

## Chapitre III : Autres Procédés de Mise en Forme

### III- Thermoformage

#### III.1. Présentation

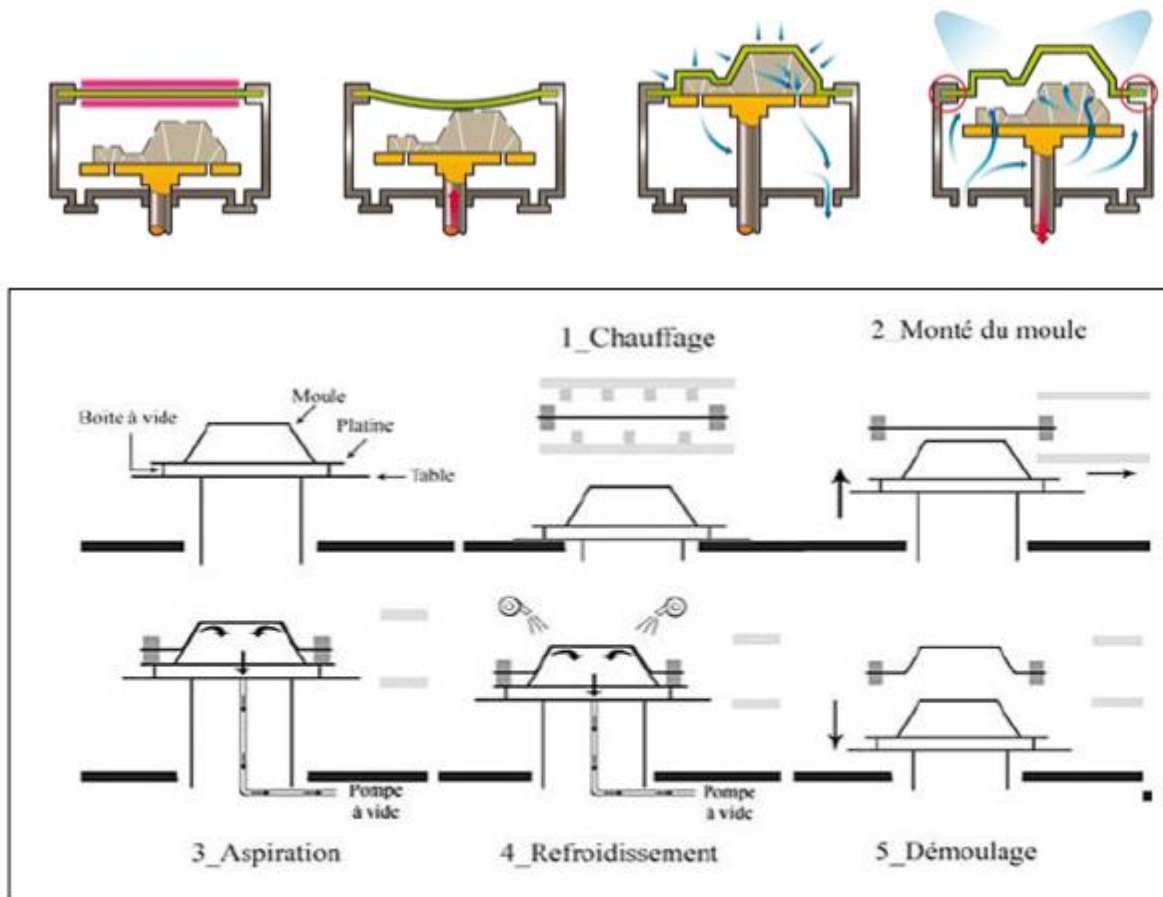
Le thermoformage est une technique de transformation de matières thermoplastiques qui permet la production industrielle d'objets les plus divers tels une barquette d'emballage, un pot de yaourt, une baignoire, etc. L'objet thermoformé s'obtient en deux étapes de transformation du matériau initial. La 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.

#### III.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 ( $T_g$ ) 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 III.1** : Principe du thermoformage

Les différentes étapes du thermoformage par le vide sont (Figure III.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 ( $T_g$ ) 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 est démontée et évacuée. 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.

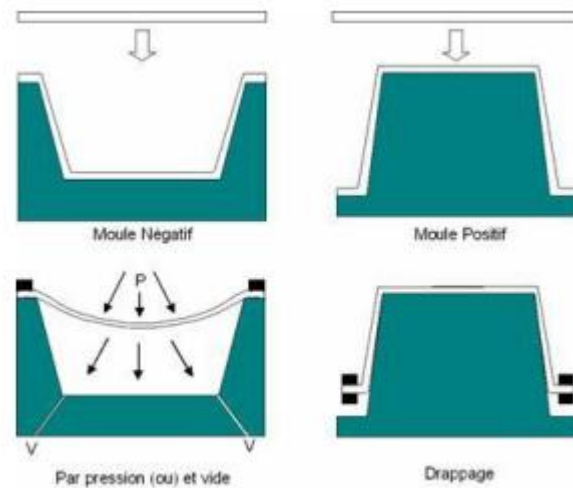
### **III.3. Les Types de thermoformage**

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 ( $\approx 1$  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.

### **III.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

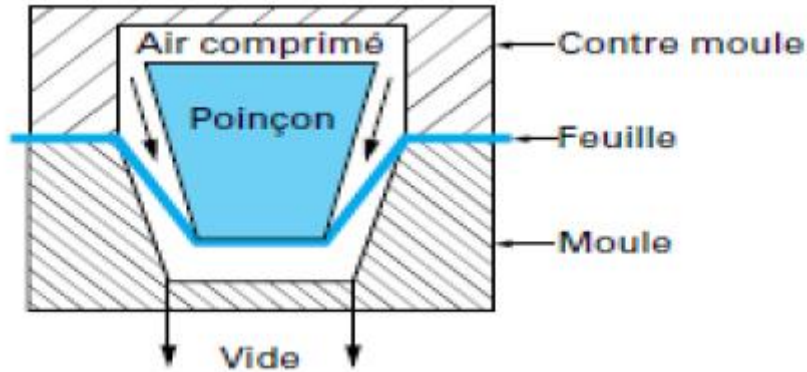
La fabrication et l'usinage de ce type de moule sont simples et peu onéreux. Le thermoformage avec ces moules est encore appelé « drappage » car la feuille préchauffée est drapée sur le moule par la pression atmosphérique externe. L'air entre moule et feuille est aspiré par une pompe à vide.

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 profonds. 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.



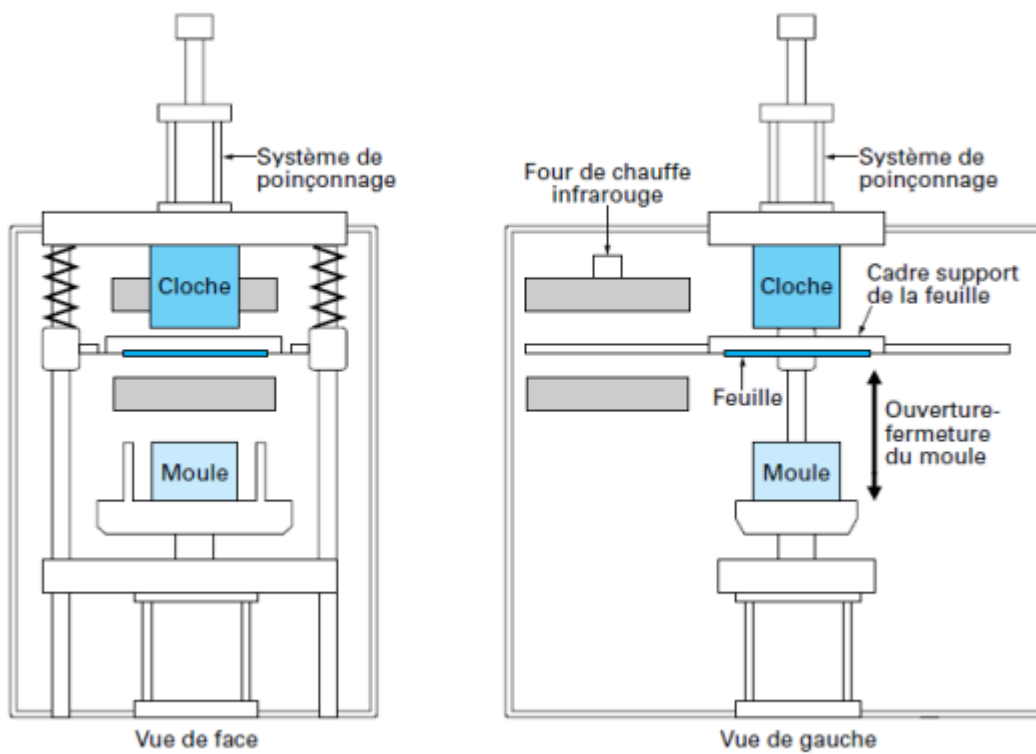
**Figure III.2:** Formage négatif.

### III.5. Machines de thermoformage

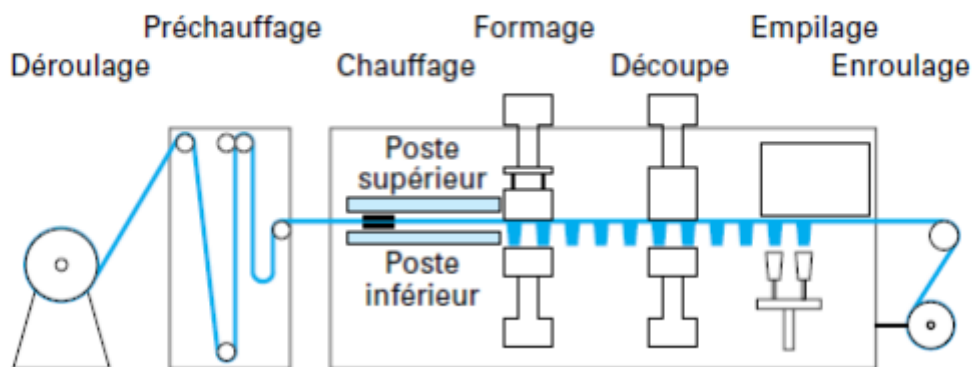
Il y a une très grande diversité de machines de thermoformage, en correspondance avec la diversité des produits et des applications.

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 III.3 :** Machine de thermoformage discontinue.



**Figure II.4 :** Ligne de thermoformage continue

Les paramètres à prendre en compte pour une machine de Thermoformage discontinue (figure III.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 III.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 III.5 :** Produits thermoformés par thermoformage.

## VI- 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.

### VI.2. Principales étapes du rotomoulage

De façon générale, on distingue quatre étapes dans le procédé de rotomoulage (figure VI.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  $\rho$  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.

Cet agent 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 VI.2 représente de manière schématisée l'évolution de la température au cours des différentes étapes du procédé.

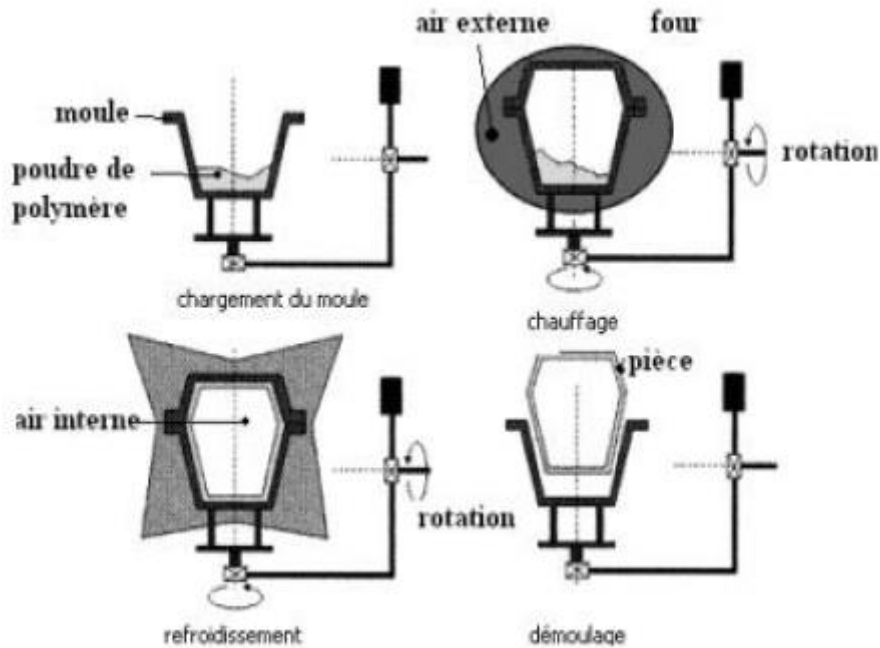


Figure VI.1 : Les différentes phases d'obtention d'une pièce par rotomoulage

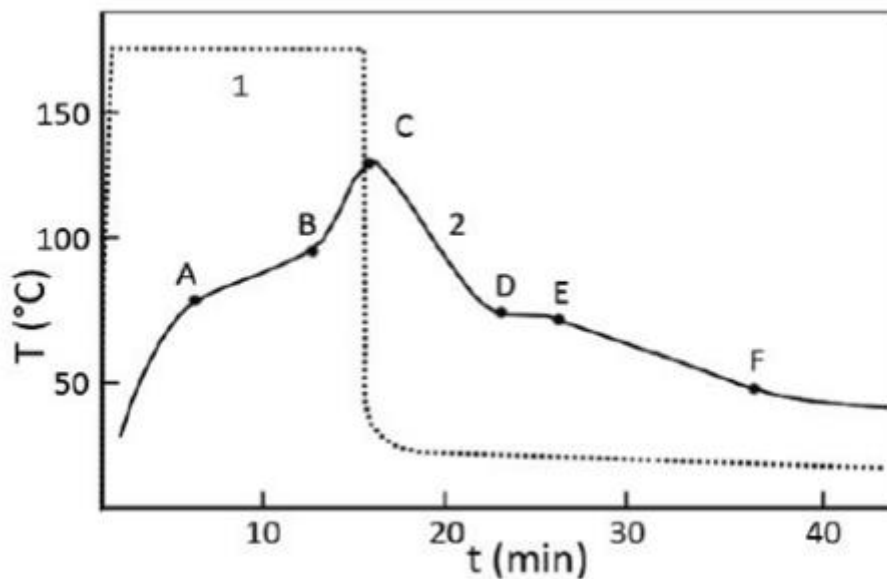


Figure VI.2 : Evolution de la température au cours du rotomoulage des poudres

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'à atteindre une température proche de la température de fusion du matériau (dans le cas 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.

### **VI.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 obtenus par électroformage**

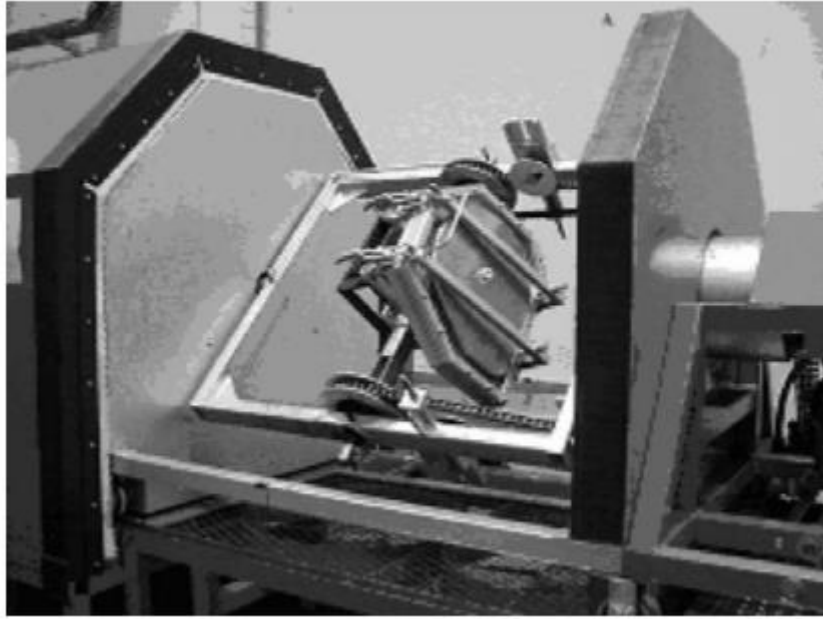
Ils sont utilisés pour des pièces de formes très complexes avec des détails de surface fins. Ils sont très chers. Les moules sont fabriqués en nickel, en cuivre ou dans un alliage des deux avec une bonne conductivité thermique.

#### ✓ **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 VI.3 montre une machine de rotomoulage de laboratoire pour la fabrication des pièces de dimensions moyennes.

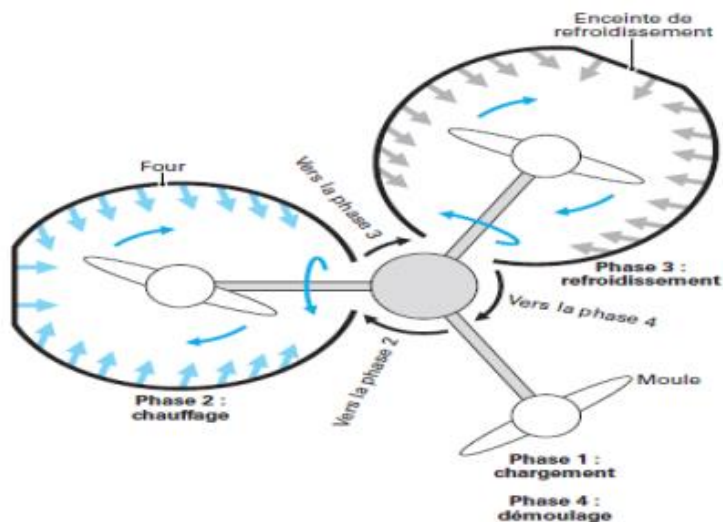


**Figure VI.3:** Petite machine de rotomoulage

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 VI. 4). Ces bras sont soit fixes soit indépendants.



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

## VI.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  $T_{crist}$  intermédiaire entre  $T_g$  et  $T_f$ .

#### ❖ 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.

## VI.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 VI.1, le rotomoulage est comparé avec l'extrusion soufflage et le thermoformage.

Caractéristique	<b>Soufflage</b>	<b>Thermoformage</b>	<b>Rotomoulage</b>
Volume de la pièce (cm <sup>3</sup> )	10 à 10 <sup>6</sup>	1 à 10 <sup>6</sup>	10 à 10 <sup>8</sup>
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	Épaisseur 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

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

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- Le calandrage

### V.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 ;

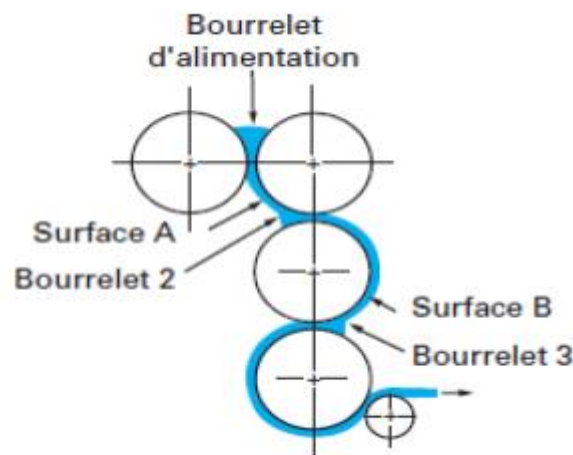
l'extrusion, qui peut être facilement dimensionnée à la taille des séries, est surtout recherchée pour sa polyvalence..

### V.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 V.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.

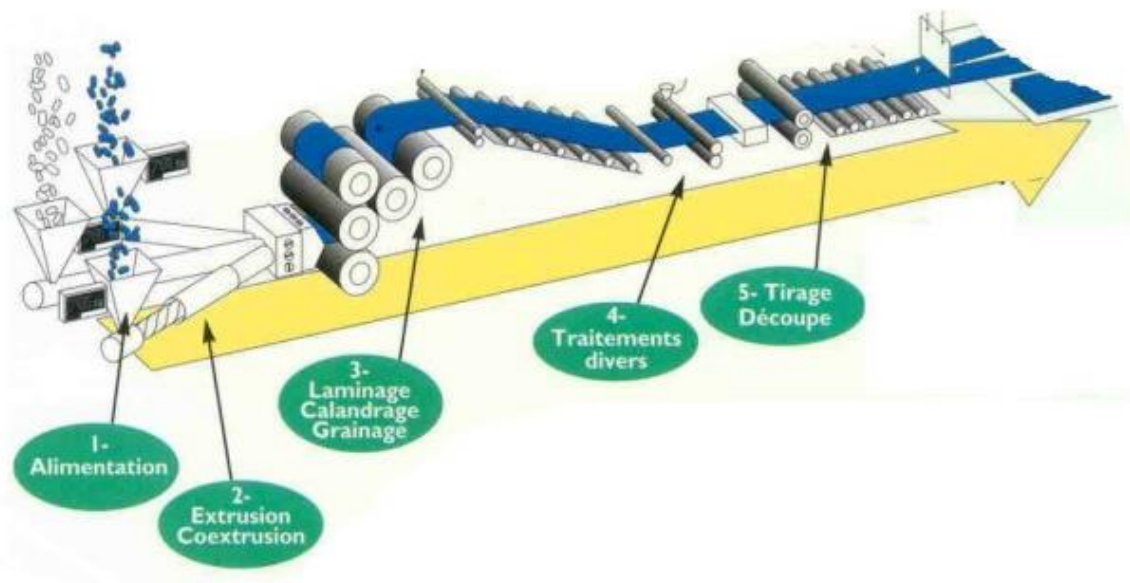


**Figure V.1** : Principe du calandrage à quatre cylindres

### V.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 V.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.

#### V.4. Problèmes du calandrage

Le but du calandreur est d'obtenir des films ou des feuilles avec une faible tolérance d'épaisseur ( $\pm 2$  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.

## **VI- Extrusion-soufflage et injection-soufflage**

### **VI.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.

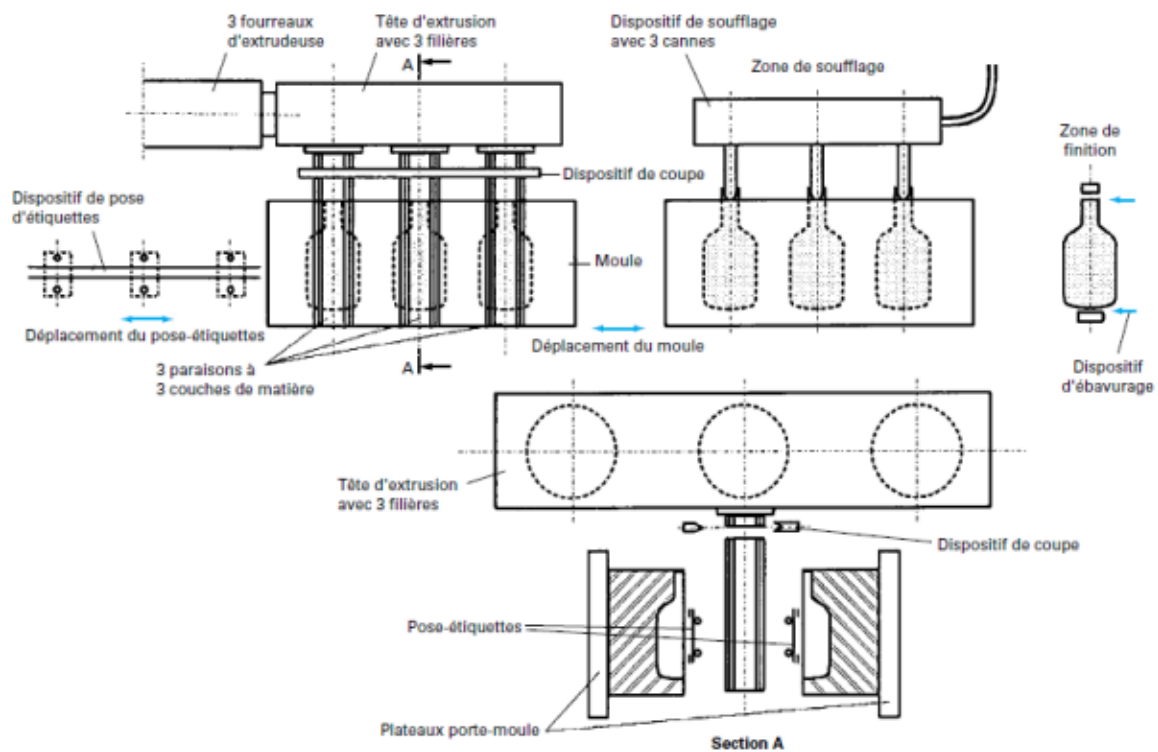
Depuis les petits flacons de quelques millilitres utilisés en pharmacie jusqu'aux cuves de mazout de 5000 L, ces corps creux en matières thermoplastiques sont utilisés au conditionnement de toutes sortes de produits liquides, pâteux, pulvérulents, qu'ils soient alimentaires, d'entretien, chimiques etc... 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.

### **VI.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  $\mu\text{m}$  à des débits dépassant 300 kg/h.

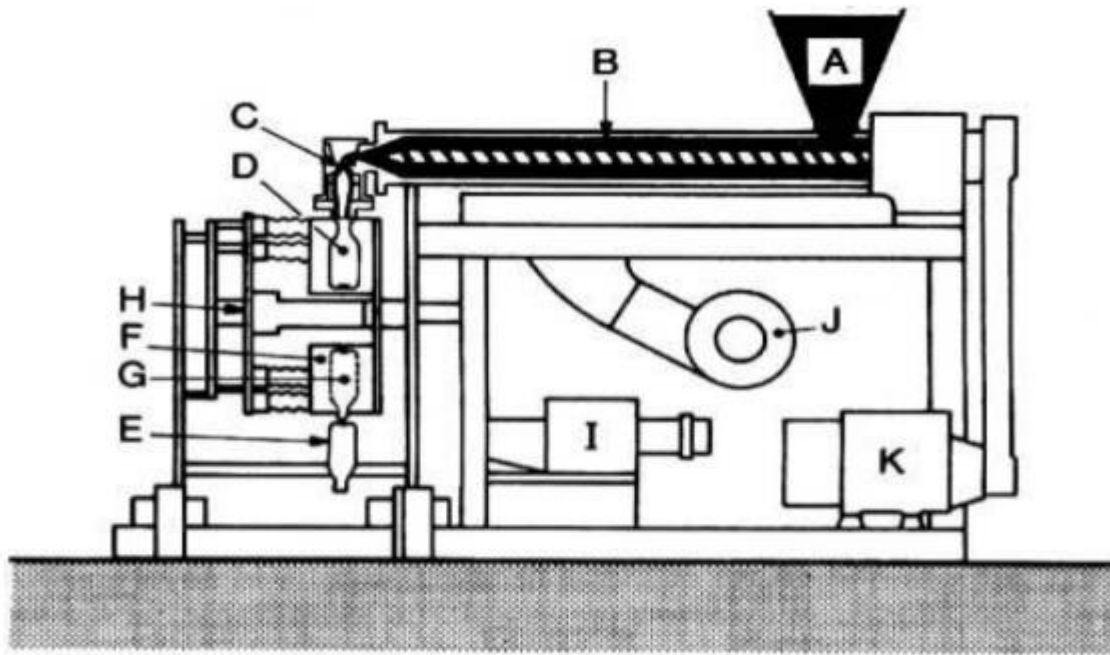
Pour l'obtention des corps creux par extrusion-soufflage à partir d'un polymère plastifié par la chaleur, on produit une « paraison » tubulaire en forçant la matière à passer dans l'entrefer circulaire avant de s'écouler à l'air libre, puis on procède à l'emprisonnement de cette paraison dans un moule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



### VI.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 VI.1: Machine d'extrusion-soufflage de bouteilles.

#### VI.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 VI.2.

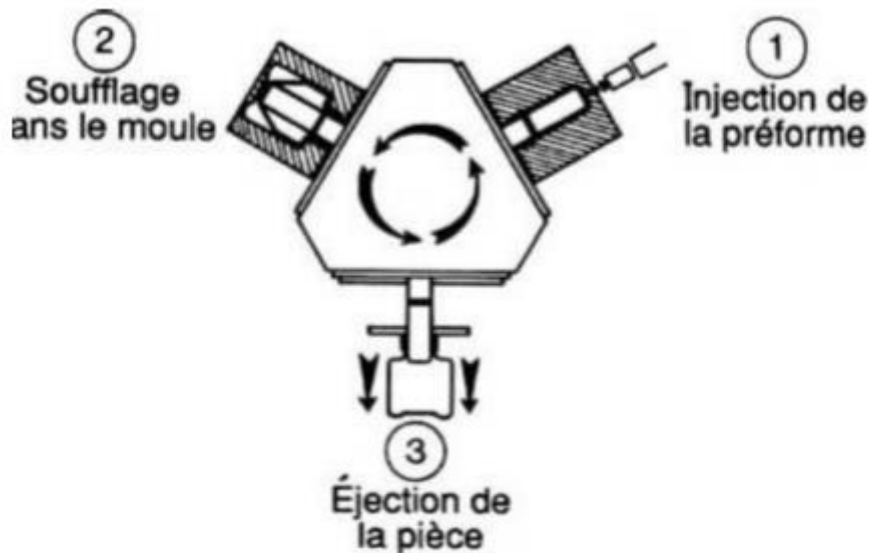


Figure VI.2 : Poste d'injection-soufflage de corps creux

### VI.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.

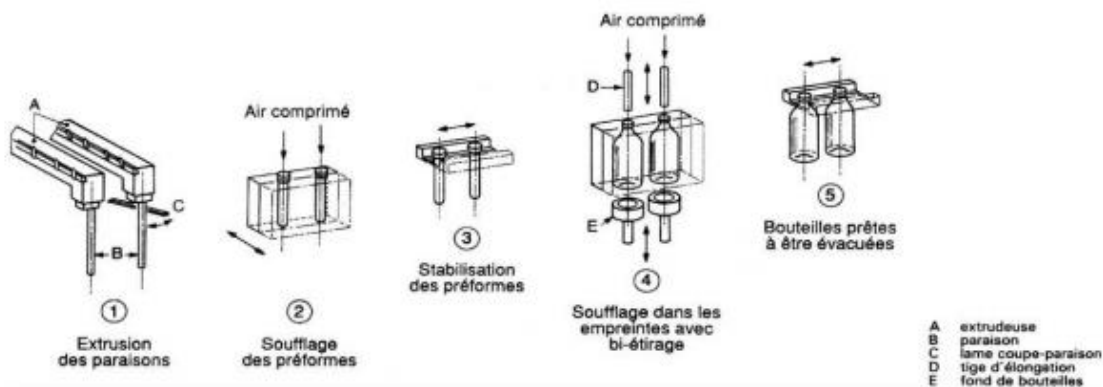


Figure VI.3 : Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud.

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 VI.4).

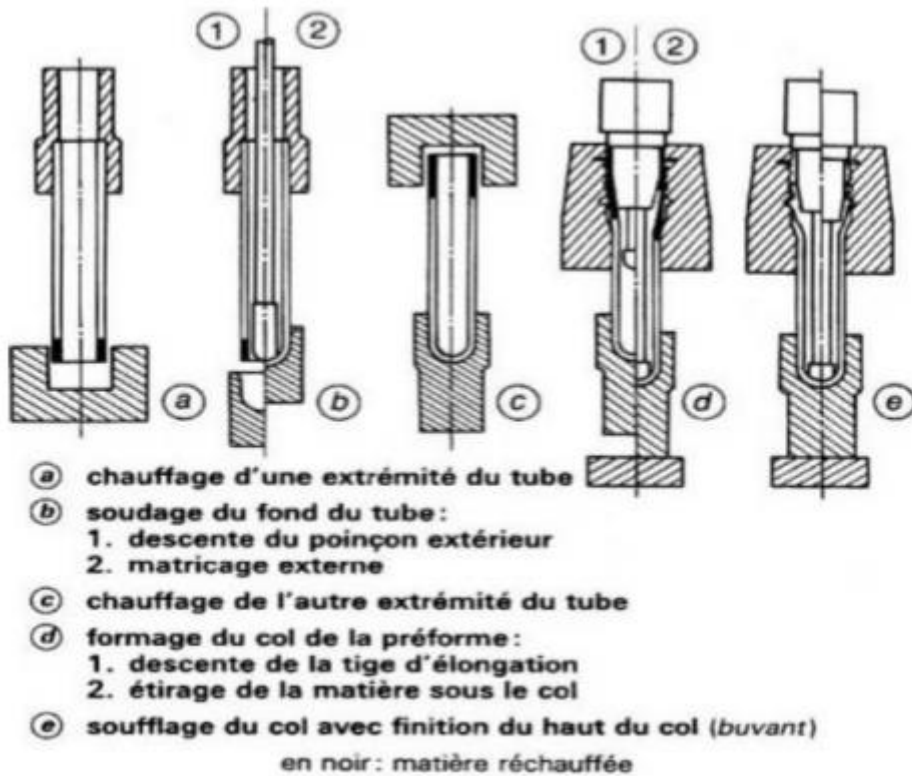


Figure VI.4: Obtention d'une préforme à partir d'un tube



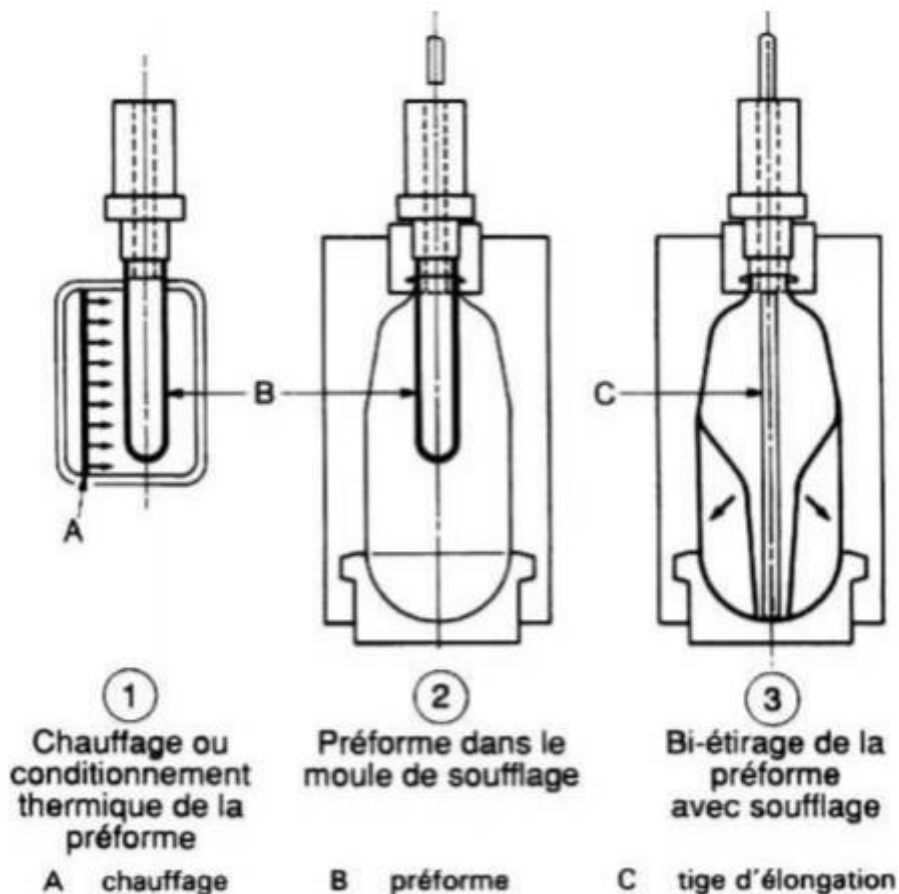


Figure VI.5 : Soufflage avec bi-étirage

#### VI.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.

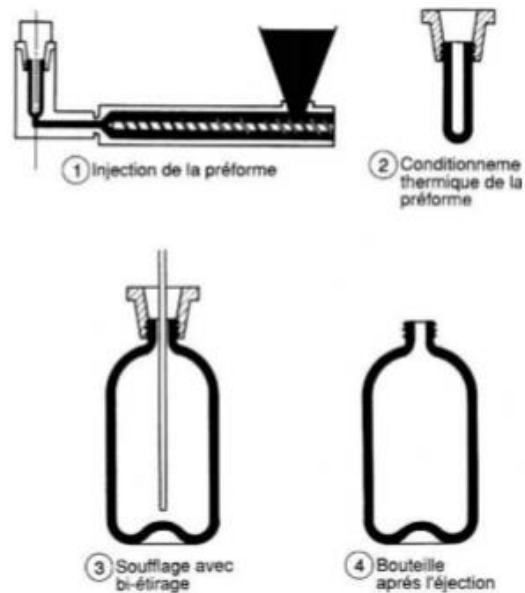
##### ❖ Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

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

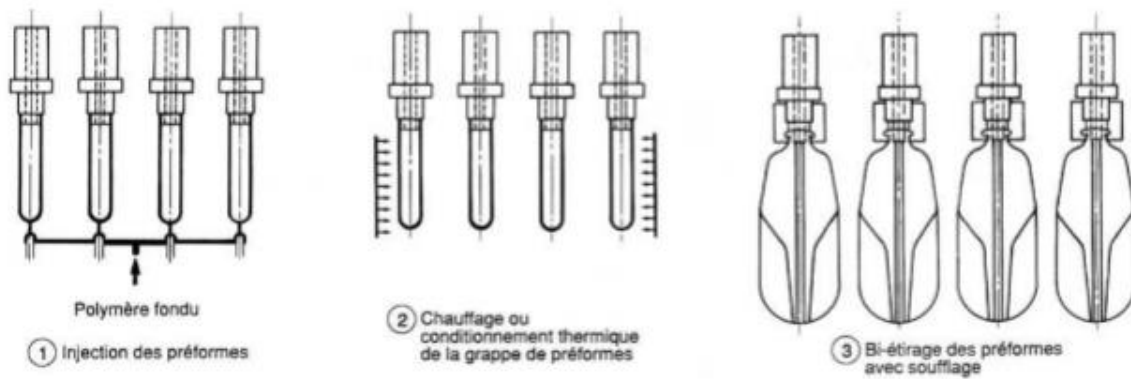
- l'injection de la préforme puis, après conditionnement thermique, le soufflage avec bi-étirage du corps creux final (figure VII.6) ;
- l'injection de la préforme, puis, au poste de conditionnement thermique, le soufflage intermédiaire d'une préforme plus grande et préconditionnée ; enfin, on procède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

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

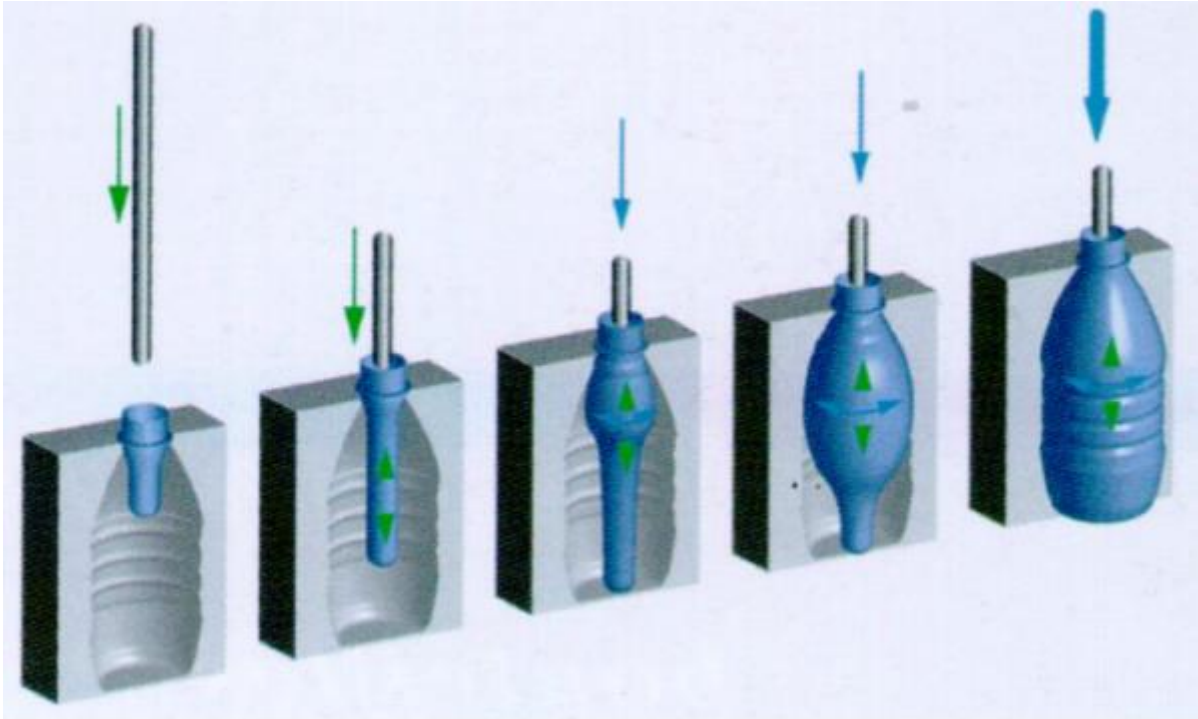
Dans ce procédé en deux étapes, on réalise l'injection d'un produit semi-ouvré : la préforme, puis la reprise de cette préforme par soufflage avec bi-étirage jusqu'à l'obtention de l'objet final : le corps creux.



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



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



### VI.7. Extrusion gonflage ((gaine)

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

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.). En 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.

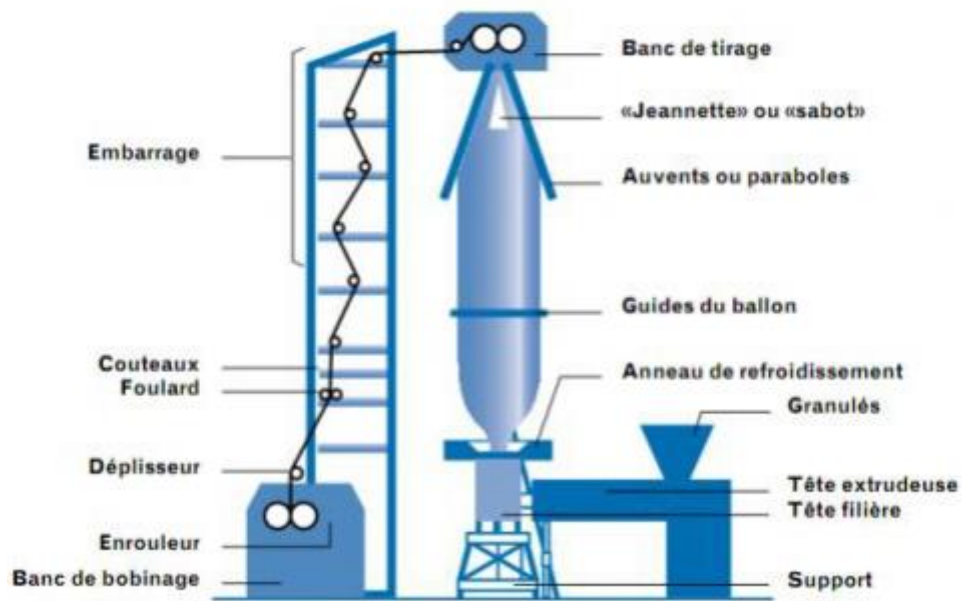


Figure VI.8: Extrusion gonflage

#### ❖ La filière d'extrusion gonflage

Dans le cas le plus général, l'alimentation d'une filière fait un angle de  $90^\circ$  avec la direction de la sortie extrudeuse. La tête 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 structuraux 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 VI.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).

## VII- Moulage par compression

### VII.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.**

### VII.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.



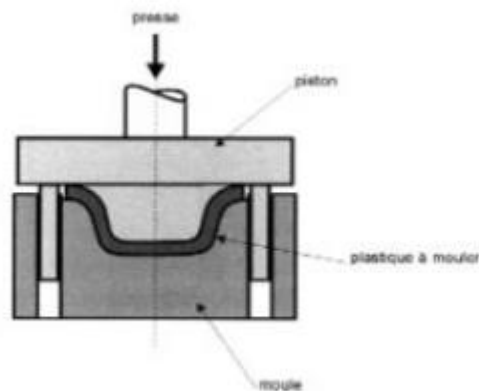


Figure VII.1: Moulage par compression

### VII.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.**

### VII.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.

## VII.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.

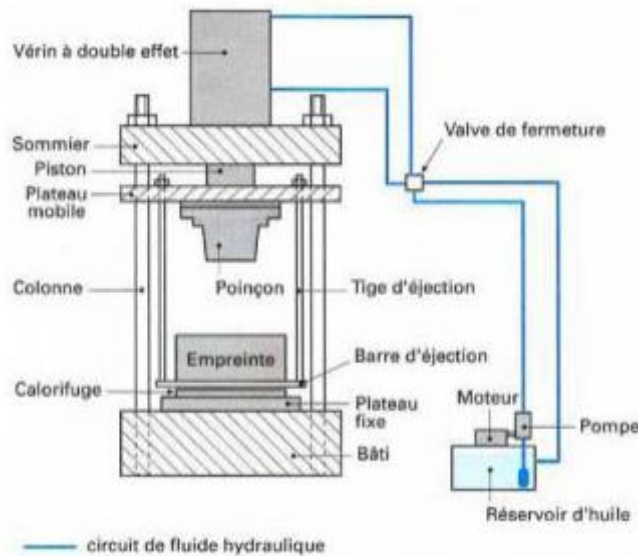
### ❖ Inconvénients

- ✓ 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.

## VII.6. Caractéristiques des presses de compression

Elles sont principalement constituées de deux plateaux : l'un fixe, l'autre mobile (figure VII.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 VII.2:** Presse de compression

### VIII. Conclusion

Plusieurs étapes sont nécessaires pour obtenir les molécules indispensables à la réalisation des plastiques (monomères). Ensuite, ceux-ci sont combinés, par l'intermédiaire de réactions chimiques (polymérisations), afin de fabriquer les polymères. On constate alors que les plastiques se scindent en trois familles : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères qui ont des propriétés différentes et sur lesquelles vont jouer les fabricants pour obtenir des objets techniques. Ces plastiques sont de plus en plus utilisés dans divers domaines comme l'automobile, la santé, les loisirs, les BTP afin d'améliorer nos conditions de vie et les performances des objets créés. Cependant, les déchets plastiques ainsi produits sont néfastes pour l'environnement (faune et flore). Il faut donc trouver des solutions comme le recyclage, l'utilisation de plastiques recyclés et développer des solutions pour remplacer le plastique. Notre rôle est donc essentiel et nos mentalités doivent changer pour notre avenir.