

## Généralités

### I.1 HISTORIQUE

On peut considérer que la science des polymères a véritablement commencé dans les années vingt, grâce au chimiste allemand Hermand Staudinger qui fut le premier à imaginer le concept de macromolécule.

La deuxième grande découverte dans le domaine de cette science est due au savant américain Wallas Hum Carothers qui, à la fin des années vingt (brevet déposé en 1931), synthétisa pour la première fois une de ces fameuses macromolécules (le polymère).

Le physicien et chimiste français Henri Victor Regnault observe la formation d'une substance solide dans un récipient rempli de chlorure de vinyle exposé à la lumière (1838).

L'inventeur américain Charles Goodyear découvre le procédé de réticulation du caoutchouc au moyen du soufre (brevet déposé en 1839).

Poursuivant les travaux du français Henri Braconnot (1832), le chimiste allemand Christiane freidrich Schonbein met au point la fabrication du nitrate de cellulose(1846).[6]

### I.2 STRUCTURE DES POLYMERES:[9]

Les différents types de macromolécules sont :

#### a) Macromolécules linéaire:

Dans ce type il y a trois parties:

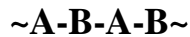
- **Homopolymères:**

Le polyéthylène, le polychloryre de vinyle et beaucoup d'autre matières plastiques industrielles sont constitués de macromolécules, (molécules géantes), pouvant être considérée en première approximation comme étant des enchaînements linéaires de motifs structuraux identiques correspondant à la petite molécule (monomère) utilisée pour leur synthèse

A est le motif monomère :



En polycondensation on utilise fréquemment deux molécules différents A et B pour la synthèse, et l'on obtient un enchaînement régulier alterné des deux motifs.



- **Copolymères**

La copolymérisation ou la copolycondensation, qui permettent d'incorporer plusieurs motifs différents dans la chaîne, peuvent conduire à une très grande variété de structures, les cas extrêmes étant présentés par:

**le copolymère alterné:**



**le copolymère séquence:**



**les copolymères statiques:**



**b) Macromolécules ramifiées:**

- **Homopolymères**

Dans certain cas, les méthodes industrielles de synthèses ne conduisant pas à des macromolécules rigoureuses en linéaire

On observe la formation de ramification courte et longue.

Ces dernières peuvent jouer un rôle important au niveau des propriétés rhéologiques

- **Copolymères:**

A ramification est délibérément recherchée dans certains copolymères sur tronc constitué par une macromolécule linéaire, on greffe des chaînes plus ou moins longues, les sites de ramification étant plus ou moins espacés

- **Polymère à cycle dans la chaîne:**

Dans certains cas, le squelette des macromolécules est constitué de succession du cycle juxtaposés (structure en échelle)

Ce types de compromis est fréquent dans le domaine des polymères thermostables.

### **I.3.MOULAGE DES THERMOPLASTIQUES :**

#### ***I.3.1 Principe:***

Le moulage permet de fabriquer un objet immédiatement utilisable, l'organe central de la machine est le moule contenant l'empreinte en creux de la pièce à réaliser . la machine doit permettre de remplir, cette forme avec la matière plastique choisie par l'utilisateur.

La matière ne peut remplir, l'empreinte que sous forme fondue. Pour y parvenir, la matière doit être chauffée à une température supérieure au point de transition vitreuse ou au point de fusion.

Sous cette forme, la matière peut être contrainte de remplir le moule par plusieurs techniques au procédés dont le moulage par injection qui est le sujet de notre étude.

#### **a- Moulage par injection:**

Le procédé de moulage par injection permet de produire à grande cadence, avec une grande régularité, et de façon automatique, des pièces de formes complexes, dont la masse varie de l'ordre du gramme jusqu'à plusieurs kilogrammes. On injecte selon des techniques présentant de grandes similitudes, des polymères thermoplastiques, des polymères thermodurcissables, et des élastomères. Les différences principales concernent les températures : le polymère thermoplastique « chaud » (entre 200 et 300 °C le plus souvent) est injecté dans un moule « froid » (entre 20 et 80 °C), tandis que les thermodurcissables et les élasto-mères « froids » (20 à 80 °C) sont injectés dans un moule « chaud » (environ 200 °C), qui va activer la réaction de polymérisation ou de vulcanisation.[23]

La machine d'injection est capable de faire entrer, sous forte pression, la matière fondue dans l'empreinte. Un tel matériel possède:

- Un dispositif pour faire "fondre" la matière.
- Un système de piston pour l'introduire dans le moule (sous pression).
- Un système de refroidissement du moule pour "solidifier" la matière et permettre le démoulage de l'objet.

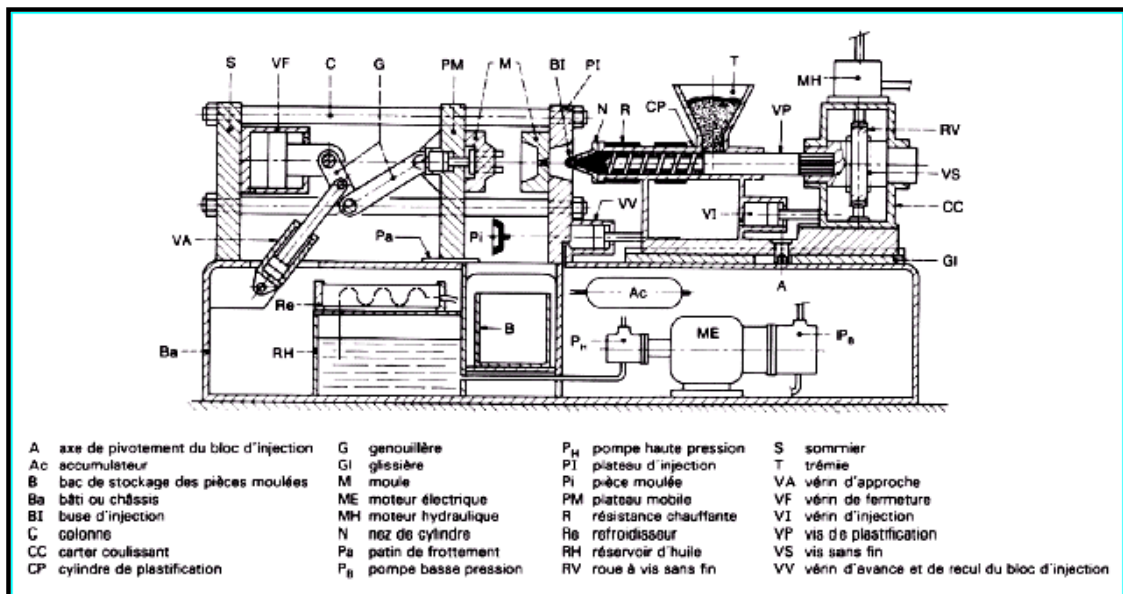


Fig.I.1. Presse à injecter les thermoplastiques[24]

La figure(I.1) présente le principe général et les principaux éléments d'une presse à injection.

Les différences entre ces machines sont fonction des choix des fonctions principales:

- le principe de plastification,
- le dispositif d'injection,
- le fonctionnement de la fermeture du moule.

- **Plastification et injection:**

Un dispositif remplit les deux fonctions de plastification et d'injection en un seul mécanisme. il s'agit du système vis-piston.

La vis tourne et plastifie la matière comme dans une extrudeuse Figure (I.1). Les granules sont pris au niveau de la trémie, chauffés, fondus, et homogénéisés. La matière est acheminée vers la partie avant le dispositif pour stocker la quantité de matière nécessaire à la fabrication d'une pièce.

Le dispositif Vis-Piston peut reculer dans le fourreau de la machine. Quand la quantité voulue de matière est plastifiée, la vis arrête de tourner et de reculer.

Pour injecter, un vérin hydraulique pousse la vis, celle-ci plaque le clapet sur son siège. La matière ne peut plus refluer vers l'arrière. L'ensemble injecte sous pression la matière dans le moule.

- **Compactage :**

L'empreinte étant remplie, la matière est alors compactée à pression constante, ce qui a pour effet de compenser le retrait volumique qui commence à se manifester dans le moule.

- **Refroidissement :**

Le seuil d'injection étant figé, la pression de maintien n'est plus transmise, ainsi le retrait n'est plus compensé. La matière se rétracte dans le moule et la pièce se déforme après l'éjection.

- **Cycle de moulage :**

La figure (I.2) représente les six phases essentielles du procédé de moulage constituant le cycle de fabrication.

- **Démoulage :** le moule occupe la position de fin d'ouverture qui assure à la pièce l'espace libre pour être éjectée.

- **Fermeture du moule** : ce mouvement commence avec une vitesse lente puis rapide, et se termine de nouveau lentement pour éviter le choc entre les plans de joint et pour donner le temps d'agir au système de sécurité.
- **Verrouillage** : si le système de sécurité n'a décelé aucune anomalie, la commande peut appliquer la force de fermeture. Selon le système de fermeture, la force est créée par le produit de la surface et de la pression, ou par la mise en contrainte des colonnes.
- **Injection** : c'est la phase de remplissage des l'empreintes avec la matière plastifiée et le maintien sous pression pour compenser les retraits.
- **Refroidissement** : il a lieu le temps nécessaire pour que le plastique se solidifie dans le moule. Dans la pratique, on plastifie souvent, pendant ce temps, la matière pour le prochain cycle. De plus, si nécessaire au cours de ce temps, on peut séparer la buse du cylindre d'injection et le moule.
- **Ouverture du moule** : le plastique étant suffisamment refroidi pour pouvoir être démoulé, la partie mobile du moule s'écarte de la partie fixe.[24]

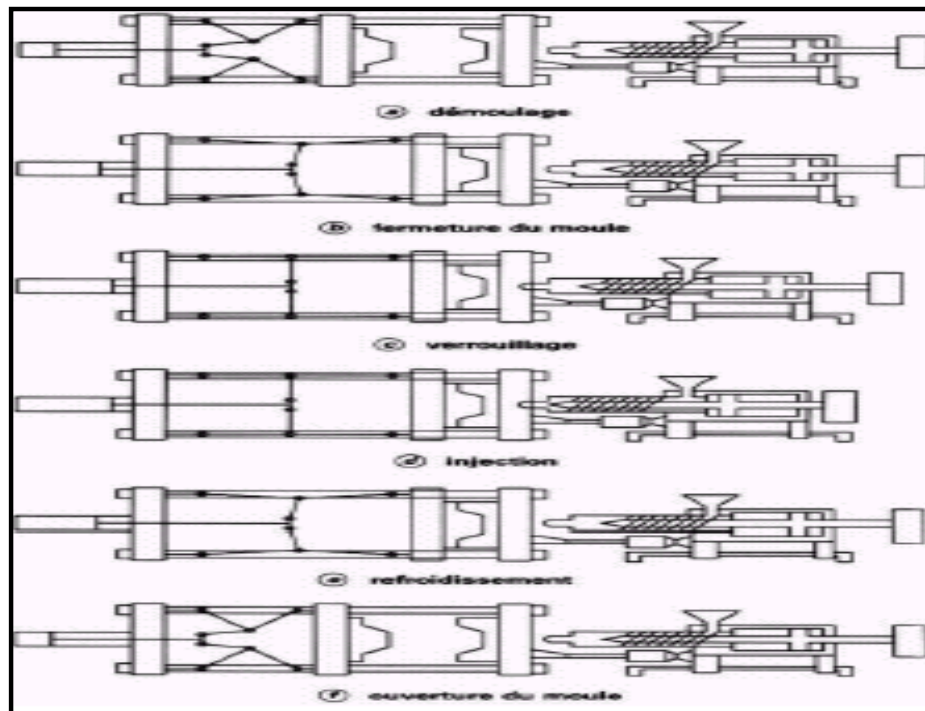
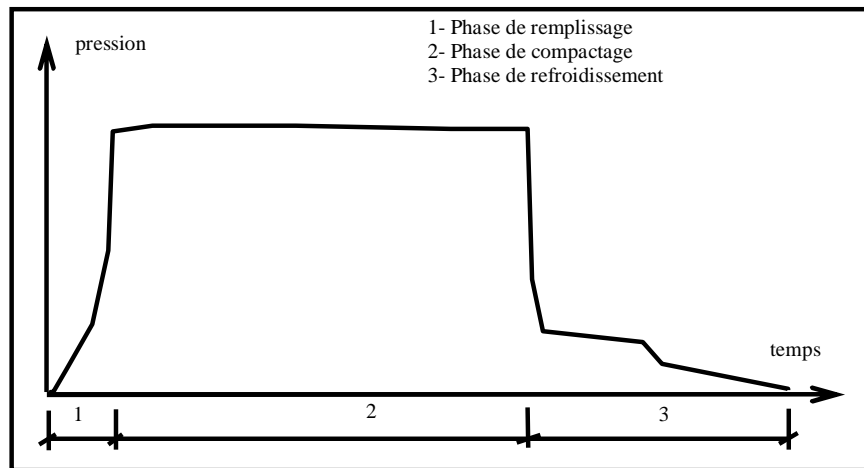


Fig.I.2.Cycle de moulage [24]

Ainsi le cycle de moulage par injection est souvent décomposé en trois phases dans le temps ( figure (I.3)).

- Phase de remplissage
- Phase de compactage
- Phase de refroidissement



**Fig.I.3.** Cycle de moulage

### ***I.3 2.Description de la phase d'injection :***

#### ***I.3.2.1.Généralités :***

C'est phase la plus complexe du procédé : celle de l'injection. Pour pouvoir injecter le plastique dans le moule, nous devons avoir : un moule fermé avec une force de fermeture connue, une unité d'injection permettant d'injecter le plastique dans le moule sous une pression élevée, une buse d'injection pour relier le cylindre d'injection au moule, un canal (ou des canaux) d'alimentation et un (ou des) seuil(s) d'injection par lesquels le polymère passe pour remplir la (ou les) cavité(s) du moule, selon que le moule a une ou plusieurs empreintes. Comme cette courte description le montre, la phase d'injection se réalise dans un cadre bien défini, qu'il faut connaître dans le moindre détail car la qualité de la pièce en dépend directement.

Or, des pièces de cette qualité ne peuvent pas être fabriquées si nous ne maîtrisons pas suffisamment en détail la phase d'injection.

Les considérations rhéologiques qui nous intéressent sont celles qui traitent de l'écoulement visqueux dans une section relativement faible de 0,5 à 5 mm d'épaisseur. En effet le plastique fondu refoulé par la vis-piston arrivant dans l'empreinte, via le nez du cylindre, le canal d'alimentation et le seuil d'injection, n'a pour limites que les deux parois du moule. Quand le plastique commence à remplir l'empreinte, juste après avoir passé le seuil d'injection, il forme une petite bulle. La peau extérieure du polymère (de la bulle), en contact avec le moule froid, gèle très rapidement, tandis que l'intérieur reste liquide. Au fur et à mesure que la vis-piston pousse, la matière passe entre les peaux froides et pousse ce qui est déjà présent vers l'avant et vers les parois de la cavité.

La couche gelée est formée par extension de la bulle sur les parois froides de la cavité et, de ce fait, elle n'est pas soumise à des contraintes de cisaillement importantes donc elle a un taux d'orientation moléculaire réduit. Une fois figées, les macromolécules ne peuvent pas s'orienter davantage. La pièce moulée a donc, sur les faces extérieures, un taux d'orientation faible.

Mais regardons maintenant ce qui se passe à l'intérieur du flux de matière. Le plastique chaud s'écoule continuellement, apportant de la matière chaude et cela engendre, par frottement, de la chaleur supplémentaire. Mais, en même temps, le plastique perd de la chaleur par conduction dans le moule.

Initialement, la couche froide est très mince, la chaleur s'évacue rapidement et il en résulte un refroidissement du plastique; l'épaisseur de la couche gelée grandit et ralentit l'évacuation de la chaleur. Au bout d'un certain temps, l'épaisseur de la couche figée sera telle que la quantité de chaleur perdue par conduction sera égale à celle apportée par le frottement entre les différentes couches de viscosité de la matière. L'équilibre thermique est réalisé.



Lors de l'écoulement, le plastique subit deux types de contraintes :

- le premier est la contrainte de cisaillement qui force les molécules à s'orienter elles-mêmes dans la direction générale de l'écoulement ;
- le second est le taux de cisaillement qui est le rapport des vitesses de glissement entre les différentes couches.

Les contraintes de cisaillement varient d'un maximum à l'extérieur jusqu'à zéro au centre de l'écoulement. Le taux de cisaillement est nul à la surface, passe par un maximum à la frontière interne de la couche gelée, et chute à zéro au centre de l'écoulement.

Si l'on stoppe l'écoulement et qu'on laisse le plastique se refroidir très lentement, l'orientation due aux contraintes de cisaillement se relâchera et la pièce aura un très bas niveau résiduel d'orientation. Autrement dit, si l'on refroidit la pièce rapidement sous contraintes, l'orientation résiduelle sera importante. La partie interne de la couche froide est sujette à un niveau de contraintes très important. Quand l'écoulement s'arrête, la matière se fige, bloquant les molécules telles quelles, dont l'orientation est très marquée.

Ce modèle d'orientation permet d'évaluer les niveaux de contraintes résiduelles dans la pièce et d'aborder les paramètres de moulage, c'est-à-dire les grandeurs physiques (vitesse, pression, longueur, température) que l'on impose par des organes de commande dont les presses sont munies lors de leur construction.[22]

### **I.3.2.2 Mise en œuvre de la phase d'injection**

Les considérations précédentes, même sommaires, nous montrent qu'au cours du remplissage du moule il se passe des phénomènes importants pour la qualité de la pièce et trop complexes pour vouloir les résoudre avec des moyens simples. Si nous regardons maintenant la part qu'occupent les équipements de réglage des paramètres sur une presse en termes de coût, nous voyons qu'il faut les rentabiliser au mieux.

Avant d'aborder la description proprement dite de la phase d'injection, il nous semble indispensable de rappeler sa définition de base pour qu'elle nous serve de guide : dans le procédé de transformation des matières plastiques par injection, la **phase d'injection** consiste à établir les paramètres physiques suivants :

- température du moule.
- température de la matière.
- vitesse de propagation de la matière en fonction de la course de la vis-piston.
- pression sur la matière en fonction du temps.

Les valeurs de ces paramètres doivent être établies pour que la matière, lors du remplissage du moule, ait un comportement optimal en fonction de la forme de l'empreinte, garantissant ainsi la qualité de la pièce.

La première opération consiste à mettre le moule à la bonne température. Pour des moules qui fabriquent des pièces techniques, cette température varie entre 70 et 120 °C (exemple : polyamide, polycarbonate, ABS, polyoxyméthylène).

Pour des articles destinés à l'emballage ou à des tâches ménagères, ni la stabilité dimensionnelle, ni le comportement à la fatigue ne présentent des exigences très strictes. On cherche un prix de fabrication faible, donc des cadences élevées; la température de ces moules peut varier entre 7 et 40 °C.[22]

La température de la matière varie selon sa nature. En règle générale, on retient que les matières amorphes ont une fourchette de réglage plus large que celle des polymères cristallins; les fabricants donnent toujours sur ce plan tous les renseignements.

La phase de remplissage elle-même comporte trois étapes :

- remplissage.
- pressurisation.
- compensation.

Le **remplissage** est la phase dynamique de l'injection. L'huile de la commande hydraulique arrive dans le vérin d'injection et, de ce fait, la vis-piston se déplace vers l'avant. Le clapet de l'embout de la vis se ferme (la bague s'ajuste sur son siège en arrière) et le plastique, sous l'effet du mouvement, se comprime et monte en pression.

Quand la pression arrive à la valeur qui permet de vaincre la résistance de la matière dans le nez du cylindre, le plastique pénètre dans le moule, passe par le canal d'alimentation (carotte) et commence à remplir l'empreinte par son seuil. La vitesse de propagation du plastique dans l'empreinte sera directement liée à la vitesse du déplacement de la vis-piston. Le paramètre principal est donc la vitesse de déplacement de la vis-piston exprimée en mm/s, que l'on obtient à partir du débit d'huile exprimé en cm<sup>3</sup>/s. Notons que, pendant cette **phase de travail**, la pression de commande aura une consigne de valeur maximale afin de disposer de la force nécessaire pour vaincre les pertes de charge de l'écoulement, au fur et à mesure que le plastique avance dans l'empreinte.

Vers la fin du remplissage du moule, quand les pertes de charge des écoulements du plastique deviennent importantes, approchant de 70 % de la pression disponible, l'injection a atteint sa **phase de pressurisation**. Dans cette phase de travail, la pression hydraulique de commande provoque l'ouverture de la soupape de sûreté qui fait retourner au réservoir une partie du débit hydraulique. Cette perte de débit ralentit la vitesse de déplacement de la vis-piston jusqu'à son arrêt total qui signifie que l'empreinte est remplie.

Le moule étant rempli, la **phase dite de compensation** commence et il se produit alors la commutation.

En fin de remplissage, le plastique occupe le volume total de l'empreinte, mais la matière continue à s'écouler avec un très faible débit associé à la compressibilité du polymère à la température considérée. Le plastique, à ce stade, est à une température élevée. Sa masse volumique croît avec la pression que certains auteurs appellent **pression de bourrage**.

Par conduction, le plastique perd sa chaleur, le refroidissement n'entraîne pas de modification de la masse volumique tant que la pression interne existe, ce qui explique que la pression exercée dans le moule est beaucoup plus élevée que la pression de remplissage.

Il faut, pour cela, qu'une certaine quantité de matière soit maintenue sous pression à l'extrémité du cylindre d'injection, que l'on appelle *matelas*. Quand le plastique, sous l'effet du refroidissement, atteint un état de viscosité tel que la pression de compensation baisse, seule la phase de refroidissement continue jusqu'à ce que l'objet atteigne la température qui permet de le démouler. L'injection est terminée.[23]