

## **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 optimiser 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.

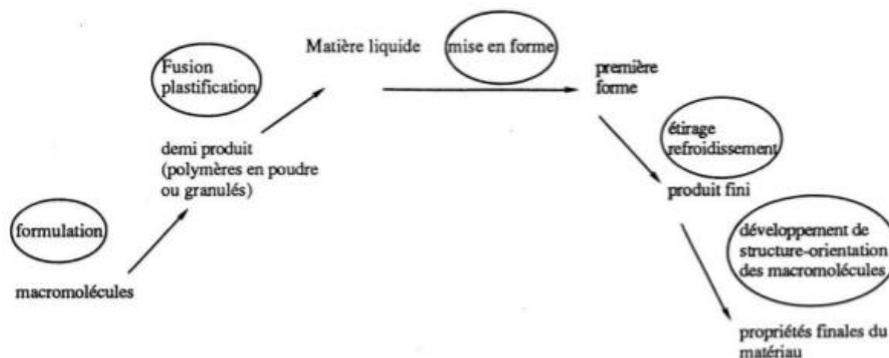


Figure I.1 : Schéma général de la mise en œuvre des polymères.

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 :

$$Br = \frac{\eta V_F^2}{\lambda(T_F - \bar{T})} \quad (I.1)$$

Avec :  $\eta$  (Pa·s): Viscosité du polymère,

$V_F$  ( $m \cdot s^{-1}$ ): Vitesse de la vis.

$\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ) : Conductivité thermique du polymère,

$T_F$  ( $^\circ C$ ): Température du fourreau,

$\bar{T}$  ( $^\circ C$ ): 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 :

$$V = S \cdot A_V \quad (I.2)$$

$$D'où le débit-volume : Q_v = V \cdot N \text{ (m}^3/\text{min)} = 60 \cdot V \cdot N \text{ (m}^3/\text{h)} \quad (I.3)$$

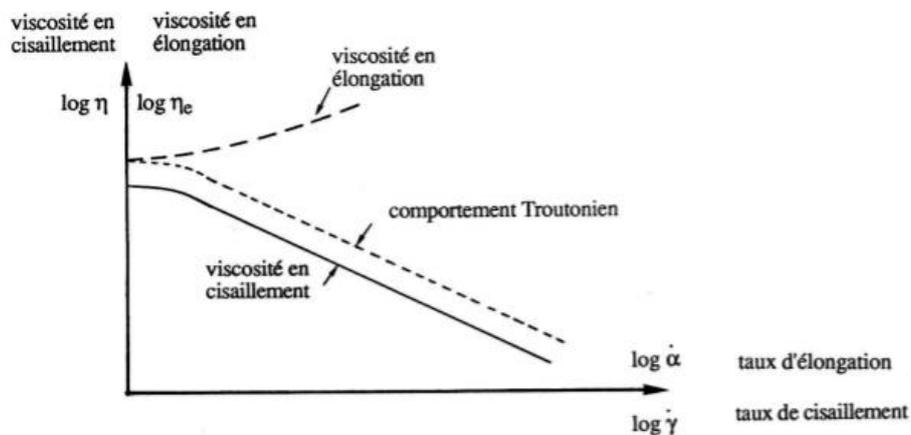
Avec  $N$  (tr/min) vitesse de rotation de la vis.

Pour obtenir le débit-masse (kg/h), il suffit de multiplier le débit volume (m<sup>3</sup>/h) par la masse volumique granulaire de la matière considérée :  $Q_m = \rho \cdot Q_v = 60 \cdot \rho \cdot V \cdot N$  (I.4)  
 Avec  $\rho$  (kg·m<sup>-3</sup>) 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  $\dot{\gamma}$ ; 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 ( $\eta$ ) 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 :

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

$$S = 2 \cdot K \cdot (\dot{\gamma})^{m-1} \cdot \epsilon \quad (I.6)$$

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (I.7)$$

$\delta$ : Tenseur des contraintes,

P: Pression,

I: Tenseur identité,

S: Déviateur des contraintes,

K : Consistance du polymère,

$\dot{\gamma}$ : Taux de cisaillement,

m: Coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation,

$\epsilon$ : 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 :

$$S = 2 \cdot \eta_0 \cdot [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^a]^{(m-1/a)} \cdot \epsilon \quad (I.8)$$

$\eta_0$  : Viscosité au palier newtonien,

$\lambda$ : Temps de relaxation moyen,

a : Paramètre qui permet d'ajuster la transition entre le palier newtonien et la zone où 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 :

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

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

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

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

Avec:

$\delta$  : Tenseur des contraintes,

$\delta'$ : Tenseur des extra-contraintes,

I: Tenseur identité,

$\gamma$ : Taux de cisaillement,

$\varepsilon$ : Tenseur des vitesses de déformation,

G: Module élastique,

C: Tenseur d'orientation,

P : Pression.

## **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

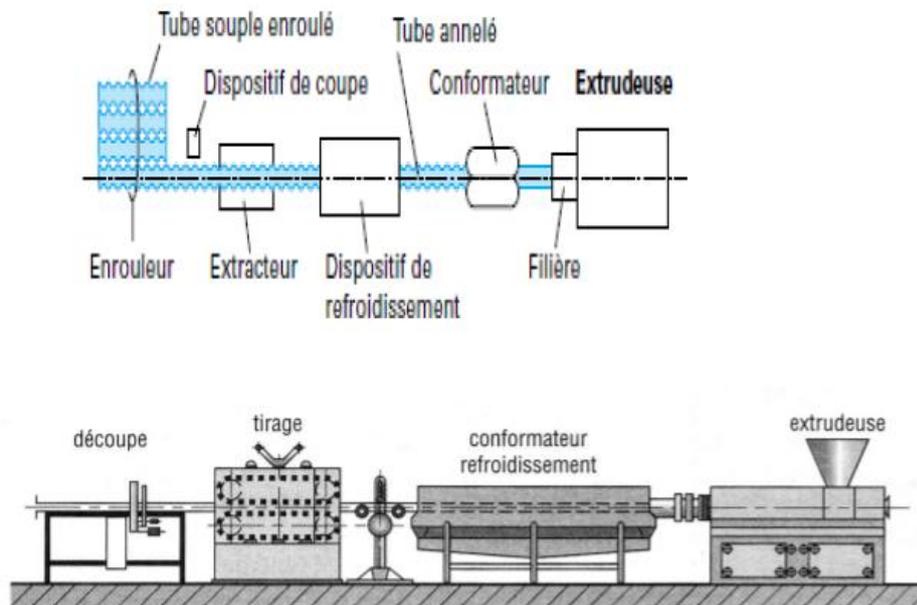
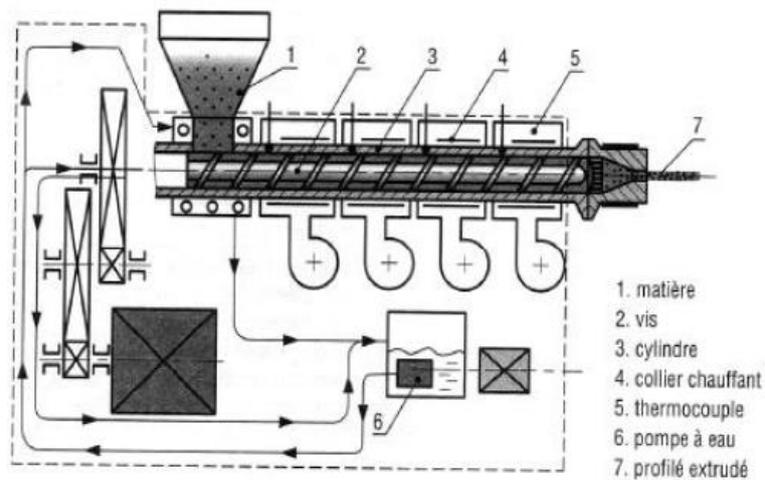


Figure II.1: Extrusion de tubes

### 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 éléments 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 vis 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 jusqu'à 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

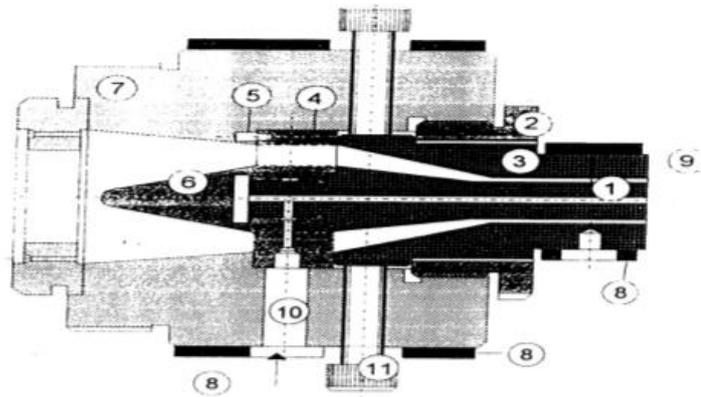


**Figure II.4:** Vis pour matière semi cristalline

#### ❖ 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 :

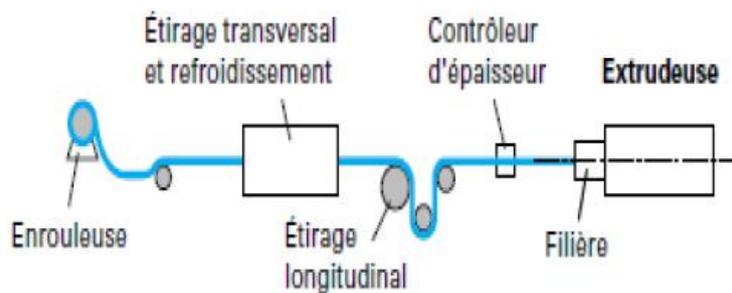
- La tête d'extrusion droite pour la fabrication des profilés et des tubes.
- La tête d'équerre verticale pour l'extrusion soufflage et l'extrusion gonflage
- La tête d'équerre horizontale ou oblique pour le recouvrement des câbles
- Les têtes spéciales pour l'extrusion de feuilles et de plaques (tête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



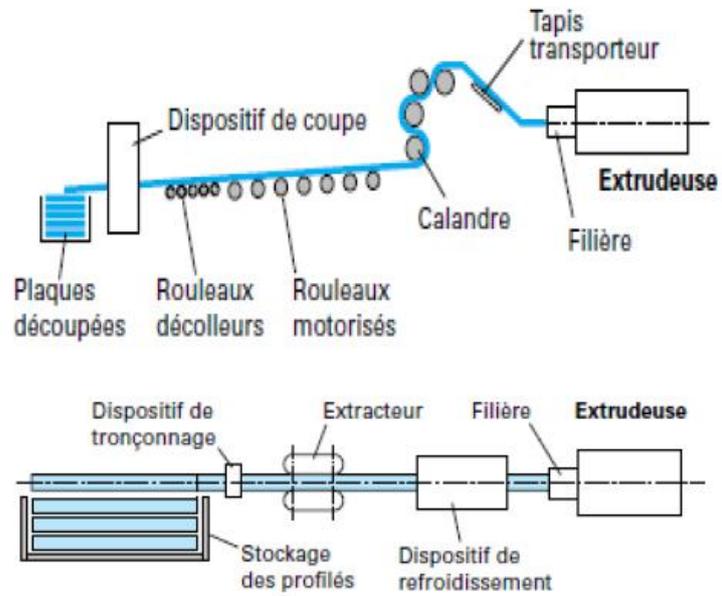


Figure II.6 : Quelques installations d'extrusion

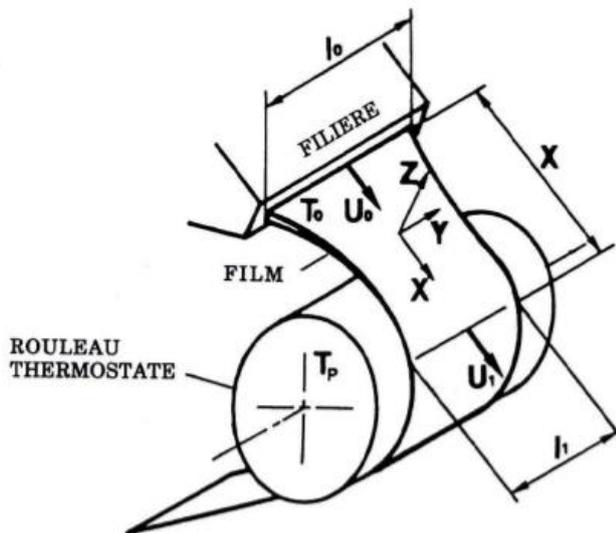


Figure II.7: L'extrusion de film Plat.

## 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 :

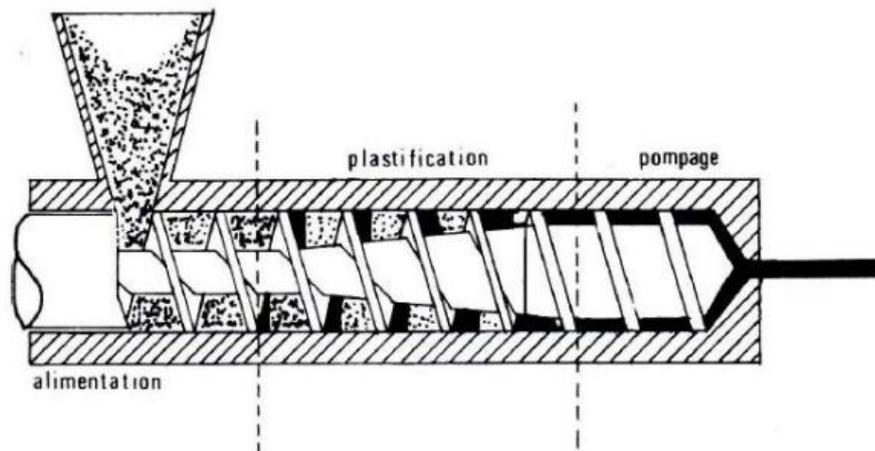
- **Une fonction de convoyage** : le polymère descendant de la trémie sous forme de poudre ou de granulés est compacté et convoyé : c'est le principe de la vis d'Archimède ; Ses fonctions sont d'accepter et de convoier les granulés en provenance de la trémie, mais également de les compacter axialement 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 processus 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.

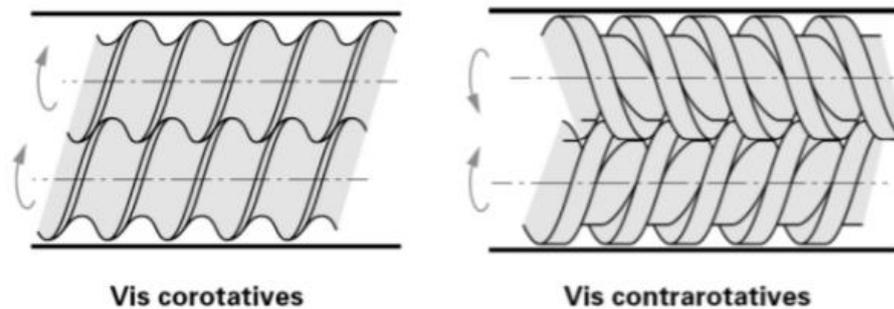
L'extrudeuse bi-vis est conseillé pour :

- ✓ 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.

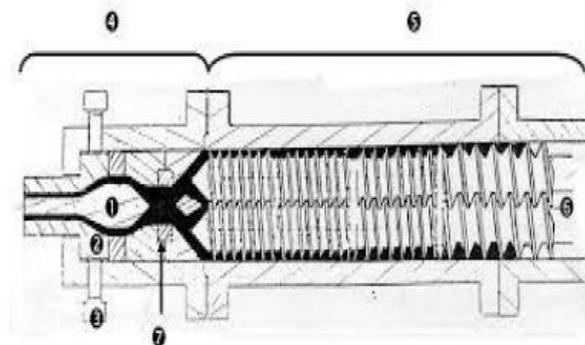
Dans tous les cas, la matière doit pouvoir circuler, d'une vis à l'autre, pour permettre une meilleure homogénéisation.



**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 adhérent 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**

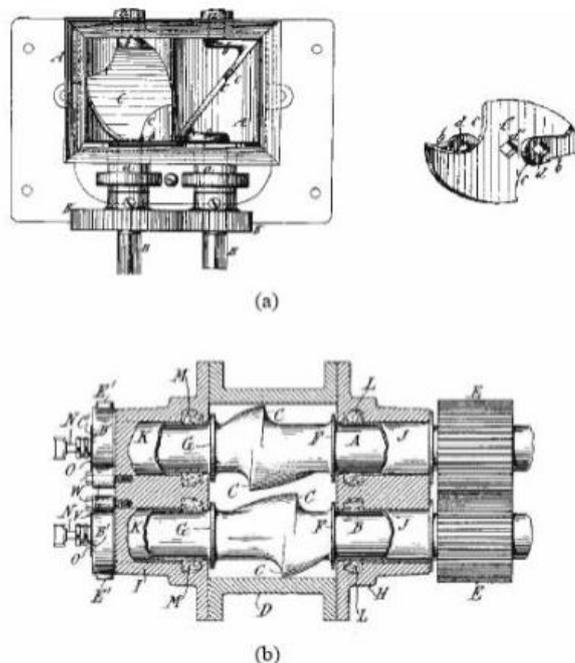
Les matières thermoplastiques extrudées au travers d'une filière donnent de multiples profilés adaptés à des secteurs tels que :

- 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).

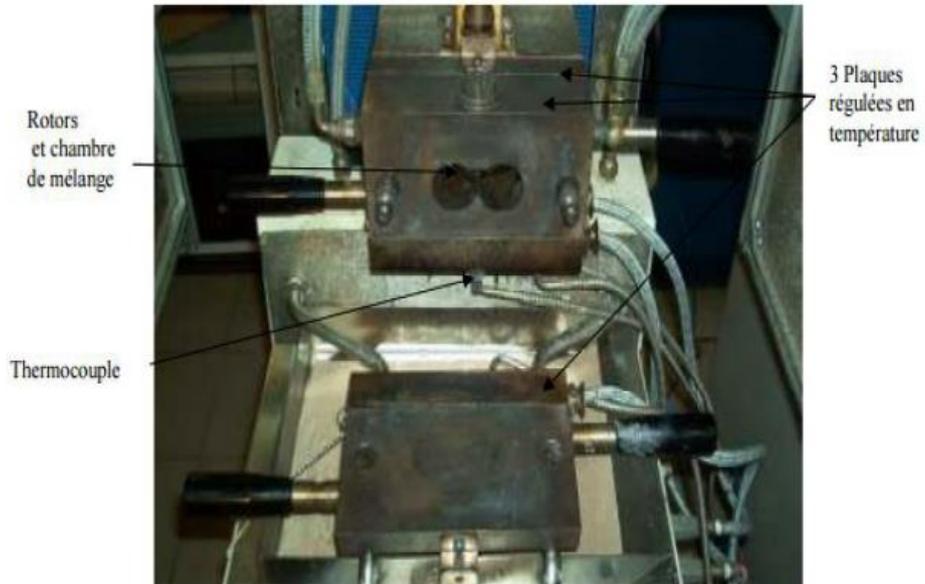


**Figure II.11:** (a) Mélangeur interne dessiné par Pfeiderer (1880) (b) Mélangeur interne de type Banbury (1931) (White (1995))

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.

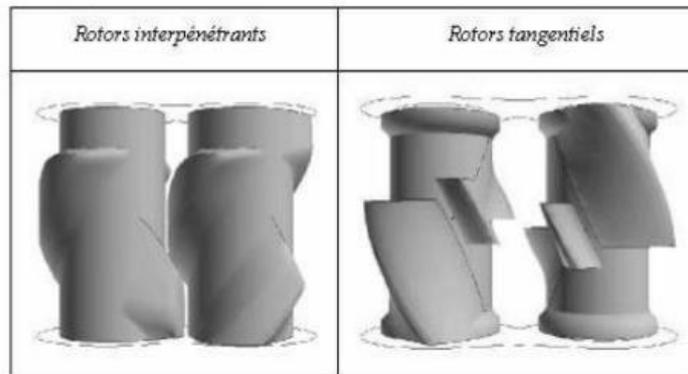
Ce dispositif est chauffé électriquement dans un domaine de température allant de 30°C à 400°C et peut être refroidi par air comprimé. Différents thermocouples permettent de connaître les températures régnant dans le mélangeur dont un, émergeant au centre de la chambre de mélange entre les deux pales, 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

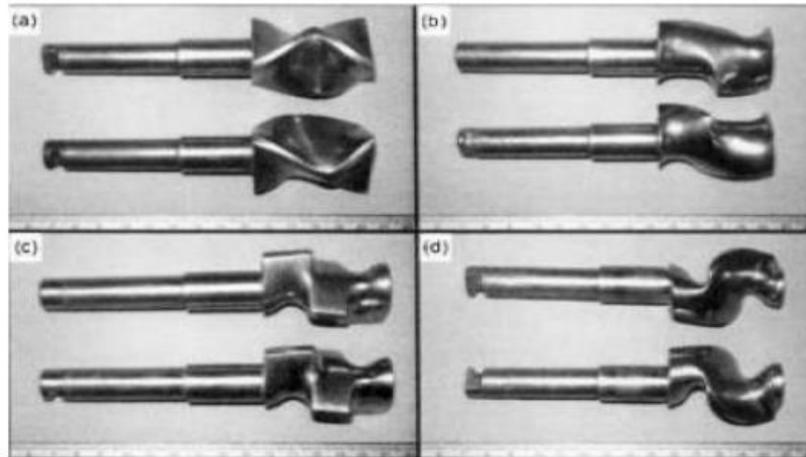
❖ **La géométrie des rotors**

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;

