre au moins deux cylindres entraînés. En fait, l'expérience montre que seul le calandrage avec quatre cylindres permet de maîtriser correctement la qualité des films ou des feuilles. Dans une calandre à quatre cylindres (figure VI.1), la masse plastique fondue en provenance du mélangeur gélifieur passe d'un cylindre à l'autre par trois entrefers qui sont de plus en plus étroits, ce qui entraîne un reflux avant chaque entrefer, en même temps qu'un élargissement de la feuille. Ces reflux forment ce

qu'on appelle les bourrelets. Seul le premier bourrelet, appelé bourrelet d'alimentation, est limité en largeur par des guides matière. Les bourrelets 2 et 3 ont une largeur libre et une forme cylindrique, sauf aux extrémités où la forme s'ovalise. La feuille passe d'un cylindre à l'autre par différences de vitesse et de température. Les cylindres sont entraînés indépendamment, ce qui permet d'établir une friction entre eux (typiquement une différence de vitesse de 5 à 30 %) et ainsi d'assurer un passage parfait de la feuille d'un cylindre à l'autre. Le passage par simple différence de température est plus difficile à maîtriser.

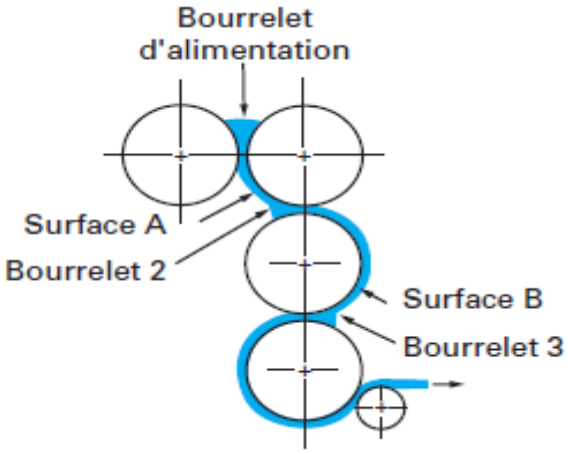


Figure VI.1 : Principe du calandrage à quatre cylindres

VI.3. Lignes de calandrage

Une calandre ne fonctionne pas de façon indépendante ; elle fait partie d'un ensemble complexe appelé ligne de calandrage. Les différentes phases généralement rencontrées sont les suivantes :

- mélange des composants de la formulation.
- gélification ;
- homogénéisation ;
- alimentation ;
- calandrage ;
- extraction-étirage ;
- grainage ;
- refroidissement ;
- conditionnement.

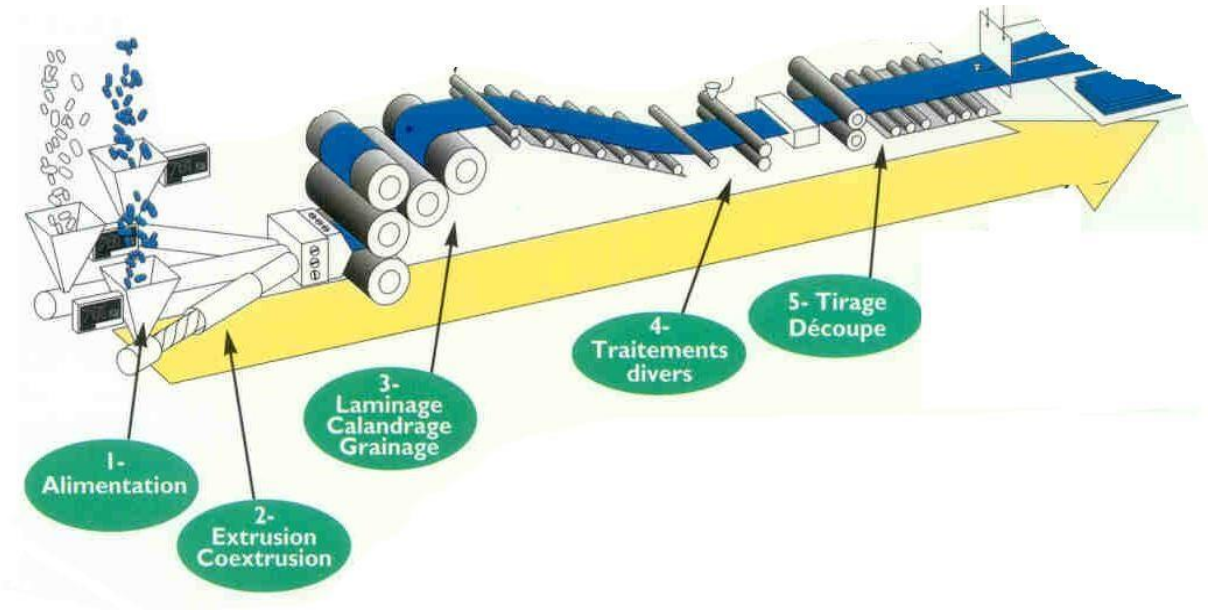


Figure VI.2 : Schéma de principe d'une chaîne de calandrage.

❖ **Réglages et contrôles de la calandre**

Le but est d'obtenir une feuille ayant un profil d'épaisseur régulier et constant.

Le passage de la matière entre les cylindres exerce sur ceux-ci une charge linéaire le long des génératrices et un couple résistant dû à la scission de la matière à la surface des cylindres.

Sous l'effet de ces forces d'écartement, chaque cylindre est sollicité en flexion avec déformation de sa partie active.

VI.4. Problèmes du calandrage

Le but du calandreur est d'obtenir des films ou des feuilles avec une faible tolérance d'épaisseur (± 2 mm) sans défauts d'aspect.

Pour cela, il lui faudra éviter les principaux défauts rencontrés en calandrage qui sont les suivants :

- défaut de planéité : au déroulage la feuille n'est pas plane, elle présente des ondulations d'amplitude plus ou moins importante ;
- défaut de cintrage : au déroulage la feuille ne suit pas une ligne droite dans le plan mais un arc de cercle (effet banane) qui peut être quantifié par le rapport /L ; (figure 2a) ;
- défaut de stabilité dimensionnelle : l'effet mémoire entraîne des contraintes résiduelles dans la feuille qui sont responsables des phénomènes de retrait rédhibitoires pour les applications ultérieures ;

- défaut de mouillabilité : il est le plus souvent lié à la formulation ; la feuille présente une tension de surface trop faible qui rend difficiles voire impossibles les opérations ultérieures de collage, soudage, impression.
- défaut d'aspect : fish-eyes, bulles, fusées, mattage, chevron :
    - **fish-eyes** : il s'agit de grains infondus. Ce défaut est lié à la qualité des résines et en aucun cas au procédé lui-même,
    - **bulles** : il s'agit de vides sphériques dans l'épaisseur de la feuille, caractéristiques du calandrage de feuilles épaisses (> 1,5 mm),
    - **fusées** : il s'agit de bulles écrasées en surface donc de forme
    - **mattage** : il s'agit de la perte de transparence de la feuille correspondant à une rugosité marquée sur la face de la feuille qui n'est pas au contact du dernier cylindre .
    - **chevrons** : il s'agit de vagues visibles en incidence rasante.

Chapitre VII: Extrusion-soufflage et injection-soufflage

VII.1. Présentation

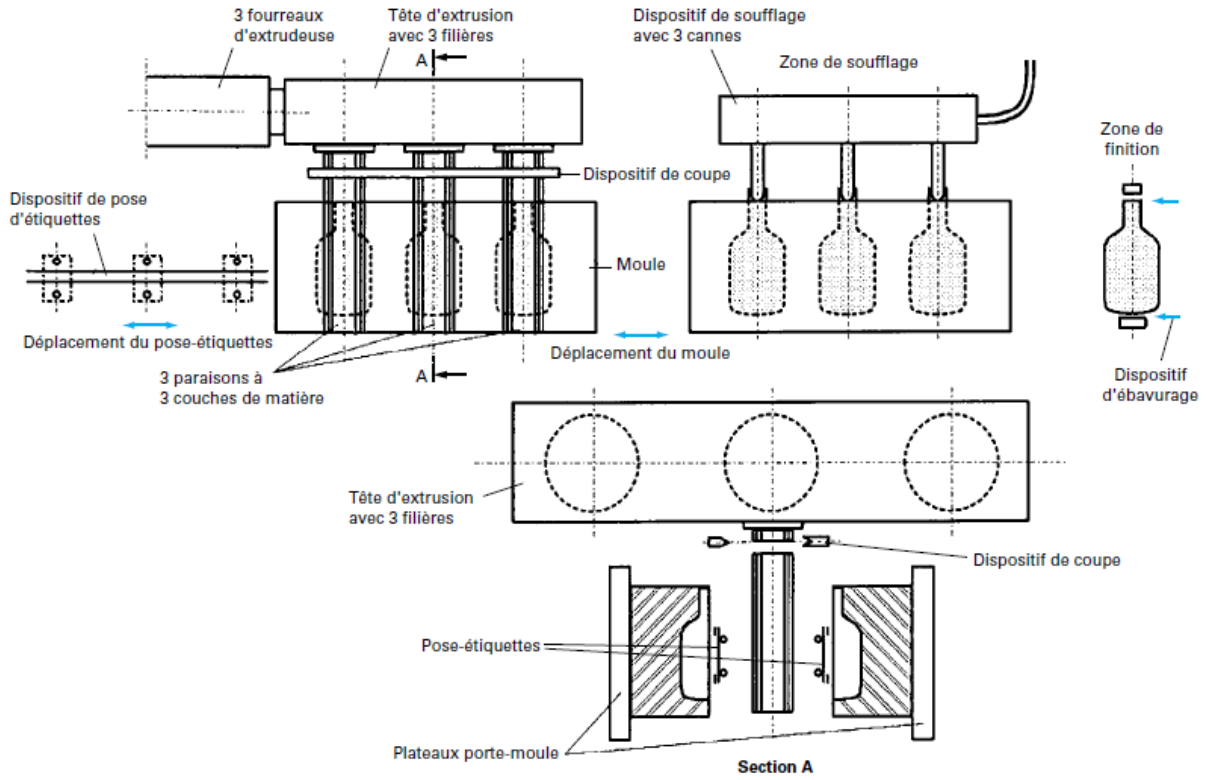
Les techniques d'extrusion-soufflage et d'injection-soufflage sont des méthodes de mise en œuvre des matières thermoplastiques pour la fabrication d'objets tridimensionnels creux. Depuis les petits flacons de quelques millilitres utilisés en pharmacie jusqu'aux cuves de mazout de 5000 L, ces corps creux en matières thermoplastiques sont utilisés au conditionnement de toutes sortes de produits liquides, pâteux, pulvérulents, qu'ils soient alimentaires, d'entretien, chimiques etc... Parmi les différents corps creux autres que ceux fabriqués par extrusion soufflage ou par injection-soufflage, citons :

- Les sachets ou pochons, réalisés à partir de films souples extrudés ;
- Les gobelets, pots thermoscellés, etc., fabriqués à partir de feuillets rigides par thermoformage ;
- Les cuves et enceintes fabriquées par les techniques de mise en œuvre des plastiques renforcés : bobinage filamentaire, centrifugation, etc.

VII.2. Extrusion-soufflage

Le soufflage est couramment utilisé dans les lignes de production de gaines et de films en continu. Il consiste à extruder un tube, à le pincer à quelque distance de la filière à l'aide de deux panneaux et de rouleaux de direction, et à le gonfler en envoyant de l'air sous faible pression à travers l'axe de la filière. Cette technique permet d'obtenir des gaines plastiques continues de plus de 4 m de diamètre donnant des films de plus de 12 m de largeur avec des épaisseurs de l'ordre de 200 μm à des débits dépassant 300 kg/h.

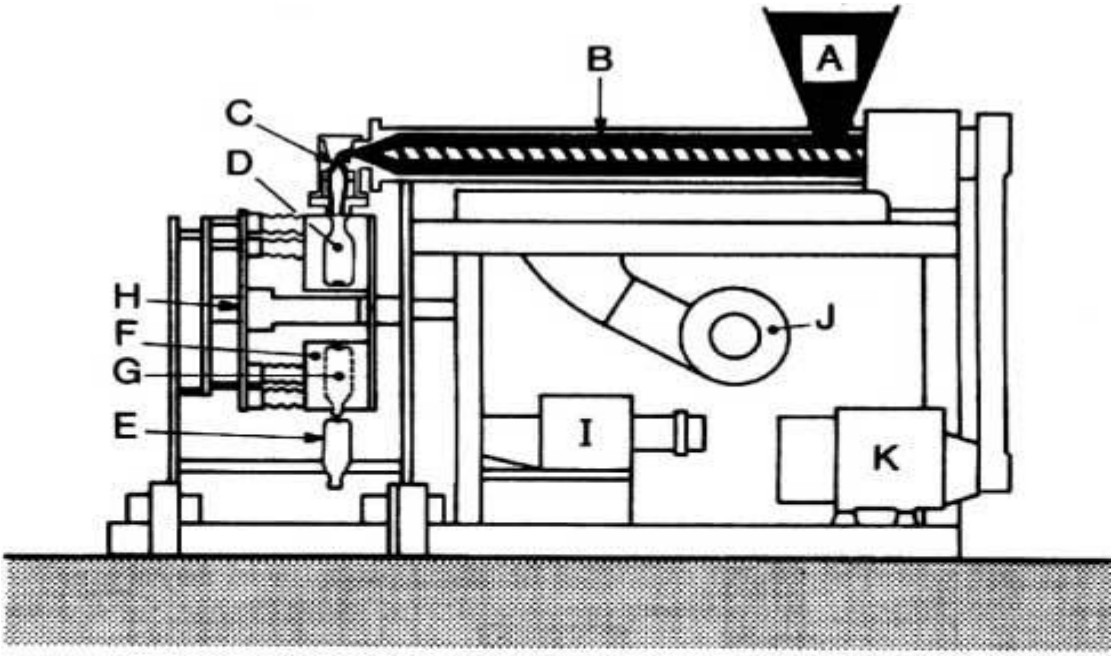
Pour l'obtention des corps creux par extrusion-soufflage à partir d'un polymère plastifié par la chaleur, on produit une « paraison » tubulaire en forçant la matière à passer dans l'entrefer circulaire avant de s'écouler à l'air libre, puis on procède à l'emprisonnement de cette paraison dans un moule et au soufflage à l'aide d'air comprimé de la paraison encore chaude pour qu'elle prenne les formes du moule



VII.3. Moulage des corps creux par soufflage

Les machines de ce type comprennent :

- une extrudeuse comportant un ou plusieurs fourreaux d'extrusion, le nombre étant déterminé par le nombre de couches de matière constituant la paraison ;
- une tête d'extrusion équipée d'une ou plusieurs filières qui délivrent les paraisons dont le nombre correspond au nombre d'empreintes du moule ;
- une unité de moulage composée du mécanisme de fermeture et de déplacement, entre le poste de moulage et le poste de soufflage, des plateaux porte-moule ;
- un dispositif de soufflage constitué soit d'une aiguille qui traverse la paroi du moule et qui permet le gonflage de la paraison dans l'empreinte pour obtenir des objets tels que des jouets, des arrosoirs de jardin, des contenants de grand volume..., soit d'une canne qui est introduite dans l'orifice supérieur de la bouteille ou du flacon à mouler.



A trémie d'alimentation en granulés
B extrudeuse
C tête d'équerre
D bouteille en cours de soufflage
E bouteille en cours d'éjection
F moule
G empreinte
H roue de soufflage
I moteur d'entraînement de H
J ventilateur d'air de refroidissement
K moteur d'entraînement de la vis d'extrusion

Figure VII.1: Machine d'extrusion-soufflage de bouteilles.

VII.4. Injection-soufflage

La technique de mise en œuvre des polymères thermoplastiques qui se trouve associée au soufflage est le procédé d'injection .À partir d'un matériau plastifié par la chaleur, on procède à l'injection sous forte pression (jusqu'à 120 MPa) de ce matériau à travers une buse de faible diamètre, dans une cavité du moule à préforme. Sous l'effet de la pression, le matériau plastifié remplit la cavité et se solidifie au contact des parois du moule. On obtient la préforme, c'est la phase d'injection. Puis cette préforme encore chaude (120 à 220 °C suivant les matériaux) est transférée dans le moule de soufflage (appelé aussi moule de finition). L'air comprimé est alors introduit au travers du noyau portant la préforme. Le matériau se trouve alors plaqué contre les parois du moule de finition refroidi et se solidifie pour donner l'objet final : c'est la phase de soufflage. La succession des opérations décrites ci-avant est présentée sur la figure VII.2.

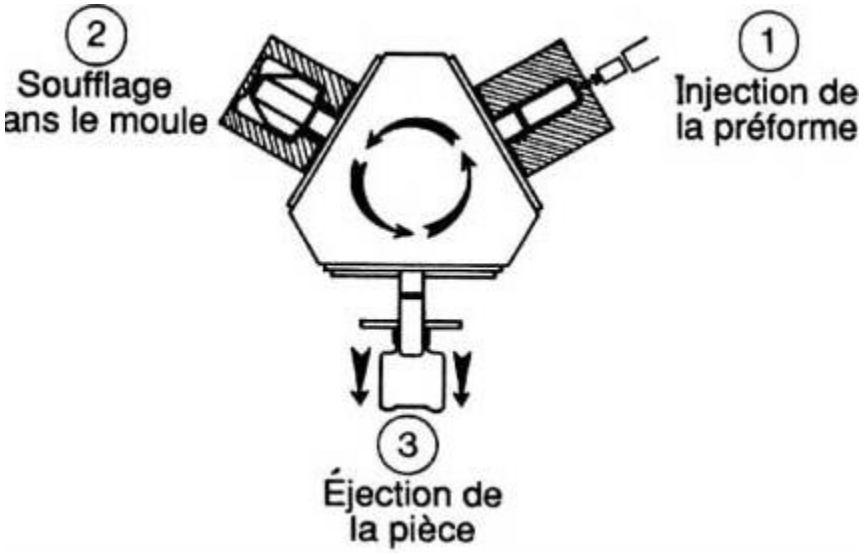


Figure VII.2 : Poste d'injection-soufflage de corps creux

VII.5. Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

Dans ce procédé en une étape, on procède à l'extrusion d'une paraison tubulaire chaude qui est immédiatement soufflée dans un moule à préforme (la préforme est l'ébauche réduite de la bouteille finale). Cette préforme est ensuite transférée et/ou conditionnée dans le moule de finition où l'on procède au bi-étirage de la préforme.

Ce bi-étirage est réalisé le plus souvent par la conjugaison d'un étirage axial effectué par une tige d'élongation et d'un étirage radial effectué par gonflage à l'aide d'air comprimé introduit dans la préforme pendant l'étirage axial. Ce gonflage permet d'appliquer la matière aux parois du moule. Le corps du moule est refroidi (par une circulation d'eau, en général) pour figer la structure moléculaire dans la forme finale et garantir la rigidité du corps creux avant son éjection. La matière se solidifie alors au contact des parois du moule pour donner le corps creux final.

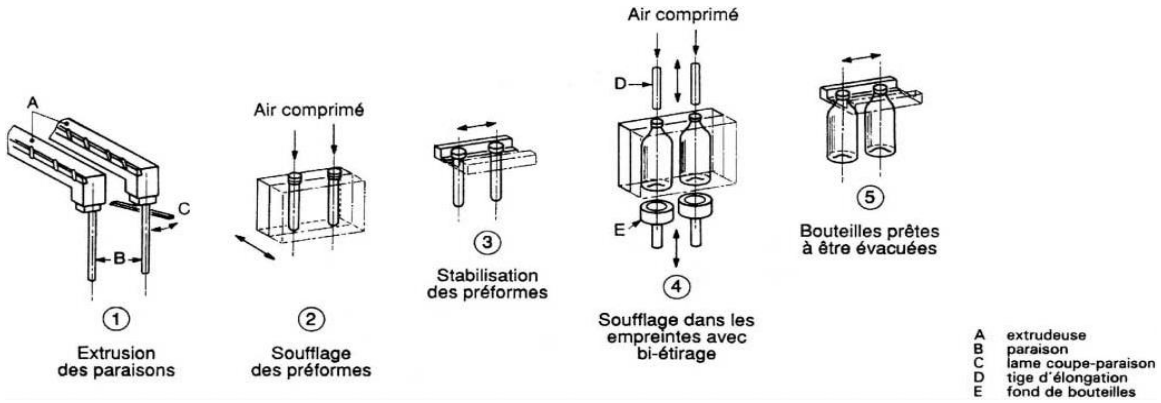


Figure VII.3 : Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

La préforme est sortie de la première machine puis est ramenée à la température ambiante et éventuellement stockée puis acheminée vers une deuxième machine (pouvant être située dans un autre lieu géographique que la première). La préforme est alors réchauffée puis bi-étirée par **étirage axial** à l'aide d'une tige d'élongation et par étirage radial avec soufflage à l'air comprimé (figure VII.4).

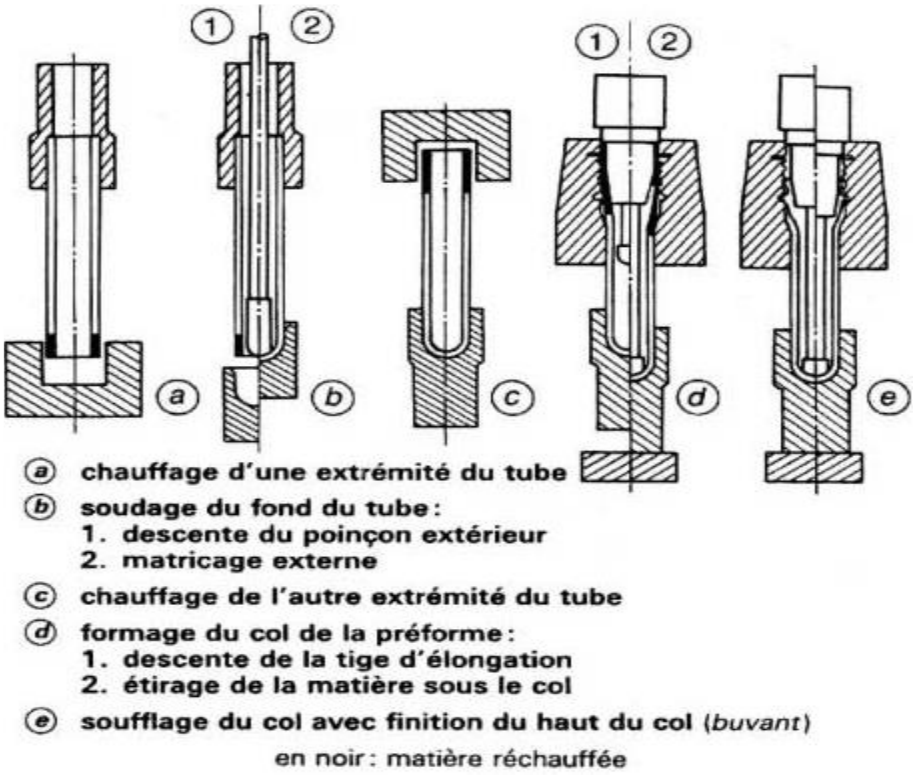


Figure VII.4: Obtention d'une préforme à partir d'un tube

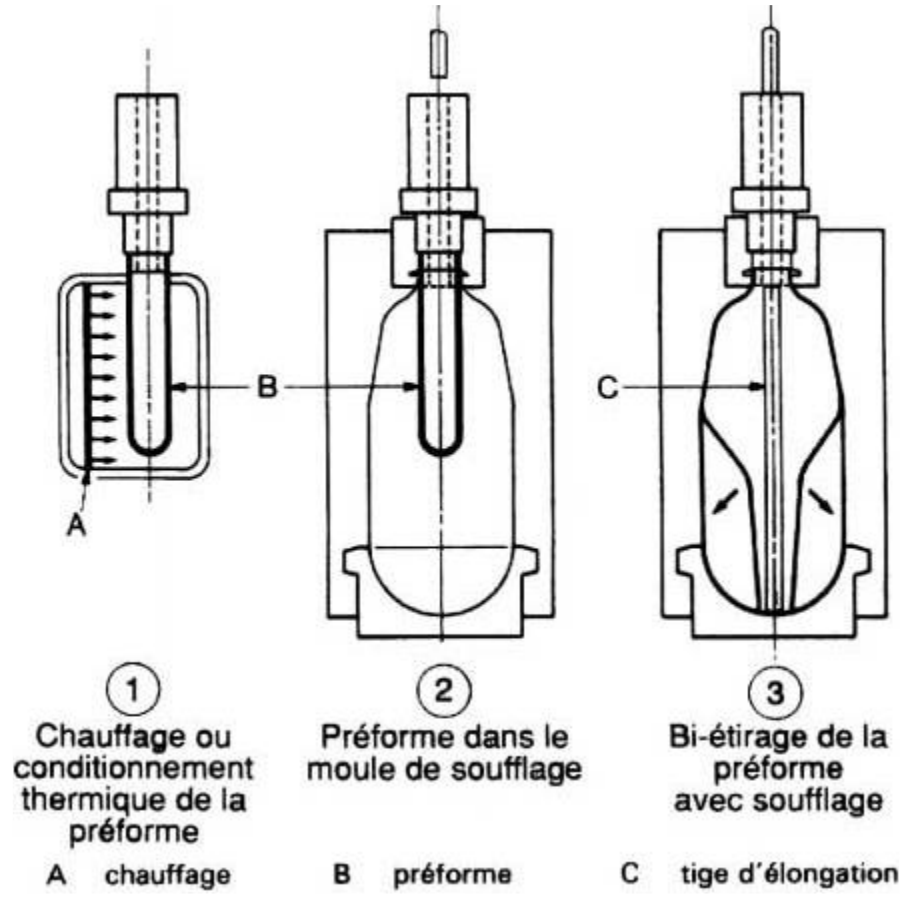


Figure VII.5 : Soufflage avec bi-étirage

VII.6. Injection-soufflage avec bi-étirage

C'est l'association de trois techniques : l'injection, le soufflage et le bi-étirage.

Ces trois techniques peuvent être utilisées en ligne, ce que l'on appelle cycle chaud ou procédé en une étape, ou bien de façon séparée, ce que l'on appelle cycle froid ou procédé en deux étapes.

❖ Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

Dans ce procédé en une étape, il peut y avoir encore deux variantes :

- l'injection de la préforme puis, après conditionnement thermique, le soufflage avec bi-étirage du corps creux final (figure VII.6) ;
- l'injection de la préforme, puis, au poste de conditionnement thermique, le soufflage intermédiaire d'une préforme plus grande et préconditionnée ; enfin, on procède au soufflage avec bi-étirage du corps creux final.

❖ **Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle froid**

Dans ce procédé en deux étapes, on réalise l'injection d'un produit semi-ouvré : la préforme, puis la reprise de cette préforme par soufflage avec bi-étirage jusqu'à l'obtention de l'objet final : le corps creux.

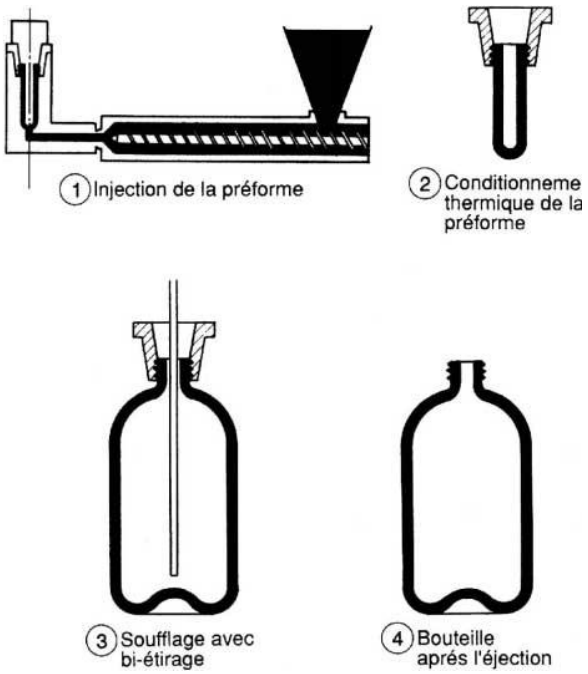


Figure VII.6 : Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

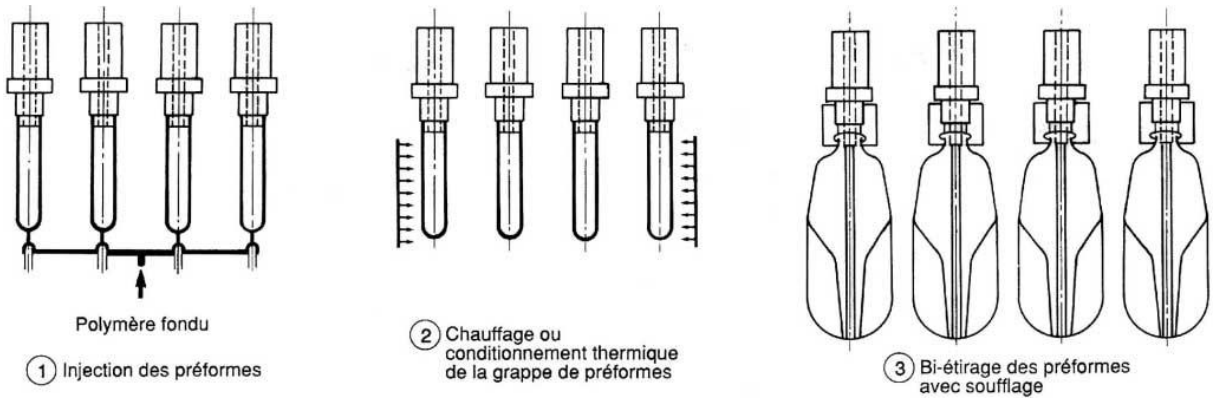
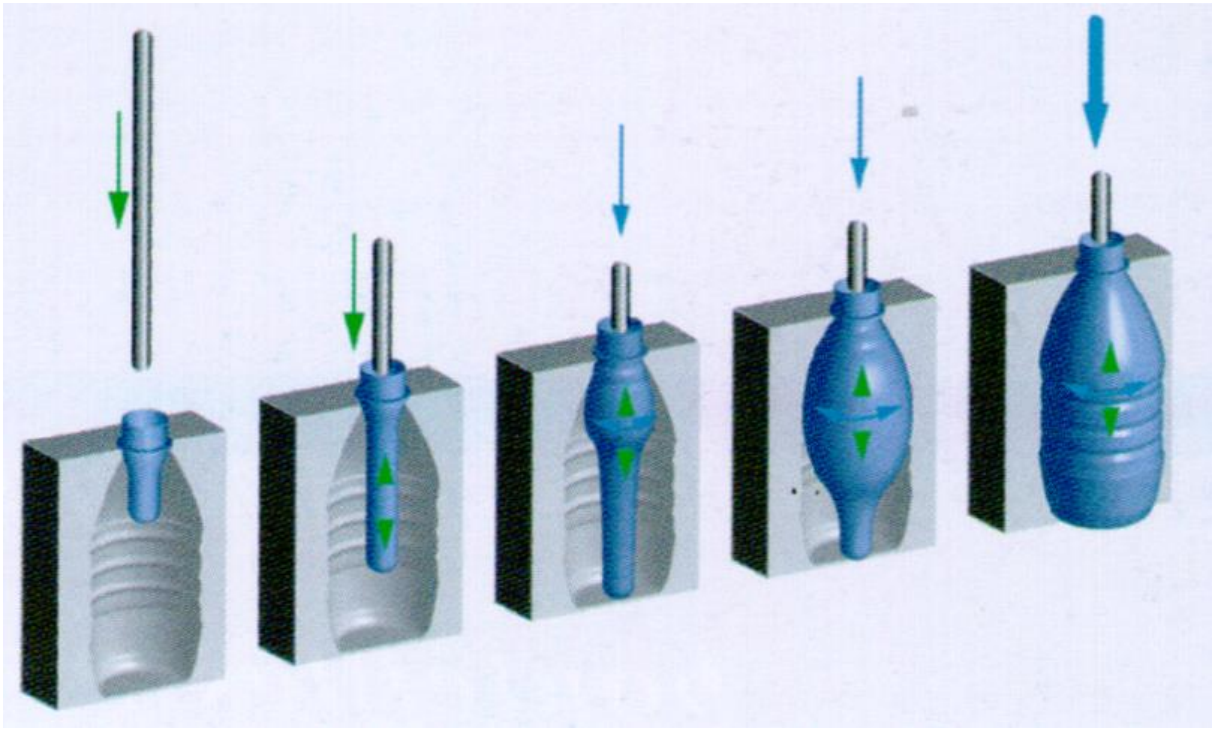


Figure VII.7: Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle froid.

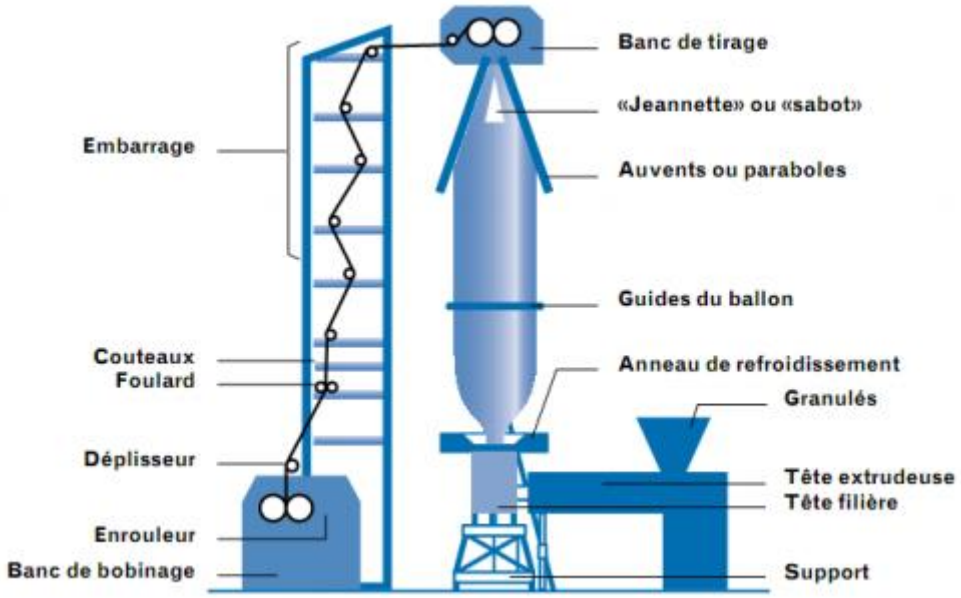


VII.7. Extrusion gonflage ((gaine)

Pour l'extrusion gonflage, le film est appelé gaine, c'es pour cette raison que ce procédé de fabrication est aussi nommé soufflage de gaine. Il fait appel à une extrudeuses monovis longue (entre 24 et 32D), ou bivis pour les débits très élevé

L'élaboration d'un film plastique peut être réalisée à l'aide du processus d'extrusion-gonflage. Une filière circulaire est utilisée à travers laquelle sort un tube plastique creux quasiment fondu, puis tiré verticalement vers le haut de la tour. Le tube est gonflé d'air introduit à travers la filière pour former une bulle plastique dont le diamètre et l'épaisseur du film dépendent du dimensionnement de la machine (diamètre de la filière, débit, etc.) et de variables opératoires (vitesse de tirage, refroidissement, etc.). Eu haut de la bulle plastique, plus refroidie que le reste, elle est écrasée et aplatie en film fin prêt à utilisation.

les films produits par extrusion-gonflage sont largement utilisés dans de nombreux domaines industriels tels que l'agriculture (Housses pour ensilage, films de paillage, couvertures de serres agricoles), les emballages technique et alimentaire, la construction et les travaux publics, l'hydraulique, etc.



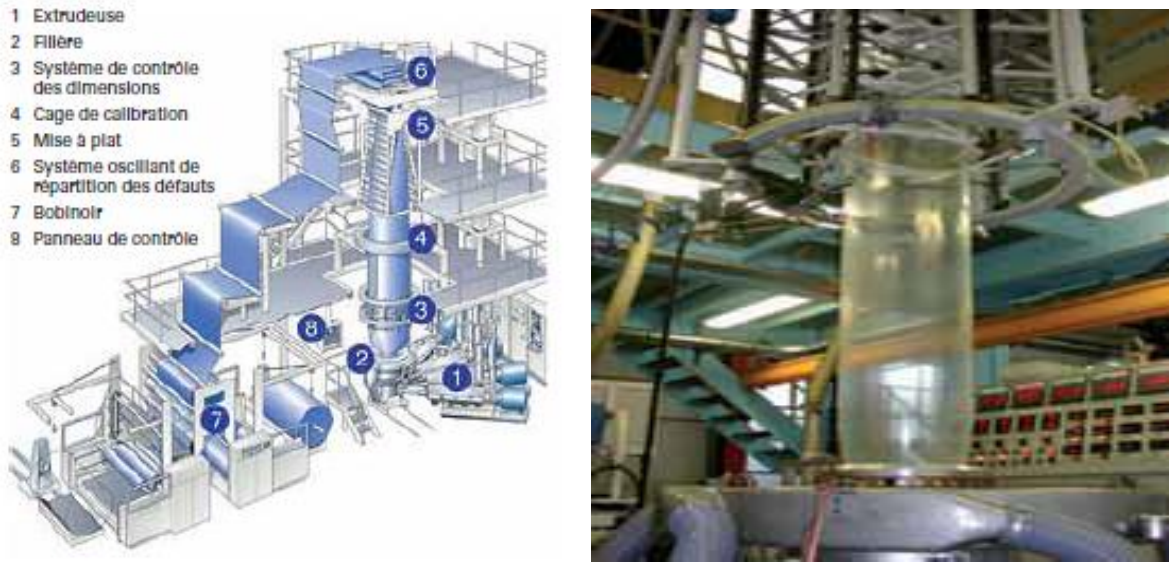


Figure VII.8: Extrusion gonflage

❖ **La filière d'extrusion gonflage**

Dans le cas le plus général, l'alimentation d'une filière fait un angle de 90° avec la direction de la sortie extrudeuse. La tète d'extrusion gonflage comporte les pièces suivantes : une carcasse externe, constituée généralement de deux ou trois parties superposées, solidement assemblées. La dernière partie est couramment désignée sous le nom de filière. Un poinçon interne, généralement en deux parties : Dans sa partie inférieure, le poinçon est fixé au corps de la filière, soit par une torpille (cas de l'alimentation centrale), soit directement par emboîtement et vissage à la base de la carcasse (cas de l'alimentation latérale). Entrefer : c'est la largeur du passage entre la filière et le poinçon au niveau du land. Afin de régulariser

l'écoulement de la matière fondue, le passage entre filière et poinçon comporte généralement de zones d'étranglement ou de laminage, disposées de préférence dans la partie amont.

La filière doit permettre de délivrer le polymère fondu de façon régulière, c'est-à-dire sans présence de ligne de resoudure qui pourrait se traduire par la présence de défauts de surface, de défauts optiques ou de défauts structurels pouvant engendrer des faiblesses du film

❖ **Système de refroidissement**

Le refroidissement de la bulle est effectué à l'aide d'un anneau de refroidissement reposant au-dessus de la filière. L'anneau est alimenté en air, pouvant préalablement être refroidi, grâce à un compresseur. L'utilisation du compresseur permet d'obtenir une vitesse d'air très importante, ce qui est vital car la vitesse du fluide de refroidissement est un paramètre clef dans l'efficacité du refroidissement par convection forcée. Plus la vitesse est élevée, plus le coefficient de transfert de chaleur par convection est élevé. L'efficacité de refroidissement est maximale au voisinage de l'anneau de refroidissement. La vitesse maximale est limitée par la nécessité de ne pas déstabiliser la bulle. Un refroidissement trop intense peut aussi engendrer un figeage prématuré de la bulle, ce qui peut causer dans certains cas sa rupture. L'air de refroidissement permet aussi d'accélérer le gonflement de la bulle à l'intérieur de l'anneau, ce qui permet d'en augmenter la stabilité.

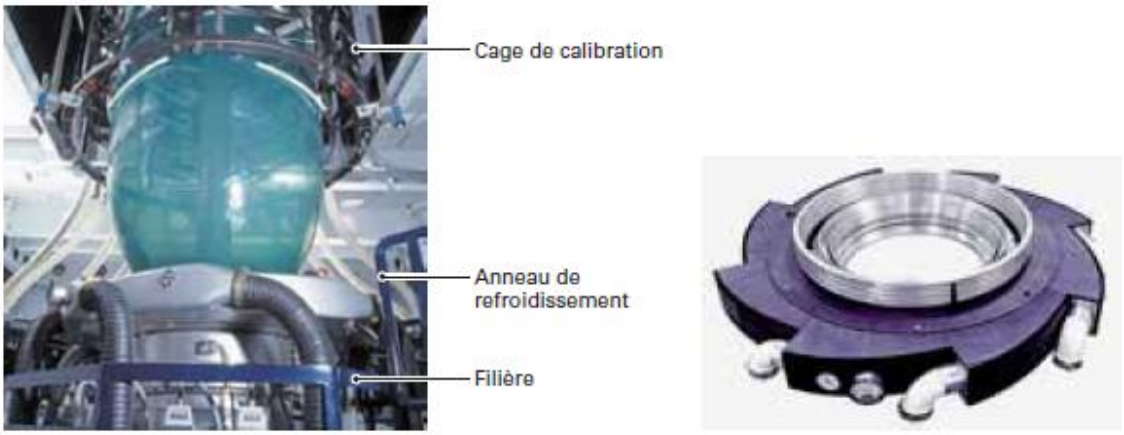


Figure VII.9: Anneau de refroidissement

❖ **Paramètres affectant la géométrie des bulles**

La différence principale entre le soufflage de gaine et la majorité des autres procédés de mise en œuvre des polymères est la présence d'une surface libre de plusieurs mètres. En soufflage de gaine, la présence d'une surface libre entraîne une multitude de profils de bulle. Les paramètres pilotant la géométrie doivent être bien compris afin de pouvoir produire une

bulle stable possédant les dimensions et les propriétés souhaitées. La géométrie de la bulle est pilotée par :

a. les conditions d'étirage;
b. le taux de refroidissement ;
c. les propriétés (thermique et rhéologique) des matériaux utilisés.

Les films produits par soufflage de gaine peuvent être utilisés pour fabriquer :

- des sacs ;
- des bâches agricoles ;
- des films imper respirant (films barrière à l'eau mais perméable à la vapeur d'eau) pour bâtiments ;
- des films architecturaux servant de filtre UV ;
- des films industriels (toitures pour serres) ;
- des structures flexibles servant à l'emballage alimentaire ou au suremballage. Environ 60 % des films fabriqués sur le marché sont produits grâce au procédé de soufflage de gaine.

Les principales qualités recherchées lors de l'élaboration de films sont :

- la résistance aux chocs ;
- l'adhésion ;
- la brillance ;
- la transparence ;
- l'imperméabilité ;
- la compatibilité alimentaire ;
- la résistance au vieillissement (oxydation, UV, etc).

Chapitre VIII : Moulage par compression

VIII.1. Principe

Cette technique consiste à presser, à chaud, la matière dans un moule. La matière dosée est placée dans un moule ouvert. Le moule est ensuite fermé à l'aide d'une presse hydraulique. Sous l'action de la chaleur et de la pression, la matière commence par se fluidifier et prend la forme du moule puis la réaction de réticulation se produit. Il est nécessaire de laisser la matière sous presse le temps de la réaction, appelé temps de cuisson. Cela impose des immobilisations importantes de matériel.

VIII.2. Cycle de moulage

Il se décompose de la façon suivante :

a) chargement du moule ;

b) fermeture du moule ;

c) dégazage éventuel ;

d) cuisson ;

e) ouverture du moule ;

f) éjection des pièces ;

g) évacuation des pièces ;

h) nettoyage du moule ;

i) préparation du moule pour la « moulée » suivante.

❖ Chargement du moule

La quantité de matière doit être soigneusement ajustée avant son introduction dans le moule.

Les poudres à mouler sont dosées soit par pesée, soit à l'aide d'un doseur volumétrique ou encore en utilisant des pastilles d'une masse connue. La matière ainsi dosée est placée dans le moule soit à la main, soit à l'aide d'un chargeur manuel (cas des moules à empreintes multiples).La mise en place dans le moule doit être étudiée avec soin en fonction de la géométrie de la pièce.

❖ Fermeture du moule

La fermeture doit être lente pour permettre aux gaz de s'échapper (gaz dus à la polycondensation et à l'humidité, mais aussi air contenu dans les empreintes du moule). Dans le cas du moulage des SMC et des stratifiés, une fermeture lente évite le déplacement des flans dans le moule. Il est conseillé d'utiliser des presses à deux vitesses, avec une vitesse

d’approche rapide. Cela permet de diminuer le temps entre le chargement du moule et l’application de la pression pour éviter une réticulation prématurée.

❖ **Dégazage éventuel**

On procède à une réouverture du moule, limitée dans le temps et dans l’espace, pour l’évacuation des gaz. Le dégazage est effectué juste en fin de fermeture du moule. Il n’est pas toujours nécessaire et doit être réalisé avec précaution car il peut provoquer des traces de recollement de matière sur la pièce.

❖ **Cuisson**

Cette opération de réticulation conduit à l’état rigide permettant le démoulage à chaud. Elle demande un certain temps qui peut être, par exemple, de l’ordre de 1 min par mm d’épaisseur de pièce. Généralement, dans le cas de presses à commandes programmées, le temps de cuisson est compté à partir de la fin de la fermeture du moule [ou de la fin du dégazage (s’il est pratiqué)] jusqu’à l’ouverture du moule.

❖ **Ouverture du moule**

Elle doit être lente pour ne pas détériorer les pièces.

❖ **Évacuation des pièces**

Les pièces sont enlevées à la main. Il peut être nécessaire de les placer sous un conformateur pour le refroidissement, ce qui diminue les risques de déformation.

❖ **Nettoyage du moule**

On utilise généralement de l’air comprimé pour enlever les bavures.

❖ **Préparation du moule pour la « moulée » suivante**

Elle consiste à :

1. remettre en place les parties amovibles du moule si nécessaire ;
2. positionner les inserts si la pièce en comporte ;
3. appliquer un agent de démoulage si nécessaire.

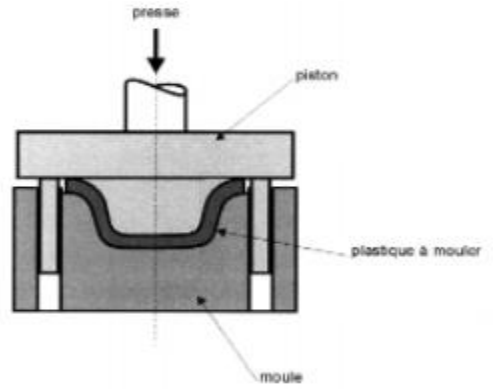


Figure VIII.1: Moulage par compression

VIII.3. Conditions de moulage

❖ **Masse de matière mise en œuvre**

Masse de matière = (volume de la pièce× masse volumique de la matière) + perte.

La perte (bavures) doit être déterminée expérimentalement pour chaque moule et pour chaque matière.

❖ **Pression de moulage**

La pression de moulage *P* est donnée par la formule : $P=F/S$

F : est la force totale appliquée sur le moule, égale à la pression d'huile sur le piston (lue sur le manomètre) multipliée par la surface de la tête du piston. Dans le cas de vérin à double effet, la tête de piston n'a pas la même section que la partie visible.

S : est la surface projetée de la moulée (plan horizontal), égale à la somme de la surface projetée de toutes les empreintes.

VIII.4. Choix de la méthode de moulage

Le choix de la méthode de moulage doit être fait en fonction :

- de la quantité et du coût des pièces à produire ;
- du risque de déformation et des tolérances dimensionnelles ;
- du type de matière et de la nature des charges et des renforts ;
- des dimensions des pièces ;
- des difficultés de moulage ;
- des opérations de finition.

VIII.5. Avantages et inconvénients de moulage par compression

❖ **Avantages**

- Pression relativement faible d'où possibilité : de moulage de pièces de grande surface ; d'un nombre d'empreintes plus grand qu'avec les autres méthodes de moulage.

- Pertes de matière plus faibles (absence de « carotte »).
- Retrait plus faible.
- Déformation des pièces moulées moins prononcée.
- Prix des presses plus bas.

❖ **Inconvénients**

- Temps de cycle plus longs.
- Nécessité de dosage pour chaque empreinte.
- Moule nécessitant une chambre de compression.
- Difficulté d'exécution des moules positifs et semi-positifs.
- Cotes des pièces dépendant du sens de fermeture plus difficiles à respecter.
- Difficulté de moulage de pièces : présentant de grandes différences d'épaisseur ; avec des broches fines ou des inserts mal tenus au moment de la fermeture.
- Opération d'ébavurage importante.

VIII.6. Caractéristiques des presses de compression

Elles sont principalement constituées de deux plateaux : l'un fixe, l'autre mobile (figure VIII.2). Les mouvements sont généralement commandés par un dispositif hydraulique (vérin). Les presses utilisées pour la production de panneaux stratifiés (par exemple des stratifiés décoratifs) peuvent comporter plusieurs plateaux mobiles superposés, ce qui permet de presser simultanément plusieurs panneaux. Les dimensions des plateaux sont liées à la puissance de la presse. Le mouvement des plateaux ainsi que l'application de la pression sont généralement assurés par un ou plusieurs vérins hydrauliques. Les vérins peuvent être à simple effet ou à double effet. La force de fermeture peut être appliquée par le bas sur le plateau inférieur (presse ascendante) ou par le haut sur le plateau supérieur (presse descendante). La production d'énergie hydraulique, assurée par une pompe, est transmise au vérin soit directement, soit par l'intermédiaire d'un accumulateur qui permet un plus grand débit de fluide et l'alimentation de plusieurs presses. La commande des éjecteurs est : soit mécanique, entraînée par le mouvement du plateau mobile ; soit hydraulique à l'aide d'un vérin auxiliaire qui peut être le vérin de transfert lorsque le moule de compression est monté sur une presse de transfert. L'espace entre les plateaux de la presse permet le montage du moule. La course d'ouverture doit être au moins égale à 3 fois la hauteur de l'objet moulé pour un démoulage facile. Une grande course d'ouverture entraîne un long temps de fermeture, ce qui est quelquefois incompatible avec des matériaux à polymérisation rapide.

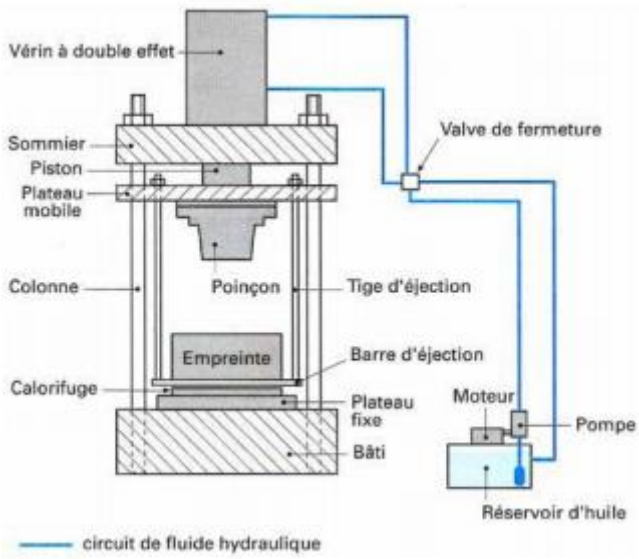


Figure VIII.2: Presse de compression

Références bibliographiques

1. *MCGRUM N.G, BICKLEY C.P. Principles of polymers engineering,(1999).*

2. *AGASSANT J.F, HAUDIN J.M. Mise en forme des polymères thermoplastiques. Pratique des matériaux industriels, Paris (1991)*

3. *SHENOY A.V, SAINI D-R. Thermoplastic melt rheology and processing (Rhéologie et transformation des thermoplastiques). Dekker M. Inc., (1996).*

4. *DEALY J.D, WISSBRUN K.F. La rhéologie des polymères fondus et son rôle dans la transformation des matières plastiques – Théorie et applications. Van Nostrand Reinhold, (1990).*

5. *COGSWELL F.N. Converging flow of polymer melts in extrusion dies. Polymer Engineering and Science. (1972).*

6. *DREYER J.L. Injection assistée par gaz. Techniques de l'Ingénieur, AM 3 693 (2012).*

7. *XU X , PARK C.B. Injection foam molding dans Injection Molding, Technology and Fundamentals,Munich (2009).*

8. *DUPONT S. Extrusion soufflage de grands corps creux. Techniques de l'ingénieur (2013).*

9. *AGASSANT J.F. Les principes de base de la modélisation des procédés de mise en forme des polymères. Rhéologie (2012).*

10. *AGASSANT J.F. HAUDIN J.M. Mise en forme des polymères, dans « Matériaux Polymères ». Éditeur Marc Carrega, Dunod (2007).*

11. *AGASSANT J.F, AVENAS P, SERGENT J.Ph. et VINCENT M. La Mise en Forme des Polymères. Approche Thermomécanique de la Plasturgie, Tec et Doc (2014)*

12. *LAFFARGUE J. Étude et modélisation des instabilités du procédé de soufflage de soufflage de gaine. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2003).*

13. *SEGUELA R. Relations mises en œuvre – structure – propriétés dans les matériaux polymères. Revue de métallurgie, Sciences et génie des matériaux (1999)*

14. *DENIS G. Extrusion-soufflage et injection-soufflage avec ou sans bi-étirage. Technique d'ingénieur (1989).*

15. *MUNCH T. Moules pour l'injection des thermoplastiques – Généralités et périphériques. Technique d'ingénieur (2010).*

16. *GORLIER E. Caractérisation rhéologique et structurale d'un PET. Application au procédé de bi-étirage soufflage de bouteilles. Thèse ENSMP (2001).*

17. *NIVIÈRE J. Calandrage, plastiques modernes et élastomères (1984).*

18. *PRENTICE P. Surface irregularities of calendered Polypropylene. Polymer (1981).*

19*. AGASSANT J.F , ESPY M. Polym. Eng. Sci.(1985).*

20. *VERGNES B , PUISSANT S. Extrusion , technique d'ingénieur (2002).*

21. *VERGNES B, PUISSANT S. Extrusion monovis technique d'ingénieur (2003).*

22. *LACABANNE C. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Toulouse (1974).*

23. *LAVERGNE C. Thèse de Doctorat d'Université Paul Sabatier, Toulouse (1992).*

24. *ALLÈS H. Étude expérimentale et théorique de l'injection des thermoplastiques. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris (1986).*

25. *PHILIPON S. Injection de polymère fondes dans les moules : étude numérique des phénomènes thermomécaniques durant la phase de remplissage. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris (1989).*

26. *WILLIEN J.L. Modélisation surfacique du remplissage de moules en injection des thermoplastiques . Thèse de Doctorat, École des Mines de Paris (1992).*

27. *AGASSANT J.F, ALLES H, PHILIPON S et VINCENT M. Polym. Eng. Sci. (1998).*

28. *SAUER R. Moulage par injection de corps creux en matière plastique technique. Bayer, Leverkusen. Kunststoffe (1991).*

29. *MOUSSEAU P, SARDA A et DETERRE R. Thermique de l'injection des thermoplastiques. Optimisation (2006).*

30. *ROSATO D.V. Extruding Plastics. SPE Books (1998).*

31*. AGASSANT J.F, AVENAS P, SERGENT J.Ph, VERGNES B. et VINCENT M. La mise en forme des matières plastiques. Édition, Lavoisier, Paris (1996).*

32. *HENSEN F. Plastics Extrusion Technology. Hanser, Munich (1997).*

33. *RAUWENDAAL C. Understanding Extrusion. Hanser, Munich (1998).*