

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université M'Hamad Bougara de Boumerdes
Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés

POLYCOPIÉ DE COURS

Mise en œuvre des polymères

(Unité Fondamentale-- Domaine Sciences et Technologie — Master LMD)

Présenté par :

Dr. BOUMERDASSI Karima

Maitre de Conférence " B " UMBB

Année Universitaire : 2023/2024

Sommaire

• Chapitre I : Introduction	1
I. Influence de la structure des polymères sur leur transformation	1
I.1. Structure moléculaire des polymères solides	1
I.2. Comportement vis-à-vis d'une élévation de la température	1
I.3. Fusion et Transition vitreuse	2
I.4. Transformation des Polymères Thermoplastiques et Thermodurcissables	3
• Chapitre II : Stockage et prétraitement des polymères	7
II.1. Introduction	7
II.2. Stockage des polymères	7
II.2. Prétraitement des polymères	9
• Chapitre III : Mise en œuvre des système liquides	13
III.1. Introduction	13
III.2. Procédés de moulage par trempage	13
III.3. Enduction	15
III.4. Imprégnation	15
III.5. Peintures, vernis et revêtements	16
III.6. Dépôt de film	17
• Chapitre IV : Transformation des polymères à l'états plastique	22
IV.1. Procédés d'extrusion et de moulage	22
IV.2. L'extrusion soufflage	30
IV.3. Moulage par injection	33

IV.4. Moulage par compression	36
IV.5. Calandrage	41
• Chapitre V : Transformation des polymères à l'état viscoélastique	45
V.1. Thermoformage	45
V.2. L'extrusion soufflage	47
V.3. L'injection-soufflage	53
V.4. Comparaison de l'injection-soufflage et de l'extrusion-soufflage	56
• Chapitre VI : Application de la rhéologie a la conception	58
VI.1. Filières d'extrusion	58
VI. 2. Fenêtres des températures de fusion et d'extrusionde différents polymères	58
VI.3. Injection	59
• Chapitre VII : Régénération des déchets des polymères	62
VII.1. Introduction	62
VII.2. Sources des déchets plastiques	62
VII.3. Différentes méthodes de valorisation des déchets de matières plastiques	62
VII.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères	65
• Références bibliographiques	66

Chapitre I : Introduction

I. Influence de la structure des polymères sur leur transformation

I.1. Structure moléculaire des polymères solides

C'est dans la structure macromoléculaire en chaîne elle-même que réside l'origine des propriétés spécifiques des substances macromoléculaires, et c'est à cette nature moléculaire que toute interprétation de propriété spécifique des polymères en général, devra en définitive être ramenée.

Les caractères particuliers présentés par un composé macromoléculaire déterminé seront fixés par les détails supplémentaires qui définissent sa structure : propriétés de la chaîne à l'échelle moléculaire, nature et nombre des interactions entre chaînes. Existence de ramification ect...

Les diverses structures possibles de polymères solides se ramènent, à l'échelle moléculaire, à un petit nombre de types assez bien définissables, que nous décrirons à présent.

- a) **Structure amorphe** : Structure complètement désordonnée due à la faiblesse ou l'absence de liaisons pontales
- b) **Structure cristalline** : qui possède un ordre à longue distance (rare pour un polymère).
- c) **Structure semi-cristalline** : zones amorphes et cristallines, appelés cristallites, structure en lamelle.

I.2. Comportement vis-à-vis d'une élévation de la température

On distingue trois types de polymères :

1. Les Thermodurcissables : l'élévation de la température ne provoque pas de fusion, le polymère durcit puis on assiste à une dégradation du polymère (ce sont souvent les polymères réticulés).

2. Les Thermoplastiques : l'élévation de la température provoque un ramollissement, le polymère devient alors malléable et peut être moulé, ce phénomène peut être inversé par abaissement de la température. Ce sont souvent des polymères linéaires ou à branches de faible taille.

3. Les élastomères (caoutchoucs) : ils correspondent à des polymères thermoplastiques présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation.

- Chaîne longue et souple, faiblement réticulé
- Absence de cristallinité
- Déformation réversible sous l'action mécanique
- Base température de transition vitreuse

I.3. Fusion et Transition vitreuse

I.3.1. Fusion : La température de fusion (T_f) d'un polymère est la température à laquelle a lieu son passage de l'état caoutchouteux à l'état liquide, visqueux en pratique. Il n'y a fusion que pour les polymères semi-cristallins, seule la partie cristalline est concernée.

I.3.1.1. Paramètres jouant sur la température de fusion (T_f)

- Épaisseur des lamelles cristallines : T_f augmente avec leur épaisseur ;
- Présence d'impuretés ;
- Présence de plastifiants

I.3.2. Transition vitreuse (T_g) : Pour les polymères, il existe une température à partir de laquelle le polymère peut commencer à s'écouler. Appelée température de transition vitreuse (T_g). Ceci correspond à la température de passage de l'état caoutchouteux à un état vitreux.

I.3.2.1. Influence de la structure du polymère sur la T_g

- **Rigidité de la chaîne principale**

Elle entraîne une augmentation de la T_g .

- **Interactions inter et intramoléculaires**

Elles donnent une structure plus cohésive, et la T_g augmente. Elle peut atteindre 300 à 400 °C pour les polymères qui possèdent des liaisons ioniques inter- chaînes très fortes.

- **Facteurs géométriques**

Par exemple, la valeur de T_g est ~ -110 °C pour le polyéthylène, contre ~ 100 °C pour le polystyrène. L'encombrement stérique important du groupe phényle a pour conséquence une rotation relativement difficile des chaînes de PS.

- **Taille des substituants**

Lorsqu'ils sont volumineux, l'espace entre les chaînes augmente, le volume libre aussi et la T_g diminue. Ainsi, $T_s \sim -20\text{ °C}$ pour le polypropylène, contre $\sim -40\text{ °C}$ pour le polypentène.

- **Ramifications et réticulations**

On doit prendre en compte l'évolution du nombre de bouts de chaînes qui abaissent la T_g , et la présence de points de ramifications (cohésion) qui l'augmente. Pour la ramification, le 1^{er} effet l'emporte, mais pour la réticulation, c'est le 2^{em} effet qui est prédominant. On peut ainsi vulcaniser un élastomère (le réticuler) pour augmenter sa T_g .

- **Cristallinité**

En utilisant une méthode de synthèse adéquate, on peut obtenir parfois un certain taux de cristallinité, ce qui renforce la cohésion du matériau et donc augmente sa T_g .

- **Copolymérisation**

Selon la miscibilité, on peut avoir de 1 à 3 T_g différentes : celles correspondant aux homopolymères et celle de la phase miscible.

- **Plastification**

L'ajout de plastifiants est un moyen d'abaisser la T_g : les petites molécules mobiles s'insèrent entre les chaînes moléculaires et diminuent les interactions.

I.4. Transformation des Polymères Thermoplastiques et Thermodurcissables

I.4.1. Transformation des Thermoplastiques :

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_f) (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.

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 bi-étirée, 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.

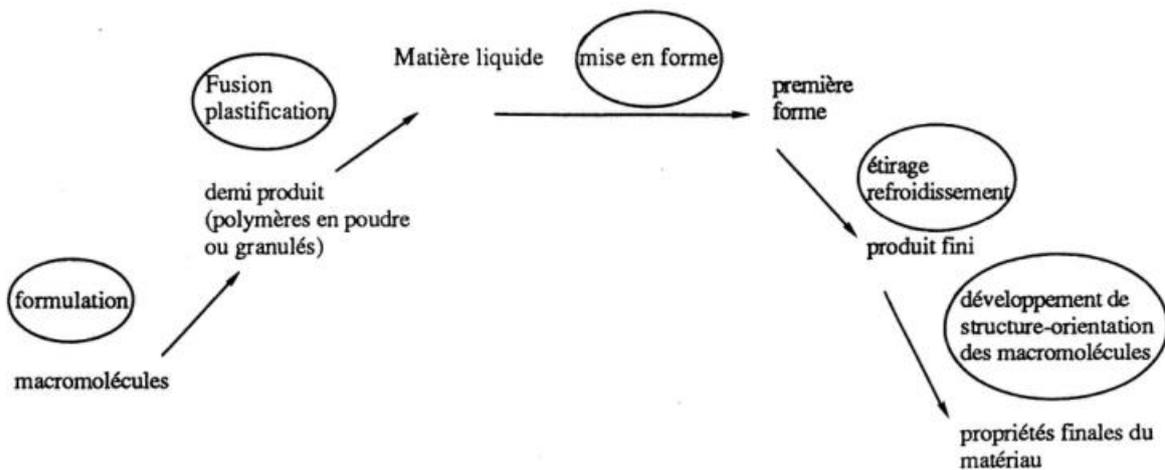


Figure I.1. Schéma général de la mise en œuvre des polymères.

I.4.2. Transformation des Thermodurcissables

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.

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 : η (Pa·s): Viscosité du polymère,

V_F (m·s⁻¹): Vitesse de la vis.

λ (W·m⁻¹·°C⁻¹) : Conductivité thermique du polymère,

T_F (°C): Température du fourreau,

\bar{T} (°C): Température moyenne du polymère.

Le volume V (m³) déplacé à chaque tour de vis est obtenu en multipliant la section de l'anneau de matière par l'avance par tour, soit :

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

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

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

Pour obtenir le débit-masse (kg/h), il suffit de multiplier le débit volume (m³/h) par la masse volumique granulaire de la matière considérée :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = 60 \cdot \rho \cdot V \cdot N \quad (I.4)$$

Avec ρ (kg·m⁻³) masse volumique du polymère.

Chapitre II : Stockage et prétraitement des polymères

II.1. Introduction

Les polymères sont des matériaux essentiels dans de nombreux domaines tels que l'industrie, l'emballage, l'électronique et l'automobile. Ils sont utilisés pour fabriquer une vaste gamme de produits, allant des emballages en plastique aux composants électroniques avancés. Cependant, pour garantir leur qualité et leurs performances, il est crucial de prendre en compte le stockage adéquat et le prétraitement des polymères.

Le stockage et le prétraitement des polymères jouent un rôle clé dans la préservation de leurs propriétés physiques et chimiques, ainsi que dans la prévention de la dégradation. Les polymères sont souvent sensibles à des facteurs tels que la température, l'humidité, la lumière et la contamination. Des conditions de stockage inappropriées peuvent entraîner des altérations de leurs caractéristiques, réduisant ainsi leur durée de vie et leur qualité. De plus, le prétraitement des polymères est essentiel pour les préparer en vue de leur utilisation ultérieure dans divers procédés de fabrication.

II.2. Stockage des polymères

II.2.1. Définition de stockage : Le stockage des polymères fait référence à la manière dont les polymères sont stockés avant leur utilisation.

II.2.2. Conditions de stockage optimales

Pour garantir la qualité des polymères, il est essentiel de les stocker dans des conditions appropriées. Les principaux facteurs à prendre en compte sont :

1. Température : Les polymères sont sensibles aux variations de température. Il est recommandé de les stocker à des températures contrôlées, généralement entre 20°C et 25°C, afin d'éviter les fluctuations qui pourraient affecter leurs propriétés physiques et chimiques.

2. Humidité : L'humidité peut avoir un impact significatif sur les polymères, en particulier sur ceux qui sont hygroscopiques, c'est-à-dire qui ont la capacité d'absorber l'humidité de l'environnement. Pour minimiser les effets néfastes, il est conseillé de maintenir une faible humidité relative, généralement inférieure à 50 %.

3. Lumière : Certains polymères sont sensibles à la lumière, en particulier aux rayons ultraviolets (UV). L'exposition prolongée à la lumière peut provoquer la dégradation et la décoloration des

polymères. Il est donc préférable de stocker les polymères dans des zones sombres ou de les protéger avec des emballages opaques.

Si les polymères ont été mal stockés et ont subi une dégradation, il peut être difficile de les récupérer. Dans certains cas, il peut être possible de les restaurer en utilisant des additifs ou des traitements spéciaux. Cependant, dans la plupart des cas, il est préférable de les éliminer de manière appropriée et de les remplacer par des polymères neufs et de qualité.

II.2.3. Types de conteneurs de stockage des polymères : Il existe plusieurs types de conteneurs de stockage des polymères, notamment :

1. Les sacs en plastique : ils sont couramment utilisés pour stocker de petites quantités de polymères. Ils sont faciles à manipuler et à stocker, mais ne conviennent pas pour le stockage à long terme.

2. Les fûts en métal : ils sont généralement utilisés pour stocker des quantités plus importantes de polymères. Ils sont robustes et résistants aux chocs, mais peuvent être lourds et difficiles à manipuler.

3. Les conteneurs en vrac : ils sont utilisés pour stocker de grandes quantités de polymères. Ils sont généralement en acier ou en plastique renforcé et sont conçus pour être empilés les uns sur les autres. Ils peuvent être équipés de dispositifs de chargement et de déchargement pour faciliter leur manipulation.

4. Les silos : ils sont utilisés pour le stockage à grande échelle des polymères en vrac. Ils sont généralement en acier et peuvent être équipés de dispositifs de transport pour faciliter le chargement et le déchargement.

5. Les conteneurs isothermes : ils sont utilisés pour stocker des polymères sensibles à la température. Ils sont équipés d'un système de refroidissement ou de chauffage pour maintenir une température constante à l'intérieur du conteneur.

II.2.4. Les conséquences de mal stockage :

Le stockage inapproprié de polymères peut avoir plusieurs conséquences négatives, notamment :

1. Altération des propriétés physiques : Les polymères stockés dans des conditions inappropriées peuvent subir une dégradation physique qui altère leurs propriétés. Par exemple, une exposition prolongée à la chaleur peut entraîner une déformation ou une perte de résistance.

2. Dégradation chimique : Les polymères peuvent également subir une dégradation chimique en raison de l'exposition à des produits chimiques, à la lumière ou à l'humidité. Cela peut entraîner une perte de résistance, une décoloration ou une fragilisation.

3. Pollution de l'environnement : Si les polymères sont stockés de manière inappropriée, ils peuvent fuir et contaminer l'environnement. Cela peut avoir des conséquences négatives sur la santé humaine et la vie marine.

4. Perte de valeur : Si les propriétés des polymères sont altérées en raison d'un stockage inapproprié, leur valeur commerciale peut également diminuer.

5. Risques d'incendie : Certains polymères peuvent être inflammables et doivent être stockés dans des conditions spécifiques pour éviter les risques d'incendie. Un stockage inapproprié peut augmenter le risque d'incendie et de propagation du feu.

II.2. Prétraitement des polymères

II.2.1. Définition de pré-traitement des polymères : Le pré-traitement des polymères est l'ensemble des opérations qui sont réalisées sur les matières premières polymériques avant leur transformation en produits finis. Il comprend notamment le nettoyage, le séchage, la granulation, le mélange, la coloration et la stabilisation des polymères. Le but de ce pré-traitement est d'obtenir des polymères de qualité constante et homogène, afin d'assurer une transformation efficace et fiable en produits finis.

II.2.2. Les opérations de pré-traitement des polymères : Ces opérations visent à préparer la surface du matériau pour les étapes suivantes du processus 4 de fabrication, telles que le revêtement, la peinture, le collage ou le soudage. Les opérations de pré-traitement peuvent inclure :

1. Le décapage : Le décapage des polymères est un processus qui consiste à enlever la couche superficielle d'un polymère pour révéler une surface propre et lisse. Ce processus peut être nécessaire pour préparer la surface d'un polymère pour une application ultérieure, telle que l'adhésion ou la peinture. Il existe plusieurs méthodes de décapage des polymères, notamment :

1.1. Le décapage chimique : cette méthode utilise des produits chimiques pour dissoudre la couche superficielle du polymère. Les produits chimiques utilisés dépendent du type de polymère à décaper.

1.2. Le décapage mécanique : cette méthode utilise des outils mécaniques tels que des brosses, des grattoirs ou des ponceuses pour enlever la couche superficielle du polymère.

1.3. Le décapage thermique : cette méthode utilise la chaleur pour ramollir la couche superficielle du polymère, qui peut ensuite être enlevée à l'aide d'un outil mécanique. Le choix de la méthode de décapage dépend du type de polymère à décaper, de la quantité de matériau à enlever et des exigences de la surface finale. Il est important de prendre des précautions de sécurité appropriées lors du décapage des polymères, notamment en portant des équipements de protection individuelle tels que des gants et des lunettes de sécurité.

2. Le dégraissage : Le dégraissage des polymères est le processus de nettoyage des surfaces des polymères pour éliminer les huiles, les graisses, les solvants et d'autres contaminants. Ce processus est important pour garantir une adhérence optimale des revêtements, des adhésifs et des peintures sur les surfaces des polymères. Il existe plusieurs méthodes pour dégraisser les polymères, notamment :

2.1. Le nettoyage à l'eau et au savon : cette méthode est utilisée pour éliminer les contaminants légers des surfaces des polymères. Elle implique l'utilisation d'eau chaude et de savon pour nettoyer la surface.

2.2. Le nettoyage à l'alcool : cette méthode est utilisée pour éliminer les contaminants plus lourds des surfaces des polymères. Elle implique l'utilisation d'alcool isopropylique pour nettoyer la surface.

2.3. Le nettoyage à la vapeur : cette méthode est utilisée pour éliminer les contaminants lourds des surfaces des polymères. Elle implique l'utilisation d'un nettoyeur à vapeur pour nettoyer la surface.

3.4. Le nettoyage par ultrasons : cette méthode est utilisée pour éliminer les contaminants les plus tenaces des surfaces des polymères. Elle implique l'utilisation d'un bain à ultrasons pour nettoyer la surface.

3. Le rinçage : Le rinçage des polymères est une étape importante dans la fabrication de produits en polymère. Il consiste à éliminer les résidus de produits chimiques ou de solvants qui peuvent

rester sur la surface des polymères après leur fabrication. Le rinçage des polymères peut être effectué à l'aide d'eau ou de solvants spécifiques, en fonction du type de polymère et des produits chimiques utilisés dans le processus de fabrication. Cette étape permet de garantir que les produits finis sont sûrs pour une utilisation et une manipulation ultérieure.

4. Séchage : Certains polymères peuvent absorber l'humidité de l'environnement, ce qui peut entraîner des défauts de fabrication tels que des bulles ou une mauvaise adhésion. Le séchage des polymères permet d'éliminer l'humidité résiduelle et de garantir des propriétés optimales lors des étapes de transformation.

Le séchage des polymères peut être effectué de différentes manières, notamment par convection, par infrarouge, par vide, par dessiccation, par air chaud ou par micro-ondes. Le choix de la méthode de séchage dépend du type de polymère, de la quantité d'humidité à éliminer et des équipements disponibles.

5. Le traitement de conversion : il s'agit d'appliquer un traitement chimique sur la surface du matériau pour améliorer l'adhérence du revêtement ou de la peinture. Le traitement de conversion des polymères est utilisé dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'emballage, l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique, la construction, la santé, etc. Les produits finis peuvent être des pièces moulées, des films, des feuilles, des tubes, des bouteilles, des conteneurs, des panneaux, des composants électroniques, des implants médicaux, etc.

7. Le sablage : Le sablage des polymères est une technique de traitement de surface qui consiste à projeter des particules abrasives sur la surface d'un polymère pour enlever les impuretés, les couches de peinture ou de vernis, ou pour créer une surface rugueuse qui facilite l'adhérence d'une nouvelle couche de peinture ou de vernis.

Le sablage des polymères peut être effectué à l'aide d'un équipement de sablage manuel ou automatique. Les particules abrasives utilisées pour le sablage des polymères peuvent être des billes de verre, des billes de plastique, du sable, de l'oxyde d'aluminium ou du carbure de silicium.

8. Le polissage : Le polissage des polymères est un processus qui consiste à améliorer la surface d'un matériau polymère en éliminant les rayures, les imperfections et les défauts de surface. Ce processus est souvent utilisé pour améliorer l'apparence et la fonctionnalité des pièces en polymère, en particulier dans les industries de l'automobile, de l'aérospatiale et de l'électronique.

Le polissage des polymères peut être réalisé à l'aide de différentes techniques, telles que le polissage manuel, le polissage mécanique et le polissage chimique. Le polissage manuel est

généralement effectué à l'aide d'un abrasif fin et d'un tampon de polissage, tandis que le polissage mécanique implique l'utilisation d'une machine de polissage équipée d'un tampon rotatif et d'un abrasif fin. Le polissage chimique utilise des produits chimiques pour dissoudre la surface du polymère et créer une surface lisse. Les avantages du polissage des polymères comprennent une meilleure apparence, une meilleure résistance aux rayures et une meilleure résistance aux produits chimiques. Cependant, le polissage peut également réduire la résistance mécanique du matériau et augmenter sa sensibilité aux rayures et aux dommages.

II.2.3. Les avantages de pré-traitement des polymères : Le pré-traitement des polymères offre plusieurs avantages, notamment :

1. Amélioration de l'adhérence : Le pré-traitement peut améliorer l'adhérence entre les polymères et les revêtements, les encres, les adhésifs, etc. Cela peut améliorer la durabilité et la résistance à l'usure des produits finis.

2. Nettoyage : Le pré-traitement peut éliminer les contaminants et les impuretés de la surface des polymères, ce qui peut améliorer la qualité et la fiabilité des produits finis.

3. Augmentation de la mouillabilité : Le pré-traitement peut améliorer la mouillabilité des polymères, ce qui peut faciliter l'application de revêtements, d'adhésifs, etc.

4. Amélioration de la résistance aux intempéries : Le pré-traitement peut améliorer la résistance des polymères aux intempéries, ce qui peut prolonger leur durée de vie.

5. Réduction de la corrosion : Le pré-traitement peut réduire la corrosion des polymères, ce qui peut améliorer leur durabilité et leur résistance à l'environnement.

6. Amélioration de la qualité de surface : Le pré-traitement peut améliorer la qualité de surface des polymères, ce qui peut améliorer l'apparence et la finition des produits finis.

II.2.4. Les limites de pré-traitement des polymères : Les limites de pré-traitement des polymères dépendent du type de polymère et des propriétés physiques et chimiques qu'il présente. Voici quelques exemples de limites courantes :

1. La température : Certains polymères ne peuvent pas être soumis à des températures élevées sans se dégrader. Par conséquent, le pré-traitement thermique doit être effectué à des températures inférieures à la température de dégradation du polymère.

2. La compatibilité : Certains solvants ou agents de traitement peuvent ne pas être compatibles avec certains polymères, ce qui peut entraîner une dégradation ou une altération des propriétés du matériau.

3. La surface : Certains polymères ont une surface lisse ou hydrophobe qui peut empêcher l'adhérence de revêtements ou d'autres traitements de surface. Dans ce cas, un pré-traitement de surface est nécessaire pour améliorer l'adhérence.

4. La complexité : Certains polymères peuvent être difficiles à traiter en raison de leur complexité chimique ou de leur structure moléculaire. Par exemple, les polymères à chaîne ramifiée peuvent être plus difficiles à traiter que les polymères linéaires.

5. La durabilité : Certains traitements de pré-traitement peuvent ne pas être durables et peuvent se dégrader avec le temps ou sous l'effet de l'exposition à des conditions environnementales défavorables.

En général, le choix du pré-traitement dépendra des propriétés du polymère et des exigences de l'application finale. Il est important de comprendre les limites de chaque méthode de pré-traitement pour choisir la méthode la plus appropriée pour le matériau en question.

Chapitre III : Mise en œuvre des système liquides

III.1. Introduction

Les principaux procédés de fabrication communs aux divers latex et dispersions aqueuses de plastiques et caoutchoucs sont :

- le trempage ;
- l'enduction ;
- l'imprégnation ;
- la peinture et les revêtements ;
- le dépôt de film.

III.2. Procédés de moulage par trempage

Comme son nom l'indique, le moulage par trempage est un procédé de fabrication plastique qui consiste à tremper des moules en métal chauffés dans un liquide PVC appelé plastisol pour former une pièce plastique.

Le liquide peut être soit chauffé soit à température ambiante. La pièce est ensuite refroidie, drainée, solidifiée et retirée de son moule pour réaliser le produit fini. Les moules peuvent être immergés plusieurs fois afin de présenter l'épaisseur souhaitée.

Le moulage par trempage permet de produire des pièces à un coût très inférieur à celui du moulage par injection et de manière accélérée. Ce moulage convient à des prototypes aux cycles courts, mais également aux ordres de production élevée. Le plastisol est un matériau abordable disponible dans une large gamme de couleurs personnalisée et standard. De plus il est ignifuge, résistant aux UV et aux moisissures, mais aussi aux rayures et à l'abrasion. Outre le plastisol, les matériaux de moulage par trempage comprennent également le latex, le néoprène, les polyuréthanes, les silicones et l'époxy. La durée du processus de production d'une pièce et la difficulté à contrôler l'épaisseur restent les inconvénients principaux de cette méthode.

Cependant, le moulage par trempage offre de nombreuses possibilités et inclut des applications courantes telles que des bouchons et des capuchons, des protections pour les embouts de pistolet à essence, des gants, des housses de protection pour haches, des supports de prise et bien d'autres éléments.

III.3. Enduction

Pour l'enduction d'objets métalliques ou céramiques tels que des poêles à frire, casseroles, tôles à pâtisserie, par exemple avec du PTFE en dispersion, on dispose de deux procédés différents :

- enduction avec la dispersion de PTFE employée à l'état pur, l'adhérence entre la couche de PTFE et le support étant réalisée exclusivement par ancrage mécanique ;
- enduction avec des dispersions de PTFE après traitement d'adhésion chimique. Les étapes du procédé deviennent : dégraissage, attaque chimique, rinçage, séchage puis enduction. Pour l'enduction de tissus au métier à enduire, le tissu est déroulé en continu et est enduit sur une face avec un latex ou une dispersion convenablement épaissis pour assurer un bon compromis entre pénétration dans le tissu et épaisseur d'enduction. Celle-ci est réglée par l'écartement d'un couteau, ou râcle, par rapport au tissu (figure III.1) ou par la vitesse d'un rouleau encolleur.

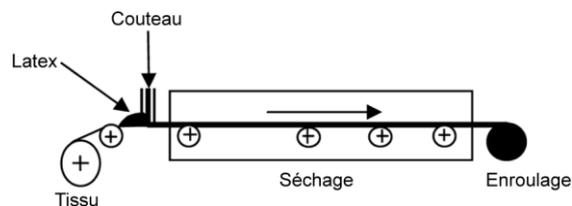


Figure III.1. Schéma d'un métier à enduire avec contrôle du revêtement par râcle.

III.4. Imprégnation

L'imprégnation de filés, cordes, tresses, tissus et toiles (figure III.2) peut se faire par immersion de l'article dans la dispersion, séchage et élimination du mouillant par élévation de la température, calandrage, traitement thermique, par exemple frittage à 380-400 °C pour le PTFE. Pour certains emplois, il peut être indispensable d'effectuer à plusieurs reprises une immersion suivie chaque fois d'un séchage. Toujours dans le cas du PTFE, la fixation de 50 à 60 % du poids du tissu de fibres de verre demande environ cinq imprégnations successives. À partir des tissus de fibres de verre imprégnés d'Hostaflon, on peut fabriquer des stratifiés par pressage de tissu de fibres de verre imprégné, empilé en autant d'épaisseurs que nécessaire pour atteindre l'épaisseur

totale voulue. Un traitement thermique sous presse à environ 380 °C jusqu'à frittage à cœur complète le processus.

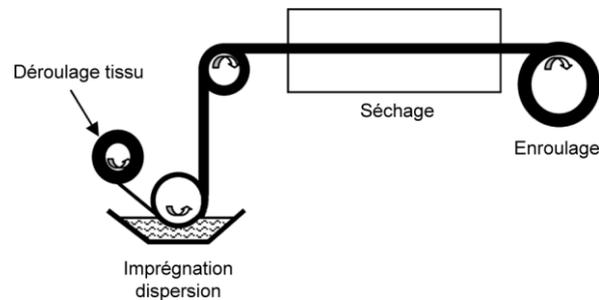


Figure III.2. Principe de l'imprégnation en plein bain.

L'imprégnation de pièces moulées en graphite ou en métaux frittés poreux (bronze ou laiton par exemple) peut se faire par immersion dans un bain de PTFE contenu dans des enceintes sous vide. Après séchage, les pièces sont chauffées progressivement jusqu'à la température de frittage, au moins 380°C. On obtient ainsi des coussinets de roulement autolubrifiants ne nécessitant aucun entretien.

III.5. Peintures, vernis et revêtements

Les dispersions et latex de polymères, filmogènes ou non, servant à la fabrication des peintures aqueuses sont presque toujours formulés avec :

- des pigments et des charges. Les pigments apportent des propriétés optiques (opacité, couleur) ou d'autres propriétés spécifiques (anticorrosion, résistance au feu...). Les charges jouent souvent un rôle de renforcement mécanique, de contrôle du brillant, d'abaissement des coûts... ;
- des additifs fonctionnels divers qui modifient certaines propriétés de la peinture ou en apportent de nouvelles. Ce sont, des tensioactifs, modificateurs de rhéologie, agents de protection, agents de coalescence, anti-mousse, anti-nuançage, absorbeurs d'UV, fongicides, etc. ;
- et, éventuellement, un co-solvant.

Pour former le film de peinture continu et adhérent, il faut, dans un premier temps, provoquer l'évaporation de l'eau, et éventuellement du co-solvant, par un simple mécanisme physique de séchage suivi ou non d'une réaction chimique apportant l'insolubilité du film dans l'eau ou les solvants et le développement des propriétés mécaniques et chimiques optimales du revêtement.

Le séchage par évaporation à l'air à température ambiante est un phénomène purement physique qui entraîne la mise en contact des particules de liant entre elles, puis leur réunion, conduisant à un matériau polymère continu. Le phénomène de coalescence nécessite une certaine température, dite « température minimale de formation du film », caractéristique du polymère. Cette température peut être abaissée par des agents de coalescence qui assurent une plastification temporaire. Le séchage chimique peut être déclenché une fois l'eau évaporée. Cette réaction est destinée à transformer les macromolécules indépendantes du liant en un réseau tridimensionnel qui améliore les propriétés mécaniques, la résistance chimique et la durabilité de la peinture. Les peintures peuvent être appliquées avec du matériel manuel bien connu ou à l'aide de matériels industriels plus spécifiques.

Le matériel pour mise en œuvre manuelle comprend :

- le pinceau, la brosse, le rouleau, qui sont les outils d'application traditionnels de la peinture sur chantier ou en atelier. Ces outils sont bien adaptés à des surfaces petites ou moyennes et ne nécessitent pas d'investissements notables ;
- la pulvérisation pneumatique, électrostatique, sans air..., qui permet des dépôts plus rapides et plus uniformes convenant d'autant mieux à l'industrialisation que l'automatisation est possible. Les investissements, bien qu'un peu plus importants, restent modestes.
- Matériels industriels dédiés : l'application industrielle des peintures peut se faire à l'aide d'installations automatiques plus ou moins sophistiquées qui peuvent conduire à des investissements importants pour l'industrie automobile ou les télécommunications par exemple. Citons, sans prétention d'exhaustivité :
 - trempé : la pièce à peindre est immergée dans la peinture, puis égouttée avant de sécher à l'air ou en étuve ;
 - rideau et flow-coat : la pièce traverse un rideau ou un ensemble de jets mous (flow-coat ou aspersion) de peinture avant d'être égouttée puis séchée ;
 - pistolage : la peinture peut être pulvérisée par des pistolets ou des bols et disques tournants fixes ou montés sur robots multi-axes ;
 - rouleaux : l'application sur des surfaces planes peut se faire avec des techniques proches de l'imprimerie sur tôles (coil coating) ou sur panneaux de bois (machines à rouleau). Le séchage peut se faire :

- dans les conditions ambiantes pour les peintures dites « à séchage à l'air ». Le séchage peut être accéléré par une élévation modérée de la température de l'air, sous l'action d'un rayonnement infrarouge ou encore une ventilation forcée... ;
- par élévation de température pour les peintures dites « à séchage au four ». La température et la durée de séjour de la pièce sont fonctions de la nature de la peinture ;
- par réticulation sous rayonnement (UV, faisceau d'électrons), dans des installations spécifiques, pour les peintures formulées spécialement. Rappelons que les peintures sont soumises à des contraintes réglementaires spécifiques, prévues par les législations nationales, européennes et internationales : « installations classées » pour la fabrication et le stockage, conformité aux directives REACH, ROHS, interdiction de certains composants, limitations de mise sur le marché, mesures d'hygiène et de sécurité, fiches de données de sécurité, étiquetage de sécurité, transport, valorisation des déchets (déchets de produits et déchets d'emballages), contraintes spécifiques (contact avec les denrées alimentaires, norme « jouets », etc.).

III.6. Dépôt de film

Des films, de PTFE par exemple, peuvent être obtenus en coulant une dispersion de PTFE sur une surface lisse comme une tôle métallique polie. Pour la fabrication industrielle des films coulés, on utilise le plus souvent un ruban métallique continu à surface nickelée ou chromée et d'un poli spéculaire, qui passe dans un bain de dispersion de PTFE puis dans un four à trois zones de chauffe où le film est successivement séché, recuit et fritté. Le film est ensuite refroidi jusqu'à température ambiante par de l'eau ou par un courant d'air froid. Une variante du procédé consiste à appliquer la dispersion par pistolage.

III.6.1. Méthodes par écoulement de résines liquides : coulée, RTM, RIM, infusion

III.6.1.1. Coulée de résine chargée de fibres

C'est un des procédés les plus anciens et les plus simples. La résine chargée de fibres coupées ou de charges minérales est coulée librement dans un moule ouvert ou entre un moule et un contre-moule. Pour certaines applications, on moule directement dans une autre pièce que l'on désire étancher et protéger et qui sert de moule par elle-même. La viscosité de la résine doit rester suffisamment faible pour permettre la coulée, ce qui limite le taux de charge et la longueur des fibres de renforcement. Le démoulage, s'il est nécessaire, ne peut intervenir que lorsque la réticulation est suffisante. Le procédé est souvent utilisé pour l'isolation de dispositifs électriques en place et, dans ce cas, il n'y a pas de démoulage. L'application peut être manuelle ou

automatisée. Les avantages du procédé résident dans sa simplicité, dans les faibles investissements, dans l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce si le moule est bien réalisé, dans l'aptitude à la réalisation de prototypes et de pièces en petite série. Les inconvénients du procédé découlent de la limitation du renforcement due au faible taux et à la longueur des fibres tolérés par la résine, de la main-d'œuvre importante, de la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule, de la faiblesse des cadences et des séries.

III.6.2. Moulage par injection-réaction de résine renforcée : RRIM et SRIM ou SRRIM

RRIM: Reinforced Reaction Injection Moulding. La résine est renforcée avec de la fibre de verre coupée ajoutée à l'un des composants de la résine.

SRRIM ou SRIM: Structural Reinforced Resin Injection Moulding. Un renfort structurel est placé dans le moule avant injection de la résine. Le principe le plus évolué, SRRIM, est décrit par la figure III.3 :

- les tissus ou autres renforts structurels sont disposés dans le moule ; – après fermeture du moule, une unité d'injection dose et mélange en continu la résine (partie A) et le catalyseur (partie B) renforcés ;
- le mélange est injecté sous faible pression (0,5 MPa par exemple), par un cône d'injection, dans le moule fermé ;
- les deux parties (ou plus) de la résine réagissent ensemble dans le moule fermé jusqu'à ce que les propriétés mécaniques autorisent le démoulage.

Éventuellement, une autre alternative emploie le vide en plus de la pression d'injection, ce qui facilite le dégazage. La pression d'injection n'est pas négligeable et les moules doivent être suffisamment rigides et résistants. La précision de la cavité et la qualité de ses surfaces régissent la précision et la finition des pièces. Les avantages du procédé résident dans l'automatisation du mélangeage et de l'alimentation du moule, dans la possibilité d'utiliser tous types de renforts et de les disposer à volonté dans le moule avant injection, dans les faibles coûts de main-d'œuvre, dans les coûts de transformation modérés, dans l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce si le moule est bien réalisé, dans l'aptitude à la réalisation de pièces en moyenne série. Les inconvénients du procédé découlent des investissements en machine d'injection et en moules résistants à la pression, de l'impossibilité d'utiliser les nids-d'abeilles qui se remplissent de résine, de la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule.

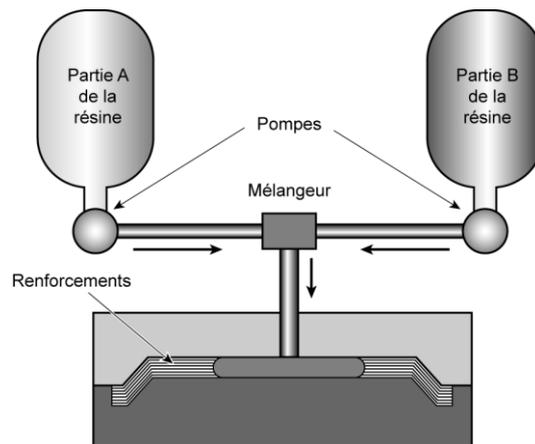


Figure III.3. Principe du SRRIM.

Éventuellement, une autre alternative emploie le vide en plus de la pression d'injection, ce qui facilite le dégazage.

La pression d'injection n'est pas négligeable et les moules doivent être suffisamment rigides et résistants. La précision de la cavité et la qualité de ses surfaces régissent la précision et la finition des pièces.

Les avantages du procédé résident dans l'automatisation du mélangeage et de l'alimentation du moule, dans la possibilité d'utiliser tous types de renforts et de les disposer à volonté dans le moule avant injection, dans les faibles coûts de main-d'œuvre, dans les coûts de transformation modérés, dans l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce si le moule est bien réalisé, dans l'aptitude à la réalisation de pièces en moyenne série.

Les inconvénients du procédé découlent des investissements en machine d'injection et en moules résistants à la pression, de l'impossibilité d'utiliser les nids-d'abeilles qui se remplissent de résine, de la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule.

III.6.3. Infusion, imprégnation sous vide : SCRIMP, RIFT, VARTM, RFI

SCRIMP: Seeman's Composite Resin Infusion Moulding Process.

VARTM: Vacuum Assisted RTM.

RFI: Resin Film Impregnation.

Il existe deux variantes du procédé, l'infusion de résine liquide et l'utilisation d'un film thermofusible pour imprégner les renforts. Certains procédés d'infusion sont brevetés.

Pour l'infusion de résine liquide (figure III.4), le renfort structural ayant été déposé manuellement dans le moule, un film antiadhérent imperméable ou une feuille souple sont appliqués sur le moule pour le fermer, puis la résine est introduite en faisant le vide dans l'empreinte. Après un temps de

durcissement convenable, la pièce peut être démoulée. Éventuellement, une élévation de la température permet d'accélérer le processus de durcissement.

Pour l'infusion à l'aide d'un film thermofusible, le renfort structural et le film de résine solide sont déposés manuellement dans le moule, un film antiadhérent imperméable ou une feuille souple sont appliqués sur le moule pour le fermer. Après application d'un vide convenable, la résine est fondue par élévation de la température qui provoque également le durcissement permettant le démoulage de la pièce.

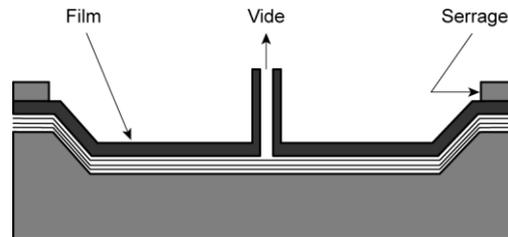


Figure III.4. Principe de l'infusion.

Les avantages du procédé sont :

- l'automatisation du mélangeage et de l'alimentation du moule,
- la possibilité d'utiliser tous types de renforts et de les disposer à volonté dans le moule avant injection
- le remplacement de la partie supérieure du moule par un film beaucoup moins onéreux,
- les coûts de transformation modérés,
- l'obtention d'un aspect correct sur toute la surface de la pièce,
- l'aptitude à la réalisation de grandes pièces, dans la possibilité d'accélérer le durcissement par chauffage.

Les avantages sont particulièrement intéressants par rapport au moulage au contact par stratification manuelle ou par pulvérisation à cause des cycles plus rapides et de l'amélioration des conditions d'hygiène et de sécurité.

Les inconvénients du procédé sont :

- sa plus grande complexité,
- des investissements en dispositif de vide, qui restent raisonnables,
- la nécessité d'utiliser des résines très fluides qui risquent d'être moins performantes et qui s'infiltreraient dans les nids-d'abeilles qui se remplissent de résine,
- la limitation de la grandeur des pièces due aux dimensions du moule.

Chapitre IV : Transformation des polymères à l'états plastique

IV.1. Procédés d'extrusion et de moulage

IV.1.1. Extrusion

L'extrusion est un procédé continu permettant de fabriquer des articles de section constante. Certains procédés permettent de modifier la forme, en ligne, après la sortie de l'extrudeuse ou, hors ligne, en reprise, en utilisant l'extrudât comme demi-produit. Les extrudeuses modernes sont pratiquement toutes à vis. L'extrusion représente environ 35 % en poids de la transformation des thermoplastiques. Certains produits extrudés subissent une seconde transformation comme le thermoformage. Parmi les produits extrudés, les films sont largement majoritaires (environ 60 %) suivis des tubes et tuyaux (un peu plus de 20 %) puis des feuilles (un peu plus de 15 %).

IV.1.1.1. Principe

Les thermoplastiques peuvent être mis en forme par plastification ou fusion puis par forçage à travers une filière et éventuellement un poinçon formant un entrefer ayant approximativement la forme de la section définitive du profilé. L'extrudeuse (figures IV.1 et IV.2) est l'élément principal de l'ensemble du matériel nécessaire à l'extrusion d'un produit. Cet ensemble constitue une ligne d'extrusion comprenant principalement :

- L'extrudeuse, en général à vis, qui, alimentée en granulés, réchauffe et plastifie la matière avant de l'amener sous pression à la filière ;
- La filière et éventuellement le poinçon, qui vont donner la forme voulue au flux de matière ;
- Les dispositifs de calibrage (calibreux ou conformateur) et de refroidissement, qui vont donner la forme définitive du profilé et la fixer par refroidissement ;



Figure IV.1. Extrudeuse Reifenhauser.

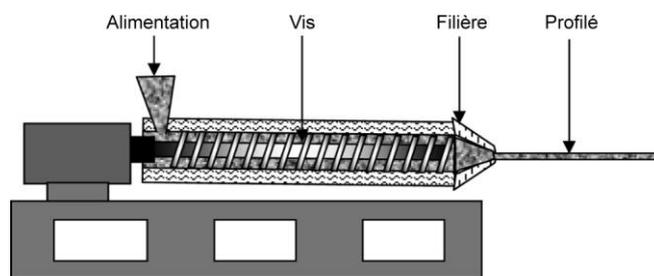


Figure IV.2. Schéma d'une extrudeuse monovis.

L'extrudeuse monovis courante comprend principalement :

- Une trémie d'alimentation qui est approvisionnée avec le produit à extruder, en général du granulé ;
- Une vis sans fin dite vis d'Archimède ;
- Le fourreau dans lequel tourne la vis sans fin ;
- Le groupe d'entraînement de la vis ;
- La filière : extrémité de l'extrudeuse qui donne la forme finale au produit ;
- Les dispositifs de chauffage et de refroidissement du fourreau et, éventuellement de la vis ;
- Les aides à la conduite de l'extrudeuse : ordinateur, logiciel, automatismes, etc.

L'ensemble de l'extrudeuse est monté sur un bâti de conception horizontale, le plus souvent, ou parfois verticale.

Le cycle d'extrusion se déroule en quatre ou cinq phases :

1. Plastification de la matière par le travail mécanique de la vis et l'apport de chaleur du système de chauffage ;
2. Mise en pression du matériau ;
3. Éventuellement dégazage ;
4. Mise en forme par passage du matériau sous pression et chaud à travers la filière;
5. Refroidissement jusqu'à consolidation physique suffisante du profilé.

Les applications de l'extrusion sont très diversifiées, par exemple :

- Fabrication de tubes et tuyaux jusqu'à 2 m de diamètre avec des extrudeuses simple ou double vis ;
- Gainage de fils électriques ;
- Fabrication de profilés en tous genres pour le bâtiment, l'automobile... : profilés pour fenêtres, décoration, protection, etc. ;
- Production de films et feuilles ;
- Moussage par voie physique de polystyrène, polyéthylène, polypropylène, polyester thermoplastique, polyétherimide, polysulfone, PVC rigide et souple ;
- Étapes auxiliaires de la fabrication des polymères : mélangeage, dégazage... ;
- Recyclage mécanique des déchets.

La taille des matériels est aussi diversifiée que les applications avec des diamètres de vis de quelques millimètres à 800 mm pour des productions horaires pouvant atteindre plus de 70 t.

Pratiquement tous les thermoplastiques, sauf le PBI, sont extrudables dans des conditions de températures et de pression différentes. Les résines chargées de fibres de longueur limitée ou allégées sont utilisables.

Considérant l'ensemble des paramètres concernant les matériaux et les profilés à extruder sans faire abstraction des contraintes économiques et environnementales, les extrudeuses vont couvrir un vaste spectre de caractéristiques.

IV.1.2. Les vis pour extrudeuses monovis

La vis est responsable du transport de la résine jusqu'à la filière, de sa plastification, de la mise en pression de la masse fondue, de la régularité de la température et de la pression qui vont conditionner la régularité des côtes du profilé. Pour assurer correctement son rôle, le profil de vis doit être adapté au thermoplastique à traiter mais il existe des types de vis acceptant plusieurs types de polymères. Le diamètre, le rapport L/D (longueur/diamètre), la vitesse de rotation doit

être adaptés au volume des profilés à extruder. Le matériau de construction et le traitement de surface doivent également s'adapter au thermoplastique à extruder pour présenter à la fois une bonne résistance à la corrosion et à l'usure.

Les vis peuvent être (figure IV.3) :

- Modulaires, construites à partir de sections standards ;
- A pas directs, faisant avancer le polymère de la trémie d'alimentation vers la filière ;
- A pas inverse, produisant l'effet inverse et entraînant une perte de charge. Il ne peut s'agir que de courtes sections d'une vis à pas direct ;
- A pas constant ou variable ;
- A profondeur de chenal constant ou variable ;
- Mono-filet ou bi-filets.

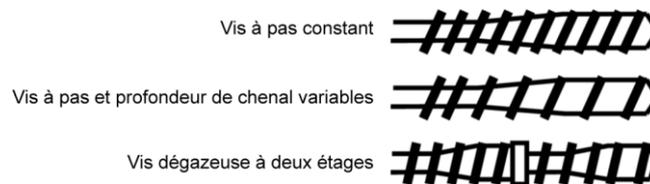


Figure IV.3. Exemples de profil de vis.

Pour une vis conçue pour du polyéthylène, souvent utilisée comme vis standard pour les polymères de degrés de polymérisation dispersés (poly- disperses), fondant à faible température mais dans une plage de température plus ou moins importante (figure IV.4) :

- La zone d'alimentation est généralement courte de façon à éviter une fusion prématurée de la fraction des granulés facilement fusibles qui colleraient à la vis et la colmateraient, conduisant au blocage de l'extrudeuse ;
- La zone de compression est longue, de façon à compléter aussi bien la fusion des fractions fondant en début de plage de fusion que ceux fondant en fin de plage de fusion ;
- La zone de pompage est courte.

Pour une vis pour polyamide, fondant à température plus élevée dans une plage étroite (figure IV.4) :

- La zone d'alimentation est longue pour assurer la mise en température et la fusion ;
- La zone de compression est courte car la fusion est rapide ;
- La zone de pompage est longue pour parfaire l'homogénéisation du polymère fondu.

Le diamètre du fourreau étant constant, l'évolution du diamètre du corps de la vis joue sur le rapport ou taux de compression (rapport entre la profondeur du chenal dans la zone d'alimentation et celle dans la zone de pompage).

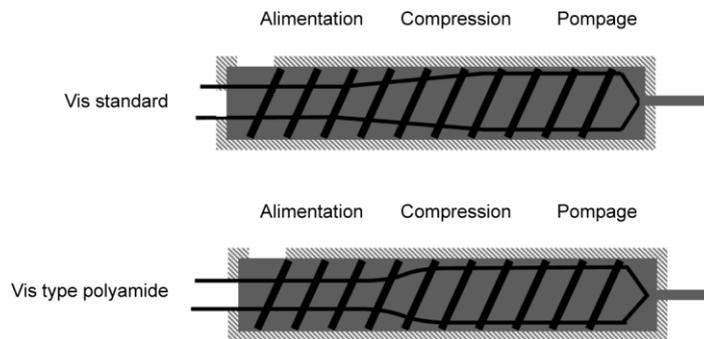


Figure IV.4. Profils de vis standard et de vis type polyamide.

IV.1.3. Les dispositifs complémentaires des vis

IV.1.3.1. Dispositifs de dégazage

L'humidité, les fractions volatiles des compounds sont libérées par les hautes températures atteintes pendant l'extrusion et peuvent former des bulles qui se développeront après la sortie de la filière, lors du retour à pression atmosphérique. Pour y remédier, les extrudeuses dégazeuses sont dotées, après les zones conventionnelles d'alimentation, de compression et de pompage, d'une courte section de faible diamètre. Au même niveau, le fourreau est percé d'un orifice relié à une prise de vide aspirant les fractions volatiles. Aussitôt après, la vis reprend son diamètre normal pour faire étanchéité et parfaire la compression.

IV.1.3.2. Les pompes à engrenage

La pression en entrée de filière est un paramètre essentiel du rendement de l'extrudeuse. Comme on peut le penser intuitivement et conformément aux lois de circulation des fluides, une pression élevée à l'entrée de la filière favorise son débit horaire jusqu'à un certain point. Cependant, si la pression est trop élevée, on peut obtenir l'effet inverse. D'autre part, les variations de pression engendrent des variations de débit et de cotes en sortie de filière.

D'une pompe à engrenage entre l'extrémité de la vis et l'entrée de la filière permet à la fois d'augmenter et de régulariser la pression à l'entrée de la filière et de bloquer tout flux de contre-pression. De plus, l'homogénéité de la composition, de la température et de l'état rhéologique de la matière fondue s'en trouvent améliorés.

IV.1.3.3. Les perturbateurs de flux et amplificateurs de travail mécanique

Des doigts, des ergots, des picots, des anneaux ou autres éléments de formes très variées, fixes, montés sur le fourreau ou mobiles, montés sur la vis provoquent des perturbations des flux créés par la vis, ce qui augmente le travail mécanique nécessaire à la plastification et à l'homogénéisation de la matière fondue.

On peut également utiliser des éléments malaxeurs, des disques excentrés décalés les uns par rapport aux autres le long du profil de la vis, des contre-filets qui sont des éléments à pas inverse dont le filet est largement percé.

IV.1.3.4. Les diviseurs de flux

Ces éléments de mélangeage statiques, divisent et remélangent les flux, améliorant l'homogénéité de la composition, de la température et de la rhéologie. Situés entre la vis et la filière, la place qu'ils occupent (20 ou 30 cm par exemple) doit être récupérée sur la longueur de la vis. Bien sûr, ils provoquent une perte de charge et risquent de s'encrasser avec les compounds chargés ou renforcés fibres.

IV.1.3.5. Têtes, filières et poinçons

La filière a pour mission de donner la forme et les cotes voulues à l'extrudât dans les meilleures conditions de régularité et d'aspect. Si le profilé est creux, il faut utiliser, en plus, un poinçon pour obturer la partie correspondant à la cavité. La figure IV.5 illustre schématiquement le principe de l'extrusion d'un tube. On imagine bien que, si le poinçon est omis, on obtient un jonc de même diamètre extérieur que le tube.

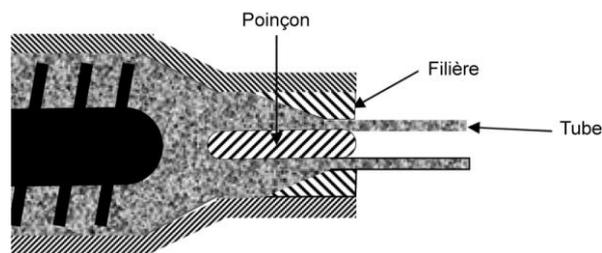


Figure IV.5. Principe du poinçon et de la filière.

En admettant que le polymère arrive à la filière dans de bonnes conditions de température, de viscosité et de pression, il faut encore concevoir la filière et le poinçon pour que la réduction de section entre le fourreau et l'entrefer filière/poinçon soit très progressive et que les écoulements dans la filière ne soient pas turbulents afin que l'extrudât se forme régulièrement en sortie d'extrudeuse.

La conception, l'usinage et la mise au point des filières et poinçons sont délicats et onéreux. Étant propres à chaque modèle de profilé, leur coût sera donc à imputer sur chaque fabrication spéciale.

Parmi les autres types de filières, les filières plates pour feuilles et plaques, dont la largeur peut s'étendre de quelques centimètres à 2 ou 3 m pour les applications en revêtements de sol, sont particulièrement difficiles à réaliser. Une des principales difficultés est de transformer le flux cylindrique de la sortie de fourreau en une feuille régulière de section rectangulaire d'épaisseur disproportionnée par rapport à la largeur.

La filière est portée par la tête d'extrusion qui solidarise le fourreau et la filière. En général, comme représenté sur la figure IV.5, la filière est montée dans l'axe de l'extrudeuse mais, dans certains cas, ce montage doit être remplacé par un montage en équerre pour libérer la place nécessaire pour monter un outillage encombrant ou le passage pour le fil électrique à gainer comme illustré sur la figure IV.6.

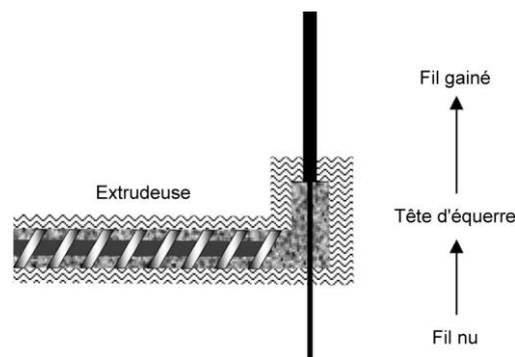


Figure IV.6. Principe de la tête d'équerre pour gainage de fil.

IV.1.4. Le gainage de fils et câbles

Les situations sont très différentes suivant la nature des produits finis : fils de faible section comme, par exemple, les fils électriques pour l'automobile, l'électroménager ou la basse tension pour la construction ; fils à caractéristiques plus techniques comme les moyennes, hautes et très hautes tensions ou, à l'opposé, pour l'électronique. Enfin, les fibres et câbles optiques constituent une catégorie particulière.

Cependant, il existe des caractéristiques communes :

- Insertion en continu d'éléments étrangers (fils métalliques le plus souvent) au cœur de l'extrudat principal (gaine plastique) ;
- Homogénéité et propreté des extrudats sous peine de générer des défauts électriques dès l'origine ou en cours d'utilisation (décharges arborescentes) ;
- Respect des géométries, concentricité, centrage, planéité pour les nappes. Des méthodes de

contrôle continu particulières sont utilisées, par exemple les mesures de diamètre et de concentricité par rayons X ;

– Productivité et compétitivité économique entraînant des vitesses d’extrusion et de défilement qui dépendent fortement de la nature des fils et câbles, pouvant varier de l’ordre du centimètre par minute pour des câbles haute tension à 1 000 m/min pour des gainages fins de fils téléphoniques. Des tubes de grande longueur permettent le chauffage et/ou le refroidissement à ces très grandes vitesses.

Parmi les caractéristiques spécifiques, citons par exemple :

- Les filières à orifices multiples, permettant de gainer simultanément plusieurs conducteurs ;
- La coextrusion de plusieurs polymères, dont éventuellement des cellulaires ou des polyéthylènes réticulables ;
- L’insertion d’éléments métalliques formés et soudés directement sur la ligne d’extrusion à partir de feuillards d’aluminium ;
- La réticulation des polyéthylènes par diverses méthodes telles que les enceintes infrarouges, l’utilisation de polyéthylènes greffés silanes, l’irradiation sous faisceau d’électrons.

La figure IV.7 schématise un câble avec un conducteur central, deux gaines thermoplastiques (une couche interne et un revêtement externe), un tube d’aluminium et deux couches d’adhésif pour assurer la cohésion entre le tube métallique et les couches de thermoplastique. La ligne d’extrusion comprend trois extrudeuses équipées de deux têtes d’équerre et d’une tête droite.

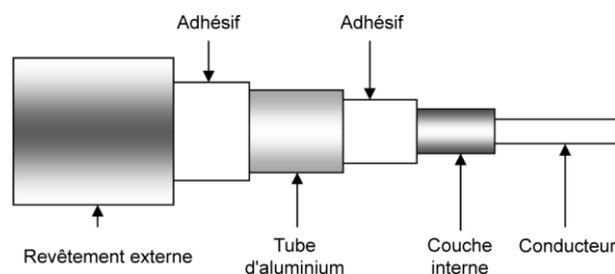


Figure IV.7. Exemple de construction de câble.

Produits plats épais : feuille et plaques extrudées

Le principe est le même que pour le film coulé : extrusion à l’aide d’une filière plate de grande largeur et d’épaisseur adaptée. Une calandre peut être rajoutée après la sortie de filière

pour parfaire la régularité des épaisseurs comme la montre la figure IV.8 avec à gauche la filière plate vue de l'arrière et la calandre suiveuse à trois cylindres.

Fils, filaments

L'extrusion des fils et filaments utilise une tête plate à filières multiples telle que schématisée sur la figure IV.9. Les problèmes sont ceux des têtes plates avec pour principale difficulté l'obtention sur toutes les filières d'un écoulement isobarique de la masse fondue dans un même état thermique et rhéologique.

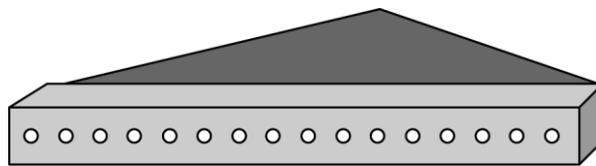


Figure IV.9. Schéma de principe d'une tête plate à filières multiples pour extrusion de fils.

IV.2. L'extrusion soufflage

L'injection soufflage et l'extrusion soufflage arrivent au troisième rang des procédés de transformation des thermoplastiques, permettant la fabrication de corps creux en deux étapes, sans utilisation de noyau :

- Réalisation d'une paraison par injection ou extrusion ;
- Transfert dans un moule et soufflage d'air comprimé à l'intérieur de la paraison pour la plaquer sur les parois du moule et l'obliger à en prendre la forme.

L'extrusion soufflage ne permet pas une définition précise des cols ou bagues et est utilisée pour des contenants de quelques centimètres cubes jusqu'à 10 m^3 en PVC, polyéthylène (PE), polypropylène (PP) et polyéthylène téréphtalate (PET) le plus couramment.

Vu l'orientation de la matière pendant le soufflage, les propriétés mécaniques sont améliorées dans le sens perpendiculaire à l'axe de l'objet. Pour obtenir une amélioration également dans l'axe du récipient, on pratique le soufflage bi-orienté, qui comporte une étape supplémentaire de pré-étirage mécanique de la paraison dans le sens axial avant le soufflage. Cet étirement assure l'amélioration des caractéristiques dans le sens de l'axe, ce qui n'est pas le cas dans le soufflage simple.

Les techniques de soufflage sont très utilisées pour la fabrication du petit mobilier et des

bouteilles, flacons, réservoirs à liquide de frein ou carburant, soufflets, fosses septiques, luminaires, bornes, balises, jouets, valises, caisses, citernes, réservoirs, arrosoirs, cuves de chauffe-eau, socles de parasol.

IV.2.1. Principe du soufflage

L'opération de soufflage en elle-même peut être conventionnelle ou combinée avec un étirage axial. Le matériau est le plus souvent monolithique mais les multicouches se développent pour des raisons techniques, économiques et environnementales en autorisant le réemploi de matières recyclées.

IV.2.2. Soufflage conventionnel

Le soufflage combine la plastification ou fusion des thermoplastiques par extrusion ou injection et le moulage par injection d'air comprimé.

La figure IV.10 schématise le principe du soufflage :

Vue A : une paraison réalisée par extrusion est introduite dans le moule ;

Vue B : le moule est fermé ;

Vue C : de l'air comprimé est injecté à l'intérieur de la paraison pour plaquer ses parois sur celles du moule froid et en prendre la forme ;

Vue D : le corps creux suffisamment refroidi pour supporter les manipulations est démoulé ;

Vue A bis : la paraison est injectée au lieu d'être extrudée pour améliorer la qualité des goulots et pas de vis dont la précision est celle des pièces injectées.

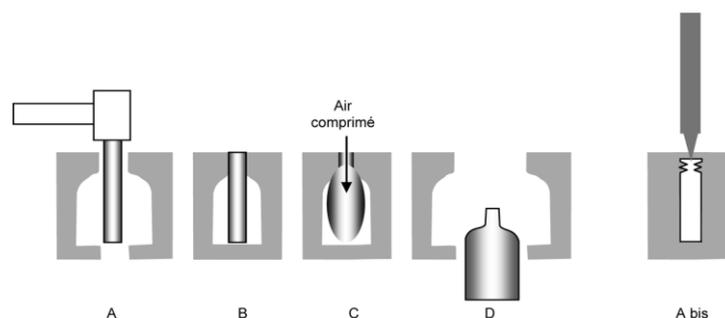


Figure IV.10. Principe du moulage par soufflage des thermoplastiques

IV.2.3. Soufflage avec étirage axial

Avant le soufflage, les paraisons placées dans le moule peuvent subir un premier étirage mécanique dans l'axe de l'objet à l'aide d'un piston et d'un soufflage suffisamment léger pour ne

pas entraîner d'expansion radiale. Cet étirement assure l'amélioration des caractéristiques dans le sens de l'axe, ce qui n'est pas le cas dans le soufflage simple. Après ce premier étirage mécanique, la paraison est soumise au soufflage normal qui provoque l'étirage dans le sens orthogonal à l'axe de la paraison.

IV.2.4. Soufflage de multicouches

La coextrusion des paraisons combine deux ou plusieurs thermoplastiques, par exemple des grades recyclés et vierges ou des familles de thermoplastiques complètement différentes apportant des propriétés économiques, mécaniques ou physiques complémentaires. La coextrusion étend le champ d'application du soufflage pour l'emballage alimentaire ou industriel, par exemple boissons, lait, cosmétiques, produits chimiques, produits pharmaceutiques et médicaux. Une combinaison judicieuse de polymères permet ainsi le remplissage à chaud ou la prolongation des durées de péremption des produits laitiers et jus de fruits grâce à une meilleure protection contre la lumière et l'oxygène de l'air. À titre d'exemple, des bouteilles quatre couches PEHD vierge/PEHD recyclé/adhésif/polyamide permettent la conservation de jus de fruits pendant deux mois au réfrigérateur tout en profitant des avantages économiques et écologiques de l'incorporation d'une part de recyclé.

IV.2.5. Les applications du soufflage

Suivant le type de machine, le soufflage peut s'appliquer de la grosse pièce produite en petite série jusqu'aux petites pièces produites en masse en passant par tous les cas de figure. Le panel de plus en plus fourni de thermoplastiques utilisables en monocouche ou multicouches, le renforcement par les fibres de verre ou, au contraire, l'allègement par utilisation de mousses font que le soufflage étend continuellement son domaine d'application.

Citons, sans aucune prétention d'exhaustivité :

- L'emballage avec les bouteilles de produits alimentaires tels que l'eau plate ou gazeuse, les jus de fruits, les produits laitiers... mais aussi les flacons de toutes formes pour produits ménagers, détergents, produits d'hygiène, etc. ;
- L'automobile : spoilers, tubulures, réservoirs... ;
- L'industrie : fûts et autres conteneurs, pièces industrielles... ;
- Les applications domestiques : petits meubles, ustensiles de cuisine, poubelles, récipients pour filtres et rafraîchisseurs d'eau... ;
- Le médical : récipients, conteneurs, piluliers, flaconnage... ;
- Les loisirs : jouets...

IV.3. Moulage par injection

IV.3.1. Principe

Une presse à injecter les thermoplastiques, dite également presse d'injection haute pression, comporte essentiellement trois parties principales (figure IV.11) assurant trois fonctions fondamentales :

- Une extrudeuse à vis avec un dispositif de chauffage assurant la plastification ou la fusion du thermoplastique et son transport de la trémie d'alimentation jusqu'au moule. Le dessin de vis et les températures sont fonctions du matériau à injecter ;
- Un système faisant piston permettant d'introduire la quantité voulue de matière sous haute pression dans le moule. Dans le cas le plus fréquent où la vis elle-même joue ce rôle, elle peut s'arrêter de tourner et reculer dans le fourreau pour stocker la quantité de matière nécessaire à l'injection d'une moulée (une ou plusieurs pièces pour un moule multi-empreintes). L'ensemble injecte sous haute pression la matière dosée dans le moule. La pression varie avec le matériau, le volume et la forme de l'objet, le dessin du moule ;
- Un système de fermeture et son moule avec dispositif de refroidissement dans lequel le thermoplastique se refroidit et reprend tout ou partie de sa rigidité. Le moule peut être mono-empreinte ou multi-empreintes. Chaque empreinte a la forme de l'objet à mouler avec des dimensions corrigées du pourcentage de retrait.

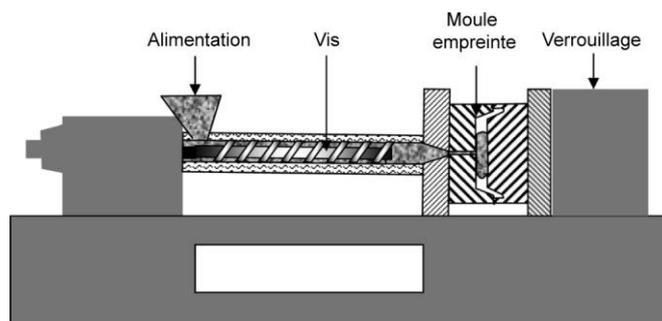


Figure IV.11. Principe de l'injection haute pression.

L'ensemble « moteur électrique, système hydraulique, unité de plastification et d'injection, bloc de fermeture » est monté sur un bâti mécano-soudé de conception horizontale, verticale ou en équerre.

La disposition horizontale ou en ligne occupe beaucoup de place au sol mais dégage l'accès à tous les organes facilitant la mise en place du moule et l'éjection des pièces.

La disposition verticale réduit l'encombrement au sol, facilite le moulage de pièces avec insert mais la hauteur peut être gênante pour l'alimentation et l'automatisation de l'éjection.

La disposition en équerre occupe également beaucoup de place au sol, dégage l'accès à tous les organes facilitant la mise en place du moule et l'éjection des pièces. De plus, elle permet l'injection par le plan de joint du moule.

Le cycle d'injection d'une pièce se déroule en cinq phases :

1. Plastification : dans cette première phase, l'extrémité du fourreau est obturée par la buse et la vis tourne en reculant pour accumuler en tête de vis le polymère plastifié et chaud ;
2. Remplissage : lorsque la quantité voulue de la résine nécessaire à l'injection d'une moulée est plastifiée, la buse s'ouvre et la vis fait office de piston pour injecter sous haute pression et à grande vitesse le polymère dans le moule fermé refroidi à une température nettement inférieure à celle de la résine injectée ;
3. Compactage : en se refroidissant dans le moule, le polymère se contracte, ce que l'on compense partiellement en maintenant la pression pendant que l'on continue à injecter du polymère fondu. Le processus cesse lorsque la matière contenue dans le canal d'alimentation reliant la buse de la presse à injecter au moule est solidifiée ;
4. Refroidissement et maintien : le refroidissement du polymère, lent en raison de sa faible conductivité thermique, est poursuivi jusqu'à une consolidation physique suffisante de la pièce ;
5. Ejection : l'opération de démoulage est manuelle ou plus souvent automatisée. Pour des raisons économiques, l'éjection intervient le plus rapidement possible, dès que la pièce est manipulable sans déformation, et le refroidissement complet n'est obtenu qu'après la sortie du moule.

Certaines phases du cycle d'injection sont partiellement imbriquées, par exemple le compactage et le refroidissement, la plastification de la moulée suivante et le refroidissement de la moulée en cours. Pratiquement tous les thermoplastiques, sauf le PTFE et le PBI, sont injectables, dans des conditions de températures et de pression différentes. Les résines chargées de fibres de longueurs limitées ou allégées sont utilisables.

Considérant l'ensemble des paramètres concernant les matériaux et les pièces à injecter, sans faire abstraction des contraintes économiques et environnementales, les presses vont couvrir un vaste spectre de caractéristiques des unités d'injection, systèmes de fermeture, types de moules,

systemes énergétiques (hydraulique, électrique ou hybride).

IV.3.2. Les systèmes d'injection

Les systèmes d'injection comprennent la vis, le dispositif de chauffage, le dispositif d'injection dans le moule. La vis est responsable du transport de la résine jusqu'au moule, de sa plastification, de la mise en pression de la masse fondue, du dosage de la matière dans le moule. Pour que la vis assure correctement son rôle, son profil doit être adapté au thermoplastique à traiter mais il existe des types de vis standards acceptant plusieurs types de polymères. Le diamètre, le rapport L/D (longueur/diamètre), la vitesse de rotation doit être adaptés au volume des pièces à injecter. Le matériau de construction et le traitement de surface doivent également s'adapter au thermoplastique à injecter pour présenter à la fois une bonne résistance à la corrosion et à l'usure.

IV.3.3. Les presses à injection

IV.3.3.1. Presses standards

La presse complète (figures IV.12 et IV.13 : exemples de presses KraussMaffei) comporte les systèmes d'injection et de fermeture adaptés aux pièces à produire et aux polymères utilisés de façon à satisfaire les contraintes techniques dans des conditions économiques acceptables.



Figure IV.12. Presse KraussMaffei de forte puissance.



Figure IV.13. Petite presse KraussMaffei

Les dimensions des presses varient évidemment avec leur puissance, pouvant atteindre, par exemple, des dimensions au sol de 16 X 5 m pour une hauteur de 4 m dans le cas d'une presse de 34 000 kN.

Le tableau 3.7 présente quelques exemples de forces de fermeture, diamètres de vis et puissances installées, qui ne constituent pas une règle générale et souffrent de multiples exceptions.

IV.4. Moulage par compression

Le moulage par compression des thermoplastiques n'est utilisé que pour des cas particuliers. En revanche, il est encore couramment utilisé pour la fabrication des composites et des caoutchoucs vulcanisés.

IV.4.1. Principe

Le principe de base consiste à comprimer sous forte pression le polymère suffisamment ramolli pour lui faire prendre la forme de l'empreinte d'un moule chauffé. Dans une deuxième étape, le polymère est solidifié soit par refroidissement, pour les thermoplastiques, soit par réticulation, pour les thermodurcissables.

La procédure finale de moulage dépend donc de la nature du polymère à mouler :

- S'il s'agit d'un thermoplastique, il faut d'abord le chauffer pour l'amener à un état rhéologique permettant sa mise en forme, l'élimination de l'air occlus, la cohésion des différents flux

et/ou des particules de matière. Lorsque la pièce est assez fluide et homogène, il faut la refroidir suffisamment pour permettre le démoulage sans l'altérer. Ce processus uniquement physique, assuré par le refroidissement du moule, est d'autant plus long que la pièce est épaisse et que les polymères, sauf exception, sont mauvais conducteurs de la chaleur ;

- S'il s'agit d'un thermodurcissable, silicone par exemple, il faut d'abord le chauffer, comme dans le cas précédent, pour l'amener à un état rhéologique permettant sa mise en forme, l'élimination de l'air occlus, la cohésion des différents flux et/ou de particules de matière.

En plus, lorsque la pièce est convenablement fluidifiée et homogène, il faut continuer à la chauffer pour déclencher et assurer la réticulation ou le durcissement ou la vulcanisation jusqu'à un stade suffisant pour obtenir un niveau de propriétés mécaniques permettant le démoulage sans altérer la pièce. Ce processus, uniquement chimique, est assuré par le chauffage du moule et est d'autant plus long que la pièce est épaisse et que les polymères, sauf exception, sont mauvais conducteurs de la chaleur. En plus, la matière en contact avec la surface du moule réticule plus vite et plus intensément que le cœur de la pièce, ce qui pose des problèmes importants d'anisotropie. Si le démoulage est opéré avant la réticulation complète, une post-réticulation, en étuve par exemple, pourra apporter le complément nécessaire de réticulation.

Finalement, dans tous les cas, les pièces démoulées doivent être ébarbées pour éliminer le voile qui subsiste autour de la pièce. La bonne conception du moule dans le plan de joint facilite l'élimination de ce film.

La quantité de matière introduite dans le moule doit être convenablement dosée avec un volume précis légèrement supérieur à celui de la pièce à réaliser pour limiter les pertes de matière, permettre la bonne fermeture du moule, éviter les variations d'épaisseur, simplifier la finition des pièces démoulées. Au contraire, une insuffisance de matière crée des défauts volumiques (manques de matière, trous, bulles, pièces incomplètes ou hors tolérances...), une cohésion insuffisante de la matière...

Pour les thermodurcissables, le degré de réticulation dépend du matériau, de l'épaisseur de la pièce, de la température du moule et, plus précisément, du couple temps et température réelle de la matière en chaque point de la pièce. Pour des pièces fines, la propagation de la chaleur est rapide alors que, pour des pièces très épaisses, la température du moule n'est transmise au cœur de la matière qu'avec un décalage important. Pour les pièces dont les épaisseurs varient suivant les endroits, le temps de moulage devra établir un compromis permettant d'obtenir le meilleur équilibre de propriétés pour les épaisseurs les plus fines et les plus importantes.

La figure IV.14 schématise le principe du moulage d'un joint annulaire à profil creux (vue

de gauche) avec le demi-moule supérieur attaché au plateau supérieur de la presse, le demi-moule inférieur attaché au plateau inférieur de la presse. Ce dernier est actionné par le vérin de la presse pour fermer et ouvrir le moule. La vue de droite schématise le principe d'un moule piston pour le moulage d'une pièce cylindrique à face supérieure concave. Le centrage des différentes parties du moule est assuré par un système mécanique, constitué de goujons pour l'exemple choisi.

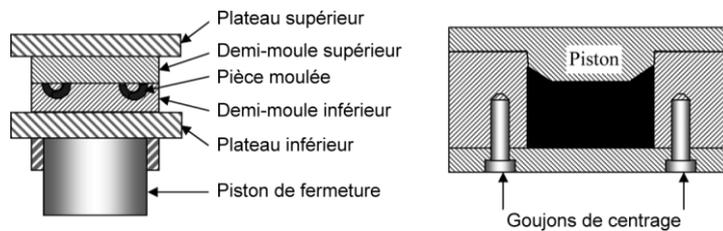


Figure IV.14. Principe du moulage par compression.

Avantages du moulage par compression :

- Presses et outillages de conception simple et robuste ;
- Investissements réduits ;
- Démarrages et arrêts rapides ;
- Technique adaptée au laboratoire, à la réalisation de prototypes ;
- Possibilité de mouler les très grosses pièces ;
- Possibilité de fabriquer des pièces très longues en moulant des parties successives... ;
- Possibilité de multiplier le nombre d'empreintes pour améliorer le rendement ;
- Facilité d'utilisation d'inserts et renforts ;
- Adaptation au moulage des caoutchoucs vulcanisables.

Inconvénients du moulage par compression :

- Nécessité de préparation précise des ébauches individuelles ;
- Nécessité d'une opération de finition souvent longue et coûteuse pour éliminer les bavures qui se forment obligatoirement aux plans de joint ;
- Transmission difficile et lente de la chaleur du moule au polymère (mauvais conducteur de la chaleur) uniquement par conduction par la surface : temps de moulage long et anisotropie de la pièce, la surface ayant un passé thermique différent de celui du cœur ;
- Ralentissement des cadences en cas d'utilisation d'inserts ;

- Cycles de fabrication longs ;
- Coûts de main-d'œuvre importants ;
- Coûts d'exploitation élevés ;
- Faibles possibilités d'automatisation.

IV.4.2. Conception des moules

Le moule pour moulage par compression est généralement simple mais doit être très robuste pour supporter les pressions élevées. Souvent en acier mais aussi en alliage léger pour les applications moins contraignantes, les moules sont constitués, en principe, de deux demi-moules comportant :

- Une ou plusieurs empreintes ;
- Un plan de joint assurant l'étanchéité entre les deux parties du moule. Certaines pièces, pour permettre leur démoulage, peuvent nécessiter des plans de joint supplémentaires ;
- Des dégorgeoirs bordant les empreintes et devant recueillir le surplus de matière ;
- Des événements permettant l'échappement de l'air emprisonné au moulage sans laisser passer la matière à mouler ;
- Des systèmes de centrage assurant le positionnement précis des diverses parties du moule ;
- Un dispositif permettant de positionner les outils utilisés pour ouvrir le moule au démoulage ;
- Eventuellement, un noyau permettant de mouler des objets creux, soufflets de protection par exemple ;
- Eventuellement, des dispositifs de centrage ou de maintien des inserts.

IV.4.3. Moulage par compression-transfert

Le moulage par compression-transfert est une technique intermédiaire entre la compression simple et l'injection.

IV.4.3.1. Principe du moulage par transfert ou compression-transfert

Le principe de moulage par compression est conservé mais l'alimentation des empreintes se fait automatiquement, en transférant le mélange à partir d'un pot ou chambre de transfert. Le piston du pot chasse le mélange vers les empreintes par l'intermédiaire de canaux, ou buses.

La presse peut être :

- A compression simple, et le dispositif de transfert est alors intégré au moule spécialement conçu pour assurer la fonction compression-transfert ;
- Spécifique avec deux pistons (l'un pour vider le pot de transfert et l'autre pour la fermeture de la presse). Cette technique est une première étape vers l'injection avec une unité d'injection simplifiée. La compression-transfert se positionne entre la compression et l'injection, dont on retrouve partiellement les avantages et inconvénients.

Le processus de moulage est simplifié, la main-d'œuvre est moins importante et les déchets sont réduits. En revanche, les investissements sont plus importants. La figure IV.15 schématise, sur la vue de gauche, le principe de la presse transfert avec ses deux pistons, l'un pour la fermeture du moule et l'autre pour le transfert du compound (figuré en noir) de la chambre ou pot de transfert vers les empreintes par l'intermédiaire des buses et canaux. La vue de droite représente un moule piston à monter sur une presse compression classique à un seul piston. La fermeture du moule chasse le polymère (figuré en noir) de la chambre ou pot de transfert vers les empreintes par l'intermédiaire des buses et canaux.

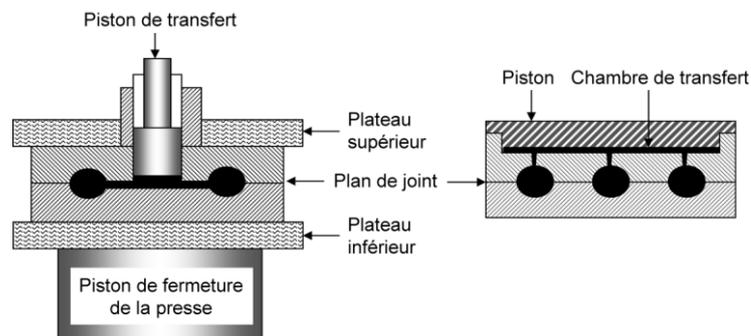


Figure IV.15. Principe du moulage par compression-transfert.

IV.4.3.2. Avantages et inconvénients du moulage par transfert

Avantages du moulage par transfert par rapport au moulage par compression :

- Une seule ébauche très simple à réaliser quel que soit le nombre d'empreintes du moule ;
- Le transfert de la matière, du pot de transfert dans les empreintes du moule, provoque un travail mécanique complémentaire qui entraîne un échauffement plus homogène favorisant la soudure des flux et, dans le cas des thermodurcissables, l'isotropie de la réticulation.
- L'adhésion aux inserts est également améliorée ;

- Le remplissage de toutes les empreintes se fait au même moment dans les mêmes conditions ;
- L'absence de bavures aux plans de joint permet de supprimer l'ébavurage ;
- L'état rhéologique du mélange retravaillé et réchauffé permet le remplissage d'empreintes de formes plus complexes ;
- Le nombre d'empreintes peut être aussi plus important du fait de la facilité de chargement.

Avantages du moulage par transfert par rapport au moulage par injection :

- Le matériel est moins complexe ;
- Les investissements sont moins importants ;
- La déformation des inserts et les risques de leur déplacement sont plus limités.

Inconvénients du moulage par transfert par rapport au moulage par compression :

- Si l'on utilise une presse transfert, son coût est plus élevé que celui d'une presse à compression simple ;
- Le coût du moule est aussi plus élevé que celui du moule compression de même nombre d'empreintes ;
- La matière du tapis résiduel du pot de transfert et des buses de transfert risque d'être perdue pour les thermodurcissables mais rappelons que les bavures sont supprimées ;
- La transmission de la chaleur de la partie supérieure des empreintes jusqu'aux buses ou jusqu'à la chambre de transfert entraîne des risques de réticulation prématurée des thermodurcissables et de remplissage incomplet des empreintes.

Inconvénients du moulage par transfert par rapport au moulage par injection :

- Le degré d'intégration de fonctions est plus limité ;
- Les possibilités d'automatisation sont moindres ;
- Il faut préparer une ébauche par moulée ;
- Les déchets sont plus importants.

IV.5. Calandrage

Le procédé, analogue à celui utilisé pour les métaux, sert au laminage de produits plats de grande largeur et de longueur quasi illimitée en thermoplastiques ou en caoutchoucs.

IV.5.1. Principe du calandrage

Cette technique est généralement employée pour produire des feuilles et des films de

thermoplastiques tels que PVC rigide et souple, EVA, polypropylène, ABS... d'épaisseur minimale de l'ordre de 25 μm . Le principe schématisé par la figure IV.16 consiste à :

- Plastifier ou fondre le thermoplastique par passage dans une extrudeuse ou un mélangeur ;
- Laminer le thermoplastique plastifié ou fondu entre des cylindres tournant en sens inverses pour obtenir un film ou une feuille d'épaisseur constante. Les épaisseurs sont dans une gamme de 80-800 μm avant étirage et 25 μm et plus après étirage ; refroidir le polymère pour lui redonner sa consistance d'origine.

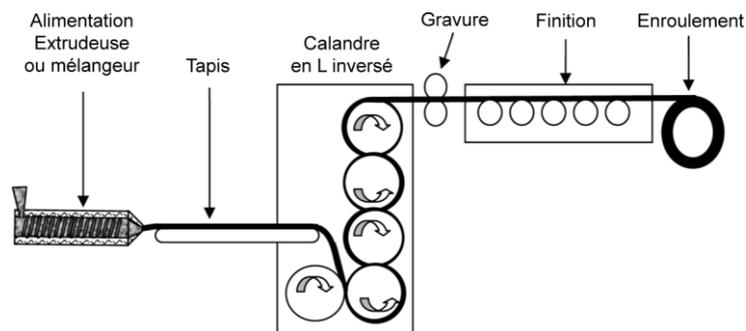


Figure IV.16. Principe du calandrage.

Une calandre est caractérisée par les applications ciblées, le nombre de cylindres, leur taille et leur configuration. Quelques possibilités sont indiquées ci-dessous sans prétention d'exhaustivité :

- Champ d'application : par exemple feuille, film, PVC rigide ou souple... ;
- 2 à 7 cylindres ;
- 400 à 900 mm de diamètre de cylindre ;
- 0,8 à 3 m ou plus de longueur de table (longueur des cylindres) ;
- Configuration en I, L, L inversé, F, Z... (figure IV.17) ;
- Motorisation : la puissance installée et les vitesses linéaires peuvent être différentes pour deux cylindres tangents afin de créer une friction favorable à la plastification du polymère et, éventuellement, à sa pénétration dans les tissus ou nappes. Pour un film de PVC plastifié défilant à 100 m/min, la puissance des moteurs indiquée par certaines sources est de l'ordre de 50 à 100 kw pour une calandre 4 cylindres ;
- Possibilité de réglage des épaisseurs par « cross-axing », ou croisement des axes des cylindres, et « roll-bending », ou cintrage de cylindre.

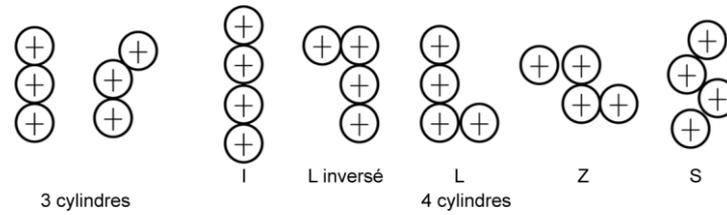
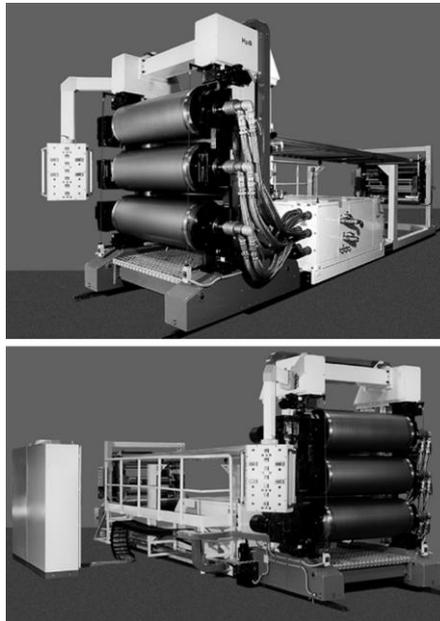


Figure IV.17. Exemples de configurations de calandres 3 et 4 cylindres.

La figure IV.18 montre deux exemples de calandres avec l'armoire et le pupitre de commande ainsi que le bâti des matériels suivants.



La figure IV.18. Exemples de calandres (HPB équipement)

D'une façon générale :

- Les calandres sont des machines très spécifiques nécessitant des investissements lourds qui sont utilisées seulement pour des productions à fort rendement ;
- Les largeurs sont dans une gamme de 0,8 à 3 m ;
- Il est nécessaire de couper les bordures qui sont hors spécifications ;
- La longueur est pratiquement illimitée, avec comme seule contrainte la capacité d'enroulement ;
- Les possibilités d'arrangement des renforts sont limitées : il est seulement possible de calandrer

- le thermoplastique ou le caoutchouc sur des supports souples, continus et résistants dans le sens machine pour obtenir le renforcement ;
- Il est possible de calandrer deux thermoplastiques différents pour fabriquer des feuilles bicouches ;
 - Les films et les feuilles sont souvent anisotropes, les propriétés étant différentes dans le sens machine et le sens transversal. L'étirage augmente les performances dans le sens machine sauf exception pour les allongements à la rupture ;
 - L'aspect en sortie de ligne de calandrage est correct et permet l'utilisation sans autre opération.

IV.5.2. Les lignes de calandrage

Chaque calandre est desservie par une ligne de calandrage composée de :

- Un dispositif d'alimentation, par exemple une extrudeuse ou un malaxeur et une bande transporteuse ;
- La calandre ;
- Un système de reprise du produit calandré avec de multiples rouleaux ;
- Un dispositif de mesure de l'épaisseur et de régulation en boucle fermée pour assurer la qualité optimale des films et feuilles ;
- Des dispositifs divers pour le grainage ou la gravure, le refroidissement, la découpe des bordures, l'enroulement ;
- Eventuellement, un système d'inspection en ligne par laser pour détecter automatiquement les défauts afin d'assurer un contrôle à 100 % ;
- Un système d'aide à la conduite de la ligne ;
- Des systèmes de changement rapide des cylindres des calandres ;
- Des systèmes de changement rapide de cylindres graineurs.

Chapitre V : Transformation des polymères à l'état viscoélastique

V.1. Thermoformage

Le thermoformage (figure V.1) consiste à plaquer une feuille de thermoplastique ramollie par la chaleur sur les parois d'un moule pour lui en faire prendre la forme. Le formage peut être réalisé par l'action directe du moule sur la feuille de thermoplastique (emboutissage) ou plus souvent par action combinée avec une aspiration ou une pression facilitant la mise en forme. Après refroidissement partiel ou total, on procède au démoulage et découpage des bords.

Le haut de la figure V.1 présente la mise en forme d'une feuille ramollie par un dispositif de chauffage, infrarouges par exemple, à l'aide d'un moule mâle faisant office de poinçon. Les deux vues du bas concernent deux autres principes de moule, un moule femelle et un moule en deux parties reprenant le principe de la compression. Ce dernier procédé est également appelé thermocompression.

Le thermoformage permet de fabriquer, à partir de feuilles destinées à cet usage, des pièces de dimensions finies qui peuvent être importantes, par exemple carrosserie de Méhari. La forme générale de la pièce doit obéir à certains critères tels qu'éviter les formes trop compliquées et assurer le démoulage. Bossages, nervures pleines, inserts, rayons de courbure trop faibles, trous et évidements, emboutis trop profonds, ne sont pas réalisables mais certaines découpes et poses d'inserts sont possibles après thermoformage.

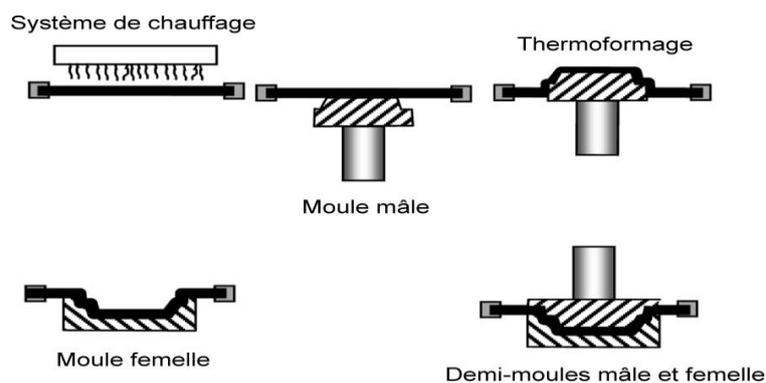


Figure V.1. Principe du thermoformage.

Le thermoformage, augmentant la surface de la feuille de départ, entraîne un amincissement des parois d'autant plus important que l'étirage est localement élevé. La profondeur des parties embouties est limitée par l'amincissement supportable pour la fabrication et pour l'utilisation. Les

épaisseurs ne sont pas maîtrisées et les tolérances sont larges.

Normalement, l'aspect est correct sur toute la surface de la pièce à l'exception des tranches des détourages et il peut subsister des traces d'étirage dans les parties embouties.

Les pièces ne sont pas isotropes à partir du moment où les angles et les profondeurs d'emboutissage atteignent des valeurs non négligeables.

Le procédé convient du prototype à la grande série à condition d'utiliser le matériel adapté. Les moules sont peu coûteux mais les feuilles sont chères et les chutes de détourage importantes.

Le choix des matières est limité et des feuilles de grades spéciaux sont nécessaires. Parmi les thermoplastiques de grande diffusion, citons les PS, ABS, PVC, PE, PP et, pour les thermoplastiques techniques, les PMMA, CA, POM, PC, PA, PPE, PSU.

L'offre en thermoformeuses est très diversifiée, allant des machines manuelles très simples et peu onéreuses jusqu'aux machines très spécifiques produisant un seul type d'article en passant par tout un éventail de modèles standards, mono-station ou multi-stations, traitant des films ou des feuilles de 0,1 à 8 mm en rouleaux ou en feuilles.

Certaines machines incorporées dans des lignes de conditionnement de produits alimentaires de grande consommation peuvent thermoformer 10 000 à 48 000 packs à l'heure.

Les applications sont très diverses, des petites aux grandes pièces, des prototypes jusqu'à la production en série, des produits d'utilisation générale jusqu'aux applications de pointe, par exemple :

- Transports : pièces de carrosserie pour voitures, motos, poids lourds ou véhicules spéciaux ; toits de tracteurs, capots, garnitures intérieures... ;
- Bureautique : habillages, capots... ;
- Appareils électroménagers : portes de réfrigérateurs, portes de maisons, appareils sanitaires... ;
- Construction navale : habitacles, coques, planches à voile ;
- Aéronautique : pare-brise... ;
- Matériel de présentation : PLV, dômes, présentoirs... ;
- Emballage : pots de yaourt, plateaux, blisters, moules pour chocolat, pelliculage, palettes... ;
- Matériel industriel : habillages, capots, récipients, conteneurs, viseurs de masques, valises... ;

V.2. L'extrusion soufflage

V.2.1. Principe

L'extrusion-soufflage est un processus qui, utilisant plusieurs types de matériels plus ou moins sophistiqués, permet la production de récipients ou de corps creux, en matériaux thermoplastiques, dans une gamme de capacités pouvant s'étendre de quelques centimètres cubes à 1 000 litres et plus.

Trois étapes principales peuvent être distinguées dans le processus d'extrusion-soufflage :

- Extrusion d'un tube de résine fondue appelé paraison,
- Mise en place de la paraison entre les deux moitiés d'un moule,
- Soufflage de la paraison pour lui faire prendre la forme du moule (Fig. V.2).

V.2.2. Processus d'extrusion-soufflage

V.2.2.1. Extrusion de la paraison

Un matériau fondu, homogène, à température convenable, est délivré par une extrudeuse qui peut produire la paraison selon deux méthodes de base : extrusion discontinue et extrusion continue, celle-ci avec diverses variantes étant la plus utilisée.

- Extrusion discontinue

Dans ce type d'extrusion la vis tourne jusqu'à ce que la longueur voulue de paraison soit extrudée, puis elle s'arrête. Le moule se ferme sur la paraison et s'éloigne de la tête d'extrusion pendant qu'un nouveau moule se met en place. La vis redémarre et extrude une nouvelle paraison.

Le principal inconvénient de ce système est qu'il utilise pour un travail intermittent, une machine (l'extrudeuse) dont le principe implique une marche continue.

- Extrusion continue

L'extrudeuse, dont la vis tourne en permanence, fournit sans arrêt une paraison qui est reçue dans un moule mobile, et coupée à la filière. Le moule est déplacé pour le soufflage et l'éjection. En variante, la paraison peut être prise par un mécanisme de transfert, coupée à la filière et transportée dans un moule fixe pour le soufflage.

Outre les nombreuses variantes, tenant aux systèmes de déplacement des moules ou de

transfert de la paraison vers les moules, il est possible d'obtenir avec rotation continue de la vis une paraison discontinue.

Paraisons froides

Une installation standard d'extrusion produit des tubes qui sont coupés en longueurs prédéterminées.

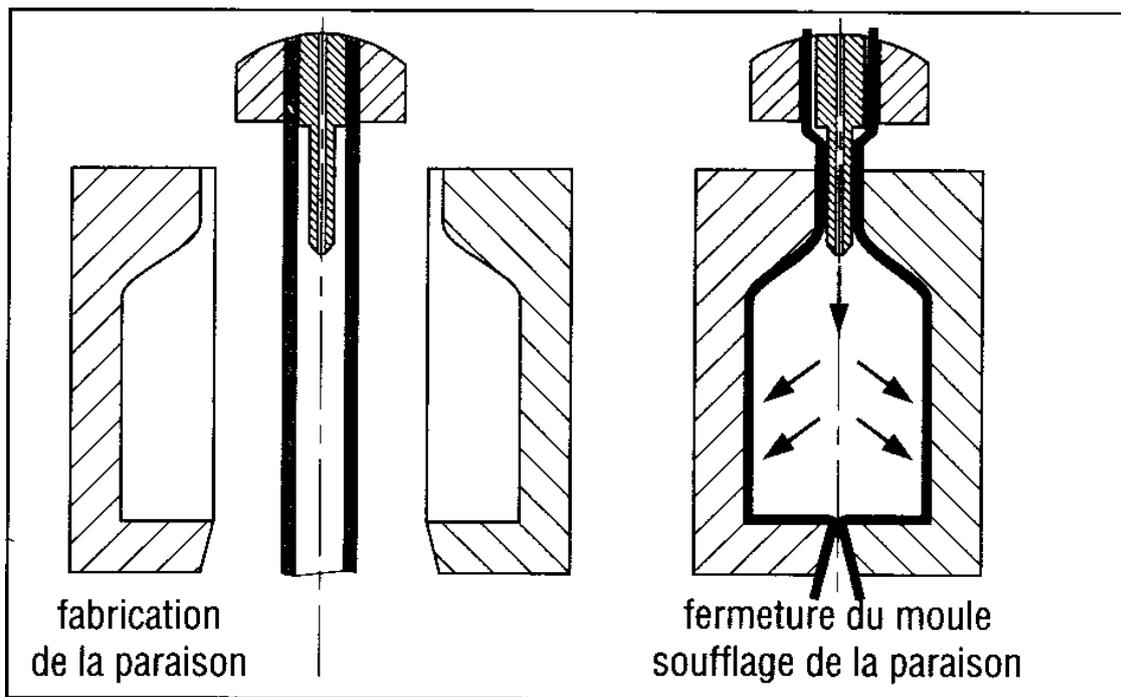


Figure V.2 Principe de fabrication d'une bouteille en extrusion-soufflage

Ces tubes alimentent une installation comprenant un réchauffeur qui amènera les tubes à la température de formage pour leur permettre d'être mis en place dans des moules de soufflage et soufflés pour obtenir le récipient voulu.

L'intérêt de ce processus à paraison froide est qu'il permet :

- Soit d'alimenter une installation de soufflage à grande cadence à partir de plusieurs extrudeuses,
- Soit de réaliser des installations de soufflage à fonctionnement intermittent alimentées par une extrudeuse placée ailleurs et pouvant tourner en continu.

La technique d'extrusion-soufflage-étirement utilise également une paraison froide.

Après obtention par extrusion normale de la paraison, celle-ci est refroidie. Dans la deuxième phase, la paraison est réchauffée à une température inférieure à celle de la première mise en

œuvre correspondant à la phase caoutchoutique du polymère traité. Le soufflage réalisé à cette température donne des matériaux présentant une orientation marquée. Cette technique est utilisée en particulier pour l'extrusion-soufflage du polypropylène et permet d'obtenir des corps creux présentant des qualités améliorées de transparence et de résistance au choc.

Soufflage de la paraison

La paraison dans le moule est gonflée à sa forme finale par introduction d'air comprimé.

Trois méthodes permettent l'introduction d'air comprimé dans la paraison :

- Soufflage par aiguille,
- Soufflage par buse,
- Soufflage par un mandrin de calibrage.

Soufflage par aiguille

Une aiguille creuse est insérée à travers la paroi de la paraison. Cette insertion est faite au-dessus du col du corps creux de façon à ce qu'il ne reste pas de trous dans le récipient terminé. Cette zone d'insertion est en effet éliminée dans les opérations de finition (sciage, alésage du col).

Soufflage par buse

La paraison vient coiffer une buse de soufflage, ou bien la buse peut venir se placer sur l'une ou l'autre extrémité du moule fermé. Dans ce dernier cas, il n'est pas nécessaire de mandriner le col du récipient.

Soufflage par mandrin de calibrage

Une partie de la filière, appelée mandrin de calibrage, est forcée, à grande vitesse, dans la zone du col du moule fermé sur la paraison. Sous l'effet de la compression, il se produit un moulage et une finition complète de la zone du col. Après ce moulage, l'air est soufflé à travers le mandrin pour former le récipient.

V.2.3. Extrusion-soufflage avec bi-étirage

C'est l'association de trois techniques : l'extrusion, le soufflage et le bi-étirage. Ces trois techniques peuvent être utilisées en ligne : c'est ce que l'on appelle le cycle chaud, ou procédé en une étape (la température de la préforme ne revient pas à la température ambiante et reste supérieure à la température de transition vitreuse du polymère).

On peut également utiliser ces techniques de façon séparée ; c'est ce que l'on appelle le cycle

froid, ou procédé en deux étapes (la préforme revient à la température ambiante avant l'obtention de l'objet final).

3.1 - Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

Dans ce procédé en une étape (Fig.V.3), 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.

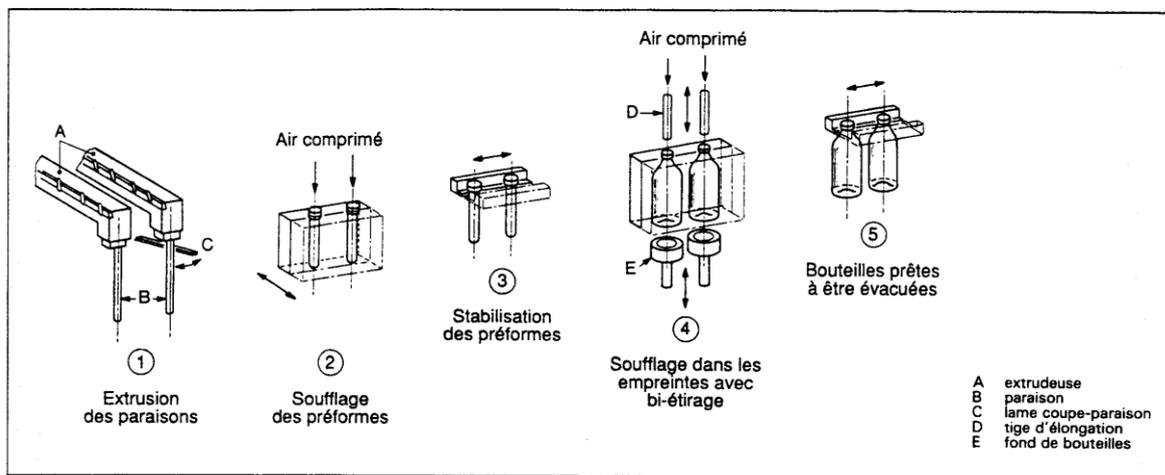


Figure V.3. Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud.

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.

3.2 - Extrusion-soufflage avec bi-étirage en cycle froid

Dans ce procédé en deux étapes, on procède comme précédemment à l'extrusion d'un tube qui est ensuite réchauffé aux extrémités, puis soufflé et étiré pour donner une préforme (Fig. V.4). Cette 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 (Fig. V.5). La matière se solidifie alors au contact des parois du moule pour donner le corps creux final.

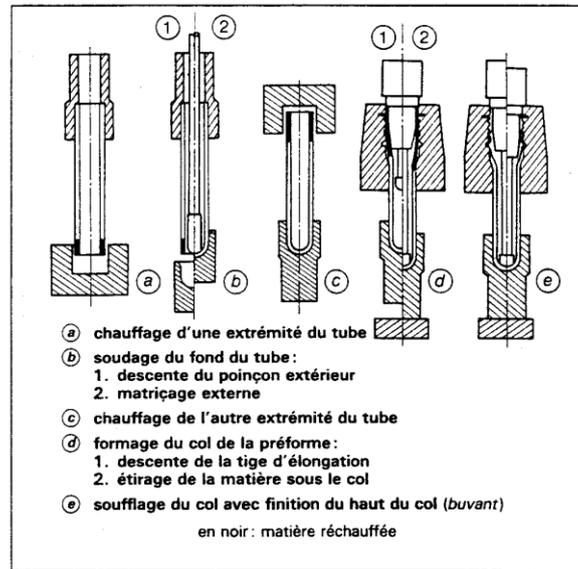


Figure V.4. Obtention d'une préforme à partir d'un tube.

Les avantages économiques d'une bi-orientation résident dans le gain en résistance mécanique qui permet de faire des récipients plus minces, soit une économie de matière d'environ 15 % pour fabriquer un objet de caractéristiques identiques.

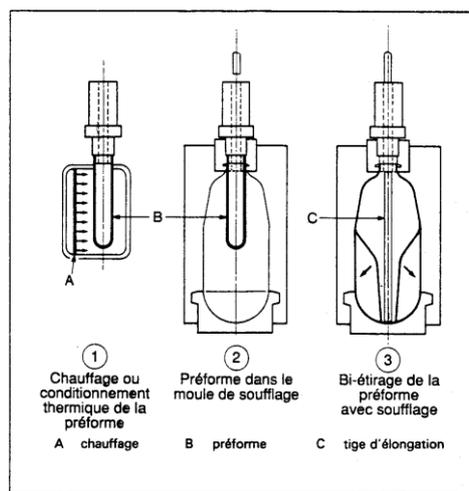


Figure V.5. Soufflage avec bi-étirage.

Par exemple, une bouteille de 35 g fabriquée par extrusion-soufflage, en étant reconçue, devient une bouteille de 30 g par soufflage bi-orienté. Pour une fabrication de 6 000 bouteilles par heure, le gain est de 720 kg de polymère par jour en produisant un objet équivalent. La résistance de la matière est telle que la fabrication de conteneurs pour les boissons carbonatées ou autres fluides sous pression devient intéressante, certaines fabrications résistent à des pressions supérieures à 5 bars.

V.2. 4. Conceptions des objets

Par extrusion-soufflage, il est possible de fabriquer des corps creux d'une contenance de quelques cm³ à quelques m³. Soit, du flacon à la citerne en passant par les réservoirs automobiles. Les formes peuvent varier du simple cylindre pour une bouteille, aux formes très complexes pour les réservoirs automobiles. Sans oublier des récipients plats ou cubiques avec des poignées, comme les bidons d'huiles ou de détergents.

Les éléments à prendre en compte pour concevoir un corps creux sont multiples :

- La forme des orifices,
- La soudure de la paraison,
- L'étirage de la matière pendant le soufflage,
- L'étirage de la paraison sous son propre poids,
- La programmation de l'épaisseur de la paraison,
- Le type de canne de soufflage et le choix du point de soufflage,
- La résistance de l'objet aux sollicitations mécaniques selon le cahier des charges,
- Le choix du matériau,
- La série, de 20 à 12 000 ou plus de pièces par heure,
- Le recyclage des matériaux.

Le dessin des objets demande un soin particulier quand ceux-ci possèdent une poignée, car il faut correctement souder la matière autour de la poignée et ensuite découper cette zone pour créer le passage de main autour de la poignée.

L'extrusion de deux ou plusieurs polymères peut permettre de créer des récipients multicolores ou avec une bande transparente pour rendre le niveau de liquide visible.

V.3. L'injection-soufflage

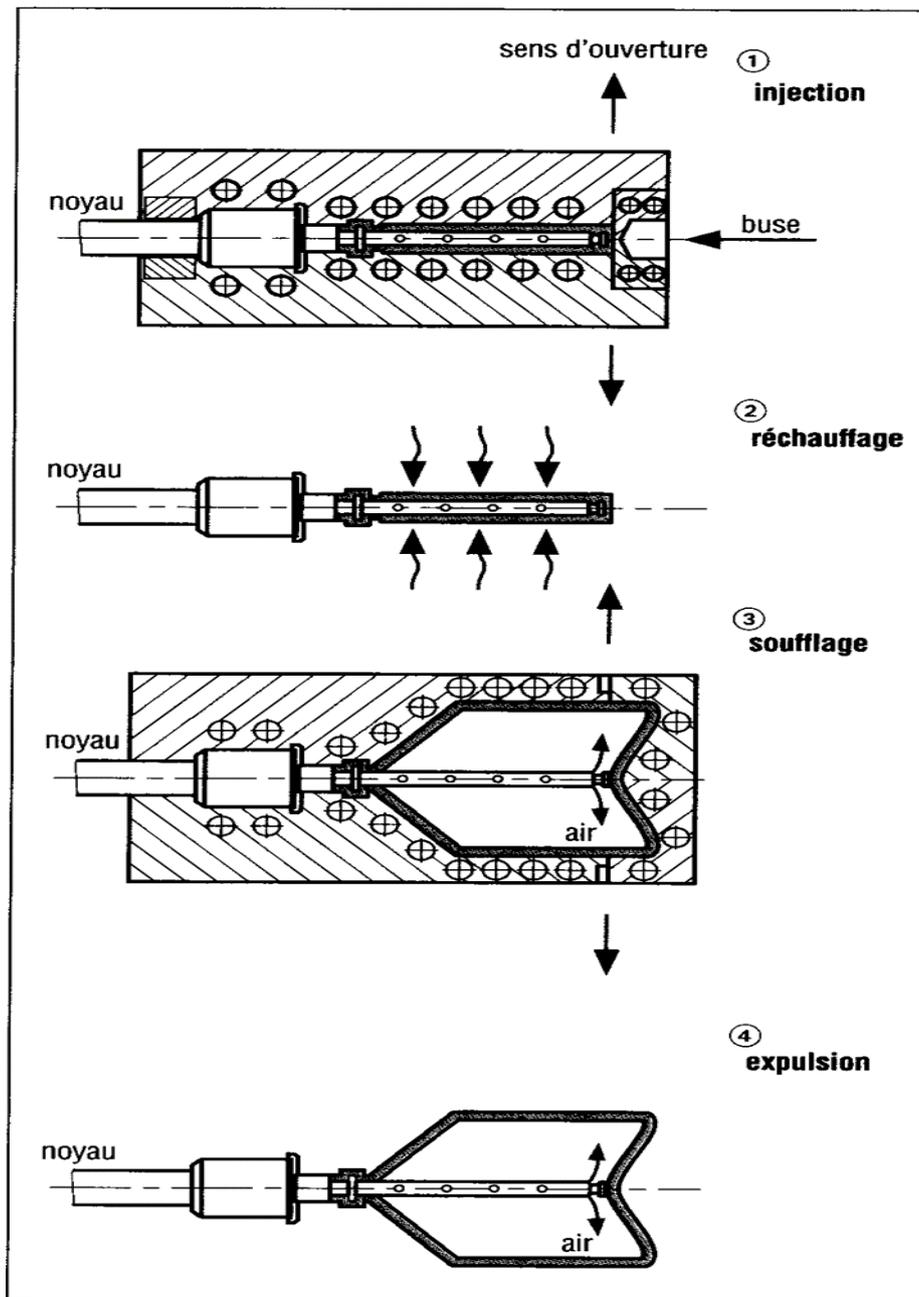
V.3.1. Principe de l'injection-soufflage

L'injection-soufflage permet de réaliser des corps creux qui présentent de bonnes propriétés mécaniques. Cette technique est essentiellement réservée aux thermoplastiques. Le cycle de fabrication se compose de quatre étapes (fig.V.6).

- 1°) Réalisation par injection d'une préforme.
- 2°) Transfert de cette préforme dans une station de réchauffage pour que le matériau soit réchauffé dans un domaine d'état caoutchoutique.
- 3°) Transfert de la paraison chaude dans un moule et soufflage pour que le polymère vienne en contact avec les parois du moule.
- 4°) Refroidissement et éjection de la pièce.

V.3.2 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.



FigureV.5. Séquence d'injection- soufflage

2.1. Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle chaud

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

- L'injection de la préforme puis, après conditionnement thermique, le soufflage avec bi-étirage du corps creux final (fig.V.7) ;
- 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 (fig. V.8).

2.1 - 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. En fait, le procédé industriel sépare très nettement l'obtention de la préforme et celle du corps creux final.

La préforme est obtenue par injection classique de la matière thermoplastique dans des moules multi-empreintes (première phase), puis est acheminée, éventuellement après stockage, vers la machine de soufflage avec bi-étirage. Lors de la phase finale, la préforme, qui se trouve à la température ambiante, est portée à la température de bi-étirage puis est étirée axialement par une tige d'élongation et radialement par gonflage à l'aide d'air comprimé. La matière se refroidit au contact des parois du moule et se solidifie à la forme désirée ; on peut alors procéder à l'évacuation du corps creux final (fig. V.9).

V.3.3. Conception des outillages

Les moules peuvent être mono ou multi-empreintes.

3.1 - L'alimentation des empreintes

Elle est réalisée par un système de canaux chauffants, pour éliminer la présence de carottes.

3.2 - Moule d'injection de la préforme

Les moules sont classiques dans leur conception sauf :

- Le centrage du noyau,
- La régulation fine de la température, les zones sensibles sont : le col, qui devra être solide, la zone de liaison avec la partie très soufflée, le fond du récipient et, au milieu, une zone de fort allongement. Ces diverses zones nécessitent, pour le soufflage, des températures, de la matière, différentes.

3.3 - Moule de soufflage

Ce moule doit assurer deux fonctions :

- Évacuer les calories de l'objet soufflé le plus vite possible, comme un moule d'extrusion-soufflage,
- Laisser évacuer l'air contenu dans le moule pour faciliter le soufflage.

V.4. Comparaison de l'injection-soufflage et de l'extrusion-soufflage

Ces techniques permettent de fabriquer des corps creux en grande série. En injection-soufflage, la forme intérieure de l'objet n'est pas obligatoirement homothétique de l'enveloppe extérieure (comme en extrusion-soufflage), ce qui autorise la conception de récipients avec des orifices de très grande résistance mécanique ou des pièces complexes avec des formes creuses.

L'injection-soufflage offre, par rapport à l'extrusion-soufflage, les avantages suivants :

- Élimination des lignes de soudure, pas de soudure sur le fond de l'empreinte,
- Fabrication précise du goulot des récipients, ou des parties fonctionnelles des pièces (réalisée à l'injection et indépendante du soufflage),
- Régularité des épaisseurs après soufflage d'où un gain de poids (on peut prévoir aux endroits très étirés des surépaisseurs au moulage),
- Possibilité de mouler des objets avec un grand facteur de forme.
- L'utilisation d'une préforme, permet de mieux programmer les épaisseurs de l'objet, grâce aux moules d'injection,

L'injection-soufflage comporte, par rapport à l'extrusion-soufflage, les inconvénients suivants :

- Les possibilités de formes sont plus limitées que par extrusion-soufflage, par exemple, il est très difficile de concevoir un récipient avec une poignée.

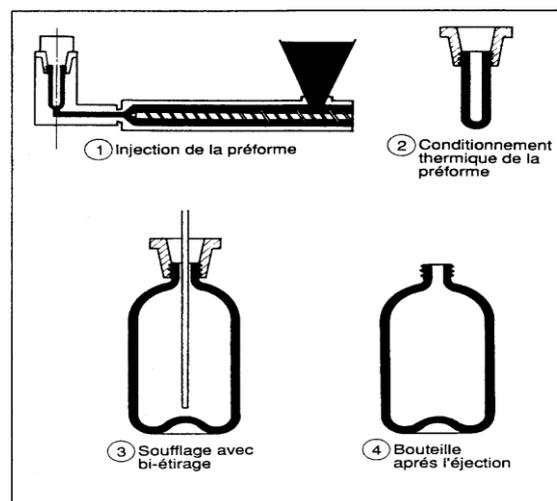


Figure V.7. Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle.

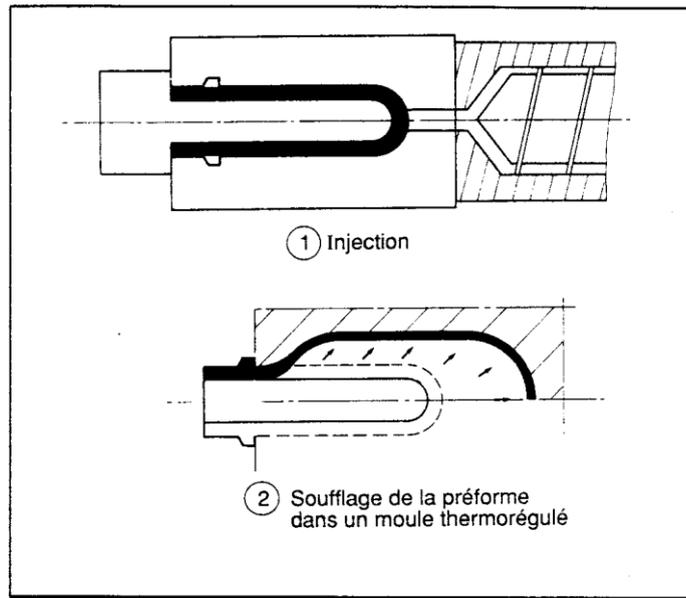


Figure V.8. Obtention d'une préforme par injection puis soufflage

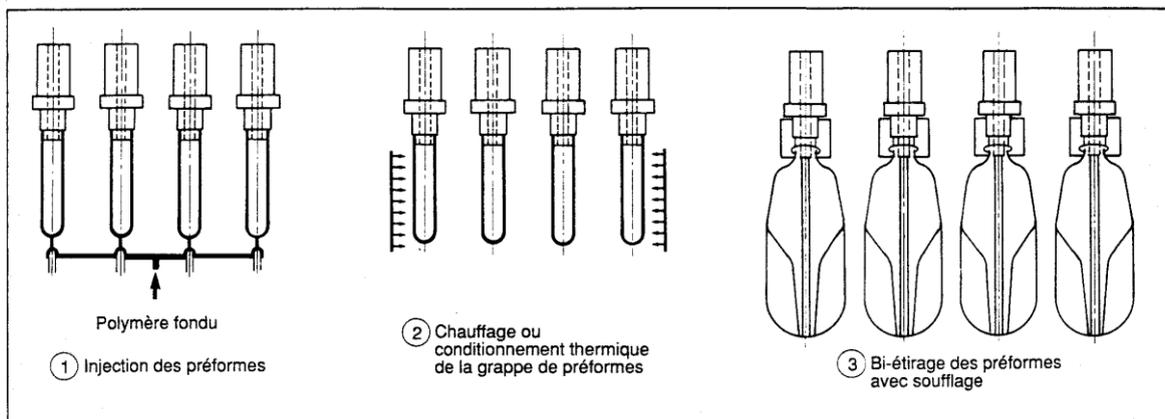


Figure V.9. Injection-soufflage avec bi-étirage en cycle froid.

Chapitre VI : Application de la rhéologie a la conception

VI.1. Filières d'extrusion

VI.1.1. Les problèmes thermiques et rhéologiques

L'extrudeuse doit assurer la fusion des polymères par la chaleur générée par le travail mécanique intense dans le système vis-fourreau. L'augmentation de la température au-delà des températures de fusion, fortement différentes suivant les polymères (tableau VI.1), est d'abord bénéfique en diminuant la viscosité des polymères.

Cependant, plus ou moins rapidement, il peut y avoir un commencement de dégradation avec perte de performances du polymère, dégagement gazeux, etc. La dégradation peut être favorisée par la présence d'humidité pour les polymères sensibles à l'hydrolyse tels que les polyéthylènes téréphtalates. En général, il est nécessaire d'apporter un complément de chaleur par un système de chauffage du fourreau mais, dans d'autres cas, il peut être nécessaire de refroidir pour limiter ou éviter toute dégradation.

VI.2. Fenêtres des températures de fusion et d'extrusion de différents polymères

Le tableau VI.1 présente quelques exemples de températures de fusion de diverses matières plastiques. Rappelons que les polymères cristallins tels les polyamides 6 ou 66 ont une fusion franche alors que les polymères amorphes comme le polystyrène passent lentement d'un état solide à un état de fluide visqueux.

Tableau VI.1 – Exemples de températures de fusion des thermoplastiques.

Polymère	Plage des températures de fusion (C°)	
	Minimum	Maximum
EVA	50	110
EMA	72	96
PB	98	126
PE-BD	110	120
PE-L	122	124

VI.3. Injection

VI.3.1. Etat du polymère dans le moule

VI.3.1.1. Thermique :

La famille des polymères comporte un grand nombre de matériaux aux propriétés très différentes. Néanmoins, une propriété commune est leur très faible conductivité thermique, environ 1000 fois plus faible que celle du cuivre. A titre d'exemple, il faut 10s pour qu'un refroidissement superficiel atteigne la profondeur de 1mm. Cette propriété explique la faible épaisseur des pièces plastiques injectées.

De plus, le polymère est injecté à l'état fondu, c'est-à-dire à une température supérieure à sa température de transition vitreuse T_c pour les amorphes et à sa température de fusion pour les semi-cristallins. Au cours du refroidissement, il va changer de phase et la faible conductivité thermique entraîne de forts gradients de températures. Il va donc se former une "peau" en surface. Cette couche solide a des propriétés mécaniques différentes du polymère fondu, notamment pour le frottement à la paroi. Ce gradient de température provoque un gradient dans les propriétés rhéologiques et thermiques du polymère. Le système ici est donc particulièrement complexe à résoudre, surtout si on s'intéresse à l'interface avec le moule : la nature du polymère en contact avec la surface est difficile à déterminer.

VI.3.1.2. Écoulement du polymère dans le moule :

L'étude de l'écoulement du polymère dans l'empreinte du moule regroupe énormément de phénomènes. Pendant l'injection, le phénomène est non isotherme. La vitesse du fluide le long des parois est souvent considérée nulle. Il se forme une gaine froide de matière solide qui amène la partie centrale de la veine à s'expansée pour remplir la section et continuer à s'écouler. Le débit de polymère fondu se fait principalement entre ces gaines.

La figure (VI.1) montre l'évolution de la vitesse et de la température du polymère lors de l'écoulement dans l'empreinte. La forte variation de température s'explique par la mauvaise conductivité thermique des polymères et la durée très courte de cette phase du cycle. Les variations de vitesse sont importantes. De plus, le cisaillement près de la paroi provoque un échauffement local du fluide.

Au cours de la phase suivante de compactage, le débit dans la cavité est relativement faible. La vitesse d'écoulement varie peu entre le centre et les parois. La pièce se solidifie au cours de la phase de refroidissement. Dès que ses propriétés mécaniques permettent de procéder à l'éjection sans altérer la pièce, celle-ci est éjectée et refroidit à l'air libre.

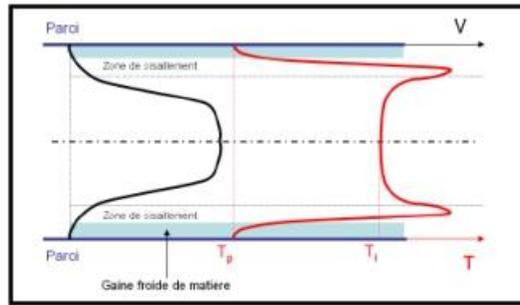


Figure VI.1. Vitesse et température du polymère lors de l'écoulement pendant la phase d'injection.

Cette présentation rapide montre que la physique et par conséquent la modélisation de l'écoulement du polymère au cours du cycle dans la cavité est très complexe et nécessite de prendre en compte les changements d'état, les phénomènes de cisaillement, de rhéologie non-newtonienne, ... Cette complexité rend impossible l'intégration de ces phénomènes dans le modèle pour calculer le chargement sur la surface du moule.

Le polymère restant une condition aux limites sur la surface. Il est représenté par des champs de contraintes normales et tangentielles et un flux thermique à la surface.

VI.3.1.3. Spécificités de la phase du remplissage :

La phase du remplissage du moule est la phase dynamique de transfert de matière dans le moule. Il y a progression du front de matière, dont il faut déterminer à chaque instant la position.

Le temps de remplissage est court, de l'ordre de quelques secondes, et donc les débits d'injection sont élevés, de l'ordre de 100 à $1\,000\text{ cm}^3/\text{s}$. En combinaison avec la forte viscosité des polymères, la dissipation d'énergie est donc importante, et la température de la matière peut augmenter localement malgré le refroidissement du moule. De plus les pressions sont importantes, de l'ordre de plusieurs dizaines de méga Pascals.

Les polymères étant peu conducteurs de la chaleur, la température à cœur est proche de la température d'injection, tandis qu'à la paroi elle est proche de la température du moule. La viscosité des polymères dépendant fortement de la température, il faut évaluer avec précision les gradients thermiques, et coupler étroitement les calculs mécaniques et thermiques.

VI.3.2. Principales hypothèses :

Le polymère est supposé avoir un comportement purement visqueux. En effet, on peut négliger la composante élastique du comportement si les déformations de cisaillement sont

prépondérantes. C'est le cas de nombreuses pièces dont l'épaisseur est assez régulière. Cependant, il existe toujours des régions, souvent localisées, comme les seuils, où les déformations élongation elles sont non négligeables, et où l'approximation purement visqueuse n'est plus licite.

Les données de viscosité sont disponibles pour différents taux de cisaillement et différentes températures, mais il faut les interpoler, et surtout les extrapoler en dehors du domaine de mesure (forts taux de cisaillement). Le plus simple est d'utiliser un lissage en « loi puissance », mais il est préférable d'employer une loi permettant de rendre compte d'un plateau newtonien à bas taux de cisaillement, comme la loi de Carreau ou de Carreau Yasuda.

La viscosité est supposée indépendante de la pression, mais ceci peut être contestable pour les grandes pièces ou pour des polymères très visqueux.

Les forces de masse et d'inertie sont le plus souvent négligées. Il est à noter que ces dernières pourront jouer un rôle dans certaines situations où l'accélération est importante, par exemple dans un seuil de petite section.

On peut supposer le polymère incompressible. Cela est réaliste dans de nombreuses circonstances, car les niveaux de pression atteints pendant le remplissage ne sont pas trop élevés. Cela devient moins vrai vers la fin de cette phase et à la transition avec la phase de compactage. De plus, on néglige également la variation de masse volumique avec la température.

La conduction de chaleur dans le sens de l'écoulement est négligée devant la convection, ce qui est justifié par la faible conductivité thermique des polymères. En première approximation, nous considérerons que la conductivité thermique du polymère est indépendante de la pression et de la température.

Chapitre VII : Régénération des déchets des polymères

VII.1. Introduction :

Bien entendu, l'intérêt porté à la valorisation des matières plastiques peut être lié à la diminution des ressources mondiales en matières premières et à la législation concernant la protection de la nature et la préservation de la qualité de l'environnement. Certaines mesures réglementaires sont actuellement prises pour encourager le recyclage en vue de conserver les ressources naturelles pour les générations futures dans des perspectives de développement durable. D'où la nécessité de trouver des techniques non polluantes de recyclage de ces matériaux polymères.

VII.2. Sources des déchets plastiques :

Il existe deux principales sources de déchets plastiques : Les déchets issus des sous-produits industriels, faciles à collecter car les stocks sont homogènes, non pollués et facilement identifiables. Ces déchets sont généralement directement recyclés par le producteur. Les déchets de post-consommation. Ils sont principalement collectés dans les ordures ménagères. Ces matériaux sont généralement pollués, mélangés et incompatibles entre eux, ce qui rend difficile leur simple mélange ou compactage pour en faire de nouveaux produits.

VII.3. Différentes méthodes de valorisation des déchets de matières plastiques :

En dehors de la mise en décharge, polluante et de plus en plus réglementée, trois voies principales de valorisation des déchets plastiques sont possibles :

VII.3.1. Valorisation énergétique :

Il s'agit du traitement des déchets plastiques par incinération (combustion totale), avec ou sans récupération d'énergie. Les déchets plastiques constituent un apport calorifique non négligeable qui peut être valorisé par récupération de la chaleur produite utilisable directement pour le chauffage ou sous forme d'énergie électrique. Pratiquement tous les plastiques peuvent être incinérés. Cependant, la dégradation de certains matériaux peut dégager des composés toxiques (acide chlorhydrique dans le cas du polychlorure de vinyle, acide nitrique pour le polyamide, acide sulfurique pour certains caoutchoucs...).

VII.3.2. Recyclage chimique :

Cette valorisation vise à décomposer les molécules constituant des déchets plastiques en matières premières (monomères, oligomères ou combustibles) réutilisables dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie.

On distingue :

La pyrolyse : c'est la décomposition des molécules par chauffage sous vide. Ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.

L'hydrogénation : C'est le traitement par l'hydrogène et la chaleur des macromolécules qui sont craquées en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.

La gazéification : les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol, d'ammoniac ou comme agent réducteur dans la production d'acier.

La décomposition chimique proprement dite : On applique des procédés tels que l'hydrolyse, l'alcoolyse, etc. Les applications de cette voie de recyclage, attrayante dans son principe, sont jusqu'à présent limitées, à des polymères comme le polyamide (PA), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le et le poly méthacrylate de méthyle (PMMA), du fait de problèmes pratiques et de rentabilité. Ce principe de recyclage n'en est encore qu'à un stade pilote.

VII.3.3. Recyclage mécanique :

Le principe de ce type de valorisation des déchets est plus ou moins complexe et est envisagé depuis de nombreuses années. Il regroupe l'ensemble des méthodes de valorisation des déchets plastiques dans lesquelles les matériaux sont réutilisés tels quels ou après modification chimique. Il apparaît de loin comme la meilleure solution pour le traitement des déchets solides puisque toutes les méthodes citées auparavant sont de nature destructive.

Un certain nombre d'opérations doit être prévu avant le recyclage mécanique : il s'agit de la collecte, du tri, de la ségrégation des plastiques, du déchiquetage, du lavage, du séchage et de la granulation.

La collecte : La collecte constitue une contrainte majeure, ce qui impose une organisation efficace afin de diminuer le coût de transport, qui une fois maîtrisé réduira considérablement le problème de la récupération. Les déchets en phase post-consommation sont généralement mélangés et pollués lorsqu'on les récupère dans le flux des déchets municipaux. C'est pour cette raison que des efforts ont été faits pour encourager les consommateurs à séparer les types

de déchets en matières plastiques, au moins ceux qui sont faciles à identifier. Il peut s'agir par exemple de bouteilles ou de sacs de supermarché. Il existe plusieurs types de collecte :

- ◆ La collecte globale : c'est une collecte multi matériaux où la phase organique des ordures ménagères est mélangée avec l'ensemble des autres déchets.
- ◆ La collecte sélective : elle a pour objectif de sélectionner, au départ des ménages, un ou plusieurs types de matériaux afin de faciliter leur valorisation ou leur élimination ultérieure.
- ◆ La collecte spécifique : exemple : bouteilles PET transparentes.

Le Tri : La récupération des matières plastiques dans les déchets municipaux mélangés, demande actuellement beaucoup de main-d'œuvre et il faudra se concentrer sur la mise au point de systèmes automatisés économiques. La capacité à séparer les matières plastiques pour un coût raisonnable est un facteur clef dans le développement éventuel d'une technologie de recyclage. Il s'agit de séparer la fraction plastique des autres fractions à savoir : les papiers, les textiles, les métaux et les verres et de séparer ensuite les différents types de matières plastiques. Il s'effectue généralement en plusieurs étapes :

- Le tri généralement manuel sur un tapis convoyeur ;
- Le broyage grossier d'abord, puis fin des matières plastiques ;
- Le lavage ;
- Le tri automatique des constituants qui met à profit les différences de propriétés physiques caractérisant les composants des déchets : la taille, la densité, la susceptibilité magnétique, la conductivité électrique, la couleur, etc.
- La séparation par voie chimique peut également parfois permettre d'extraire préférentiellement un polymère du mélange de déchets par dissolution et précipitation différentielle. Cette technique de recyclage semble aisée, mais elle se heurte à de nombreux problèmes. En effet, les méthodes de séparation et de tri des matières plastiques sont onéreuses et ne se justifient que pour des produits d'un coût élevé. D'autre part, les déchets en phase postconsommation sont généralement pollués lorsqu'on les récupère dans le flux des déchets municipaux. La pollution par les contenus (huile, graisse, produits chimiques...), les étiquettes, les bouchons, les charges, les inserts et les stabilisants qui sont entrés en contact avec le polymère lors de son utilisation peut entraîner une forte modification des propriétés du matériau après une seconde mise en œuvre (plastification, Dégradation accélérée) et même un faible taux de polluants peut modifier de façon importante les propriétés. Ces polluants peuvent donc constituer des obstacles sérieux au recyclage parce qu'ils sont difficiles et coûteux à éliminer.

Enfin, les propriétés mécaniques des produits recyclés sont généralement différentes de celles des polymères purs de départ, dans le sens où ils peuvent contenir des additifs et subir une dégradation de leurs propriétés du fait du vieillissement subi lors de la transformation, de la phase d'utilisation et du processus de recyclage. Il est donc difficile de réutiliser les polymères pour les mêmes applications que les matériaux initiaux. Pour pallier aux problèmes de dégradation, le « remède » est généralement la dilution dans de la matière vierge et, dans le contexte industriel, on ne cherche quasiment jamais à « restaurer » parfaitement la microstructure du polymère (architecture et masse molaire des chaînes macromoléculaires). En essayant de contourner ces problèmes, certains industriels ont développé des procédés de recyclage des matières plastiques en mélanges dans la mesure où l'ensemble des fractions polymères considérées garde après mélange une bonne aptitude à la transformation selon les procédés conventionnels sans qu'il y ait une macro-séparation de phases néfaste aux propriétés.

VII.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères :

Il peut s'avérer pratiquement (séparation délicate) ou économiquement (diminution du coût de recyclage en évitant l'étape de tri) intéressant de recycler des déchets plastiques sous forme de mélanges contenant deux produits ou plus ; le problème est que les polymères impliqués sont généralement incompatibles, lorsqu'on veut faire un mélange, on essaye de disperser au mieux une phase dans l'autre. Pour cela, on est parfois amené à utiliser un composé supplémentaire qui permettra de compatibiliser le mélange en améliorant ses propriétés. Plusieurs causes peuvent expliquer les problèmes de mise en pratique du recyclage des matières plastiques en mélanges :

- Le contrôle de la source des déchets est délicat, mais semble indispensable pour connaître la composition précise des déchets, de sorte à traiter des mélanges de composition reproductible.
- La plage de température de mise en œuvre d'un plastique est souvent limitée. Quand il s'agit de mélanges, le choix de la température de transformation est critique car elle est liée à la dégradation et au comportement à l'état fondu, un mauvais choix peut entraîner des altérations de propriétés dans le mélange final (Figure VII.1).

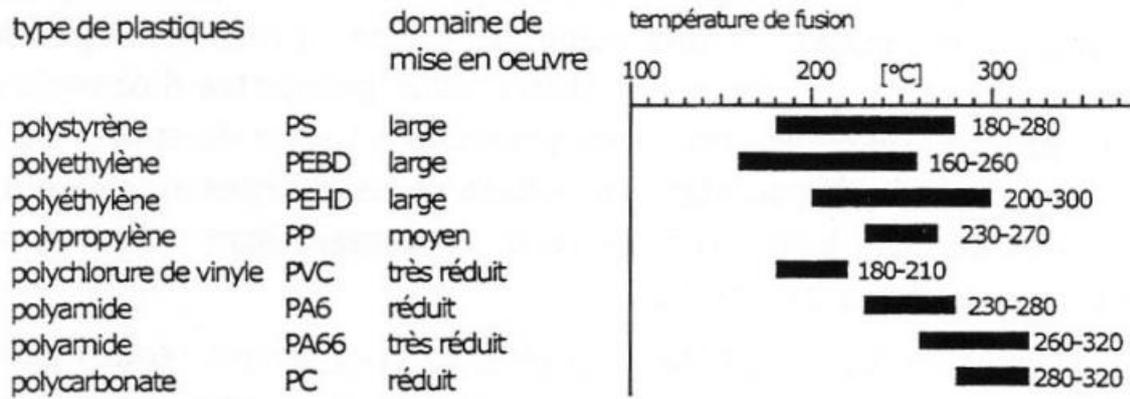


Figure VII. 1. Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques.

Les plastiques se subdivisent en des nombreuses classes différentes aux caractéristiques souvent incompatibles.

C'est la maîtrise de la compatibilité des matières plastiques qui devrait permettre d'effectuer, durant la conception de produits (automobiles, appareils électriques, ...) des choix de matières intégrant leur 'cycle de vie' complet (particulièrement leur recyclage en fin de vie).

Références bibliographiques

1. R. Buvet, P. Sigault: *Chimie macromoléculaire I*, Hermann, Saint- Germain, Paris VI (1970)
2. J. Bost : *Matières Plastiques - Technologie et Plasturgie*, Lavoisier, Paris (1982)
3. S. Philipon : *Injection de polymère fondus dans les moules : étude numérique des phénomènes thermomécaniques durant la phase de remplissage*. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris (1989).
4. E. Relot : *Modelisation physique et numerique du proced de mise en forme par trempage*. These de Doctorat, 'Ecole des Mines de Paris (2008).
5. G.W. Ehrenstein, F. Montagne : *Materiaux polymères - structure, propriétés et applications*, HERMES Science publications, Paris (2000).
6. M. Biron : *Aide-mémoire- Transformation des matières plastique*, Dunod, Paris (2010). ISBN 978-2-10-055301-3
7. Marc Carrega : *Aide-mémoire-Matières plastiques*, 2^e édition, Dunod, Paris (2005, 2009). ISBN 978-2-10-054536-0
8. J. Brandrup: *Recycling and Recovery of Plastics*, Hanser Publishers (1996), ISBN 3-446-18258-6.
10. N. Minf : *Elaboration et caractérisation de Mélanges Complexes à base de Polypropylène en vue de son éco-conception et de son Recyclage dans les véhicules hors d'usage*. These de Doctorat (2008).
11. C. G. Gogos et Z. Tadmor: *Principles of Polymer Processing*, John Wiley, New York (1978).
12. P. Dubois : *Plastiques Modernes*, Lavoisier, Paris (1963).
13. J. Bost : *Matières plastique -chimie applications*, 2^e Edition, Technique et Documentation (Lavoisier), Paris (1985).
14. L. Mascia: *Thermoplastics - materials Engineering*, Elsevier publishing Co. Inc, New York (1989).
15. J. F. Agassant, P. Avenas et J. Ph. Sergent : *Mise en Forme des Matières Plastiques*, Lavoisier, Paris (1986).

16. P.J. Trotignon et A. Dobraczynski – M. Piperaud : *Matières Plastiques - Structures- Propriétés, Mise en œuvre, Normalisation. Editions Nathan, Paris (1996).*
17. C. Geneau, *Procède D'élaboration D'agro-Matériau Composite Naturel Par Extrusion Bivis Et Injection Moulage De Tourteau De Tournesol, thèse doctorat Polytechnique de Toulouse (2006).*
18. F. Michel et G. Yves : *Chimie et Physico-Chimie des Polymères. 2e et 3e Cycles Ecole d'ingénieurs, Paris (2002).*
19. X. Guo and A.I. Isayev. *Residual stresses and birefringence in injection molding of semicrystalline polymer. part ii: Experiment and simulation. International Polymer Processing XIV, 4 : 387–398, 1999.*
20. J. Besson, *Matériaux pour l'ingénieur, Ecole nationale supérieure des mines de Paris Publié par Les Presses - Mines Paris, (2006) ISBN 2911762681, 9782911762680*
21. K. Hans-Henning, H. Nicole. et J.P. Christopher : *Matériaux Polymères : Propriétés Mécaniques et Physiques. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lyon (2001).*
22. R. Deterre et G. froyer : *Introduction aux Matériaux Polymères, Techniques et Documentations – Lavoisier, Paris (1997).*
23. J.F. Agassant et M. Vincent : *Modélisation de l'Injection- Remplissage des moules. Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Doc.AM3 695, (CD-ROM.ver.2001)*
24. J.F. Agassant, P. Avenas, J.Ph. Sergent, B. Vergnes et M. Vincent : *La mise en forme des matières plastiques. Édition, Lavoisier, Paris (1996).*
25. F. Hensen : *Plastics Extrusion Technology. Hanser, Munich (1997).*
26. P. Mousseau, A. Sarda et R. Deterre : *Thermique de l'injection des thermoplastiques. Optimisation (2006).*
27. S. Philipon : *Injection de polymère fondes dans les moules : étude numérique des phénomènes thermomécaniques durant la phase de remplissage. Thèse de doctorat, École des Mines de Paris (1989).*
28. B. Vergnes, S. Puissant : *Extrusion monovis technique d'ingénieur (2003).*
29. T. Munch : *Moules pour l'injection des thermoplastiques – Généralités et périphériques. Technique d'ingénieur (2010).*

30. *J.F. Agassant, P. Avenas, J. Ph. Sergent et M. Vincent : La Mise en Forme des Polymères. Approche Thermomécanique de la Plasturgie, Tec et Doc (2014).*
31. *J.F. Agassant : Les principes de base de la modélisation des procédés de mise en forme des polymères. Rhéologie (2012).*
32. *J.D. Dealy, K.F. Wissbrun : La rhéologie des polymères fondus et son rôle dans la transformation des matières plastiques – Théorie et applications. Van Nostrand Reinhold, (1990).*
33. *T. Kallel-Kossentini : Etude de mélanges PE/PS – Contribution au recyclage. Thèse de Doctorat Lyon, INSA (2003).*