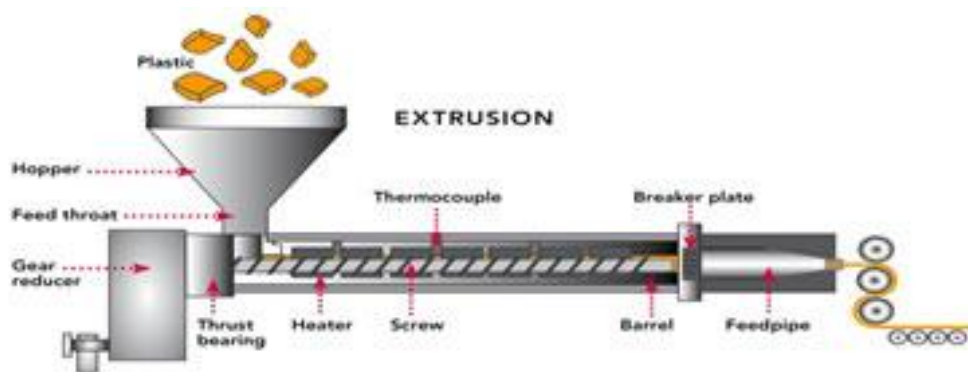


Polycopie de cours

Matière : Procédés de transformation et mise en forme des Matériaux

Niveau : Master I Génie des Procédés des Matériaux



Présenté par

Dr. CHIBANI NACERA

Sommaire

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES PROCEDES TECHNOLOGIQUES DE FABRICATION DES MATERIAUX	1
I.1. Définition d'un procédé industriel	1
I.2. Notion sur l'optimisation des procédés.....	1
I.3. Paramètres d'influence du procédé	3
I.4. Passage de la méthode à la technique vers le procédé	4
I.5. Comparaison entre procédé à l'échelle du Laboratoire et à l'échelle Industrielle.....	5
I.6. Mise en place du procédé industriel.....	5
Aides au choix du matériau	6
Indice des matériaux.....	7
Indices de performance pour les matériaux.....	9
Calcul de la limite de résistance pour la performance maximale des ressorts	10
I.7. Etapes du processus de fabrication des matériaux	10
CHAPITRE II. TYPOLOGIE DES PROCEDES	12
II.1. Primaire	12
Forme de la pièce moulée.....	13
II. 2. Secondaire	13
II.3. Tertiaire	14
CHAPITRE III: CLASSIFICATION DES PROCEDES DE MISE EN FORME.....	15
III.1. Par enlèvement de matière	15
III.2. Par déformation	15
III.3. Par moulage.....	16
III.4. Techniques de pointes	16
CHAPITRE IV. PROCEDES DE MISE EN FORME DES MATERIAUX METALLIQUES	17
IV.1. Préparation des matières premières.....	17
Matières Minérales	17
Extraction des métaux (élaboration des métaux)	17
IV.2. Processus de fusion des composés métalliques.....	18
IV.3. Forgeage.....	19
Avantages du forgeage	19
IV.3. Fonderie	19
Rôle et possibilités de la fonderie	20
Moulage.....	20
Classement des procédés de moulage	20
IV.4. Emboutissage	22

IV.5. Frittage	23
CHAPITRE V. PROCÉDES DE MISE EN FORME DES POLYMERES ET DES COMPOSITES (MISE EN FORME DES COMPOSITES A MATRICE THERMODURCISSABLE)	25
V.1. Rhéologie des polymères.....	25
Caractéristiques de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques.....	25
Comportement pseudo plastique	26
Comportement viscoélastique	27
Aspects phénoménologiques de l'élasticité.....	29
Extension uniaxiale	29
Contraction latérale et coefficient de Poisson	30
Viscoélasticité linéaire.....	30
V.2. Procédés industriels de transformation et fabrication des polymères	32
Polymérisation en suspension	33
Polymérisation en masse	34
Polymérisation en émulsion	35
Polymérisation en phase gazeuse	36
Polymérisation en solution	37
V.3. Solidification et mise en forme des polymères	37
Extrusion	37

CHAPITRE I : NOTIONS SUR LES PROCÉDES TECHNOLOGIQUES DE FABRICATION DES MATERIAUX

I.1. Définition d'un procédé industriel

C'est la méthode à suivre pour obtenir un produit et, pour prendre un exemple simple, on peut dire qu'un procédé s'apparente à une recette de cuisine... Le procédé est immatériel et se présente sous la forme d'un texte accompagné de schémas explicatifs formant le « livre du procédé » (process data book). On y décrit les ingrédients à utiliser, les moyens matériels à prévoir, les opérations à exécuter et les conditions (pression, débit, température, etc.) à respecter pour obtenir le produit à fabriquer, en quantité (capacité de production) et en qualité. Le procédé doit être matérialisé par une unité de production ou processus.

I.2. Notion sur l'optimisation des procédés

Au cours de ces dernières années, les exigences de qualité et sûreté de fonctionnement, exprimées par les clients, ont contraint les entreprises à concevoir et réaliser de nouveaux produits exempts de défaillances dans leurs utilisations nominales. De ce fait, les contraintes au niveau de la fabrication sont de plus en plus sévères. Dans le cas des procédés de mise en forme (pliage, emboutissage, extrusion ou découpage), la maîtrise, l'optimisation et la réduction de la variation des caractéristiques (Figure 1) des pièces fabriquées sont des composantes essentielles de la qualité des produits.

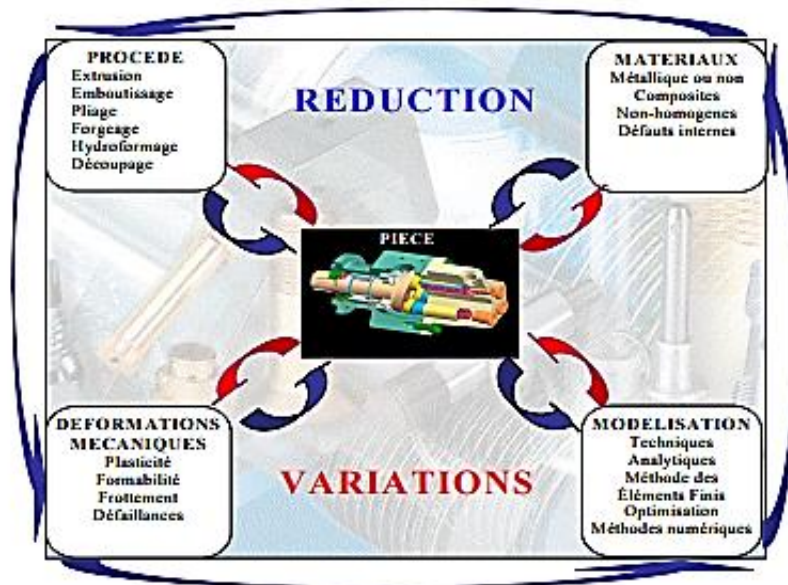


Figure1. Facteurs influençant la variation des caractéristiques des pièces.

Actuellement, les méthodes d'optimisation des procédés de mise en forme sont basées sur des approches essentiellement empiriques qui ne permettent pas d'estimer rigoureusement la sensibilité des performances du produit par rapport aux paramètres influents du procédé. Ces méthodes consistent, généralement, à effectuer des calculs aléatoires permettant d'identifier l'optimum. Malgré les progrès réalisés dans ce domaine il existe encore de nombreuses pistes d'amélioration telles que :

- Prise en compte des modes de défaillances observés (pièces, outillages)
- Développement de méthodes d'optimisation rapides et paramétrées
- Développement d'un support informatique pour une utilisation industrielle conviviale.

L'optimisation des procédés de mise en forme consiste à déterminer les conditions opératoires optimales afin de :

- Minimiser ou réduire un mode de défaillance redouté (usure, fatigue, etc.)
- Minimiser les coûts de la production
- Maximiser une performance recherchée (durée de vie de l'outil, cadence, résistance des pièces, etc.)

L'optimisation des procédés reste une préoccupation majeure des chercheurs. Le processus d'optimisation, nécessite des connaissances qui vont souvent au-delà de leurs spécialisations. Par conséquent on peut dire que l'optimisation des procédés est à l'interface de trois disciplines :

Les mathématiques qui fournissent les algorithmes et les stratégies d'optimisation

La mécanique qui offre les modèles, les hypothèses et les outils de simulations numériques

L'informatique qui permet la mise en œuvre des deux disciplines précédentes afin d'automatiser le calcul (Figure 2).

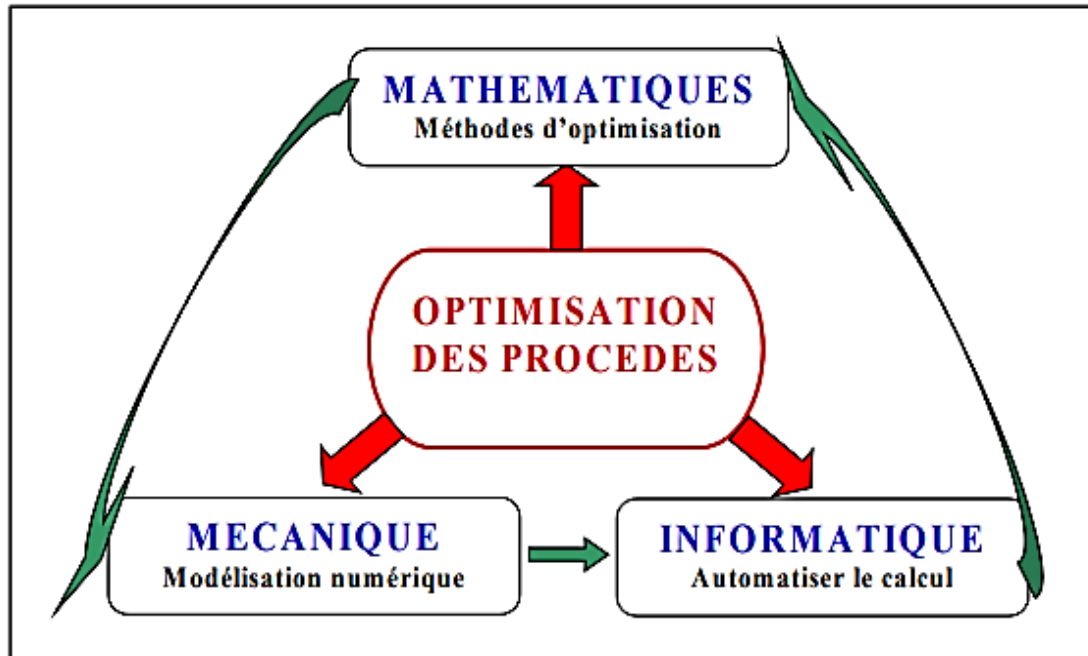


Figure 2. Les disciplines de l'optimisation des procédés

I.3. Paramètres d'influence du procédé

Les performances mécaniques des pièces de structures dépendent fortement du matériau utilisé et de son procédé de transformation. La « Mise en forme des matériaux s'intéresse aux matériaux lors de la transformation par déformation plastique (état solide), solidification (état liquide) ou compactage(poudres) dans tous les grands secteurs industriels : industrie du transport (ferroviaire, automobile aéronautique), de l'emballage, de l'énergie, du nucléaire et de la santé.

Quel que soit la technique utilisée, il est primordial de se poser les questions suivantes:

Quel est le matériau envisagé et le degré de complexité des pièces fabriquées?

Quel est le type de machine envisagée et quelle est sa puissance?

Quelle est la température de fabrication des pièces?

Quel est le coût optimal de fabrication?

Quelle est la cadence de fabrication des pièces?

Pour la mise en forme de structure massive les principaux paramètres influents sont :

Température

Matériau et ses caractéristiques

Géométrie des outils

Vitesse et pression de frappe

Exemple les gradients de température entre la pièce chaude et l'outil plus froid induisent un refroidissement superficiel de la pièce, des écarts de contrainte d'écoulement qui tendent à modifier l'écoulement plastique avec des conséquences parfois néfastes :

Géométriques (dimensions, écarts de forme) ;

Mécaniques (contraintes résiduelles) ;

Métallurgiques (structure, taille des grains, fissures).

Pour la mise en forme des structures minces la réussite de la mise en forme dépend des paramètres suivants :

Caractéristiques mécaniques ;

Forme des outils ;

Vitesse de mise en forme ;

Lubrification des pièces et des outils.

Pour les procédés d'enlèvement de matière (perçage, fraisage, tournage), les principaux paramètres sont :

Conditions de coupe (angle de coupe, pas, vitesse, ductilité matériau) ;

Efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;

Fractionnement du copeau ;

État de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;

Tenue des cotes ;

Durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures.

I.4. Passage de la méthode à la technique vers le procédé

Plusieurs approches, décrites dans la littérature sont développées en vue de contrôler le procédé à une échelle et de le transposer à une autre échelle. Parmi celles-ci, il est possible de citer :

Les méthodes basées sur le suivi d'un paramètre, représentatif d'une ou de plusieurs propriétés de la masse humide ou des granulés secs, comme la puissance consommée.

La modélisation du procédé à l'aide d'un plan d'expériences. Elle permet d'estimer la qualité des granulés produits lorsque les conditions opératoires sont modifiées à l'intérieur du domaine étudié.

La modélisation des bilans de population. Actuellement, ces modèles sont utilisés comme outils d'étude. Ils semblent prometteurs pour le contrôle de procédé, mais n'ont jamais été utilisés pour la transposition d'échelle.

I.5. Comparaison entre procédé à l'échelle du Laboratoire et à l'échelle industrielle

Différents critères dirigent la conception des produits et de leurs processus de fabrication dans le milieu industriel tels que le coût et la cadence, cependant des critères liés à la performance des produits sont importants. Cela ne veut pas dire que des démarches d'analyse et de réduction des coûts ne soient pas constamment mises en place.

On peut identifier les critères suivants, gravitant autour du tryptique Qualité-Coût-Délai :

Qualité : masse du produit, performance mécanique ;

Coût : coût matières, coûts d'investissement, coût de production ;

Délai : temps de fabrication, temps de cycle.

I.6. Mise en place du procédé industriel

Une pièce est un élément d'un produit qui participe à la réalisation des fonctions techniques par ses formes fonctionnelles. Le plus souvent, elle est réalisée avec un seul matériau. Elle est obtenue par une ou plusieurs transformations de la matière depuis un état initial (appelé brut) à un état final (produit fini). Le processus industriel d'obtention de la pièce est organisé chronologiquement, il mobilise un ou plusieurs procédés, les outillages correspondants, les équipements et les savoir-faire métiers, le tout dans des conditions économiques données. Le choix du matériau et du procédé sont intimement liés et doivent donc être fait simultanément. Le concepteur est alors confronté à deux difficultés :

- la première difficulté tient au statut des différents variables qu'il manipule. Il faut en particulier se poser la question de ce qui est donné (imposé, donc non modifiable), ce qui est modifiable (donc qui doit faire l'objet d'un choix) et ce qui est résultant (d'autres choix).
- la deuxième difficulté tient à la nature même du problème de choix des matériaux. Sauf exception, ce choix n'est pas indépendant d'autres choix de conception, qu'il s'agisse des procédés de fabrication, des formes, de l'architecture du produit...

Aides au choix du matériau

Les méthodes de choix sont basées sur l'utilisation de bases de données qui associent les matériaux et les procédés. Pour réaliser le choix de ces milliers de références, on utilise les critères définis en conception ou identifiés dans le cahier des charges. Plusieurs méthodes sont alors possibles suivant les informations dont on dispose et le degré d'optimisation souhaitée : sélection basée sur les propriétés : possibilité de choix direct, de poser des limites ou d'effectuer des comparaisons.

Sélection par comparaison des indices de performance.

Sélection multi-contrainte et multi-objectif.

Ces méthodes peuvent être utilisées simultanément dans un même choix de matériau.

Sélection à partir des diagrammes de propriétés comme le montre la figure 3.

Cette méthode consiste à rechercher les matériaux répondant aux critères choisis suivant trois types de sélection :

par choix direct : on sélectionne par exemple uniquement les matériaux usinables ou uniquement les matériaux ferreux.

En posant des limites : on sélectionne les matériaux dont une propriété, par exemple le dureté, est supérieure à une valeur spécifiée.

Par comparaison : on génère un diagramme d'une propriété en fonction d'une autre. On peut ensuite sélectionner graphiquement les meilleurs compromis.

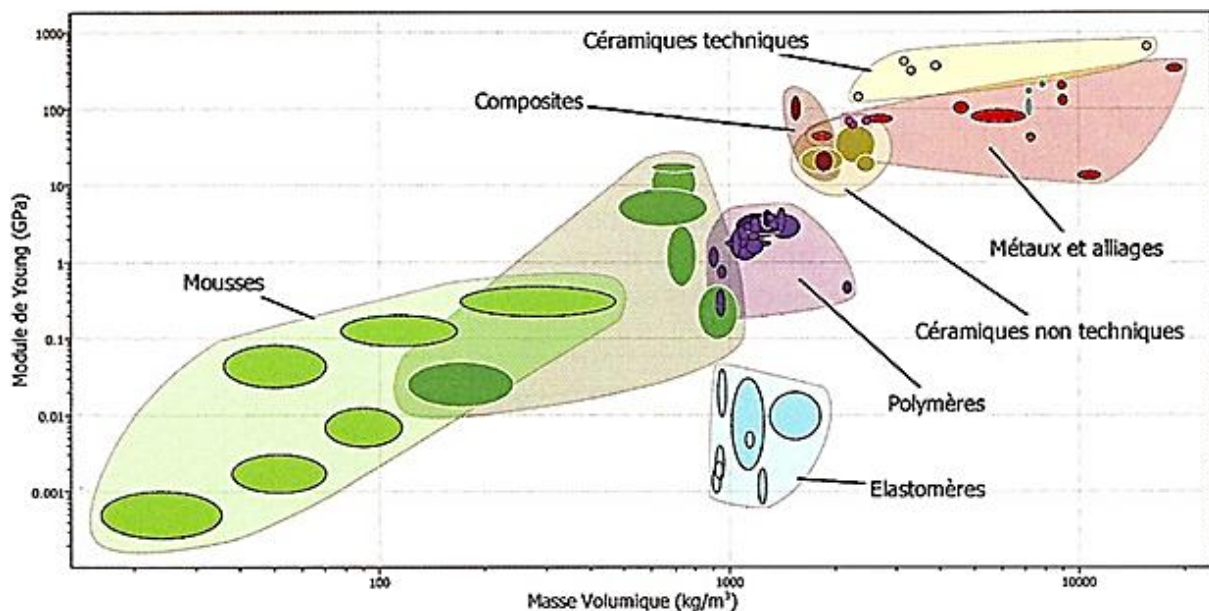


Figure 3. Diagramme des propriétés

Pour optimiser le choix du matériau, il est nécessaire de déterminer les performances recherchées, qui se traduiront par une combinaison des propriétés du matériau.

Par exemple, il est possible d'exprimer la performance d'un matériau par le rapport entre son prix et sa masse (Prix/M) (figure 4).

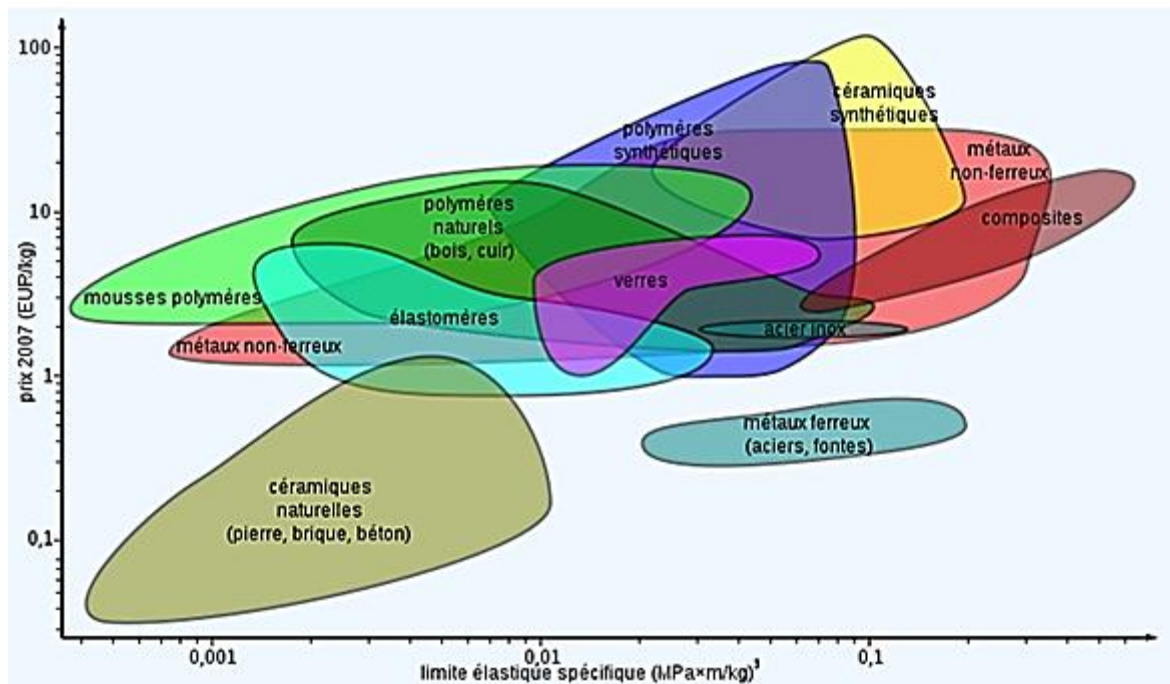


Figure 4. Diagramme du prix en fonction de la limite élastique

Pour établir un indice de performance, il est nécessaire de définir la fonction du composant, l'objectif et les contraintes de conception. Ces dernières peuvent se traduire par les propriétés des matériaux selon les sollicitations du composant. L'indice de performance sera une relation fonction de ces paramètres.

Cet indice de performance apparaît sur les diagrammes de propriétés sous la forme d'une droite.

Les matériaux situés sur cette droite ont la même performance, les matériaux au dessus sont les meilleurs et ceux situés en dessous sont les moins bons.

Sélection multi-contrainte et multi-objectif

En effet, généralement pour un même objectif de conception (minimiser les coûts, la masse, les impacts environnementaux), il est nécessaire de considérer plusieurs contraintes. Ce type d'étude, multi contrainte, peut être mené en effectuant autant d'études qu'il y a de contraintes et en conservant les matériaux communs.

Il est possible également d'avoir à traiter plusieurs objectifs de conception simultanément.

Indice des matériaux

La conception d'un composant mécanique est déterminée par trois éléments : les exigences fonctionnelles (la nécessité de supporter des charges, de transmettre la chaleur, de stocker

l'énergie élastique ou thermique, etc.), la géométrie et les propriétés de la matière dont elle est faite, y compris son coût. La performance de l'élément peut être décrite par une équation générale de forme :

$$p = f(F, G, M)$$

où p décrit l'aspect de la performance de la composante qui doit être optimisé : sa masse, ou son volume, ou son coût, ou la durée vie, par exemple; et $f()$ signifie «une fonction de». Une conception optimale peut être considérée une sélection de la matière et de la géométrie qui maximise (ou minimise) p . L'optimisation est soumise à des contraintes, dont certaines sont imposées par les propriétés du matériau.

Les trois groupes de paramètres de l'équation sont dits «séparables» lorsque l'équation peut être écrite :

$$p = f_1(F).f_2(G).f_3(M)$$

où f_1 , f_2 et f_3 sont des fonctions.

Lorsque les groupes sont séparables, le choix optimum de la matière devient indépendant des détails de conception.

Chaque combinaison de la fonction objective et la contrainte conduit à un indice de matière (figure 5). L'indice est caractéristique pour la combinaison. On peut voir que la sélection d'une poutre de poids minimale soumise à une contrainte de maximisation de la rigidité nécessite l'indice de matériau

$$M = E^{1/2} / \rho$$

où E est le module de Young et ρ est la densité.

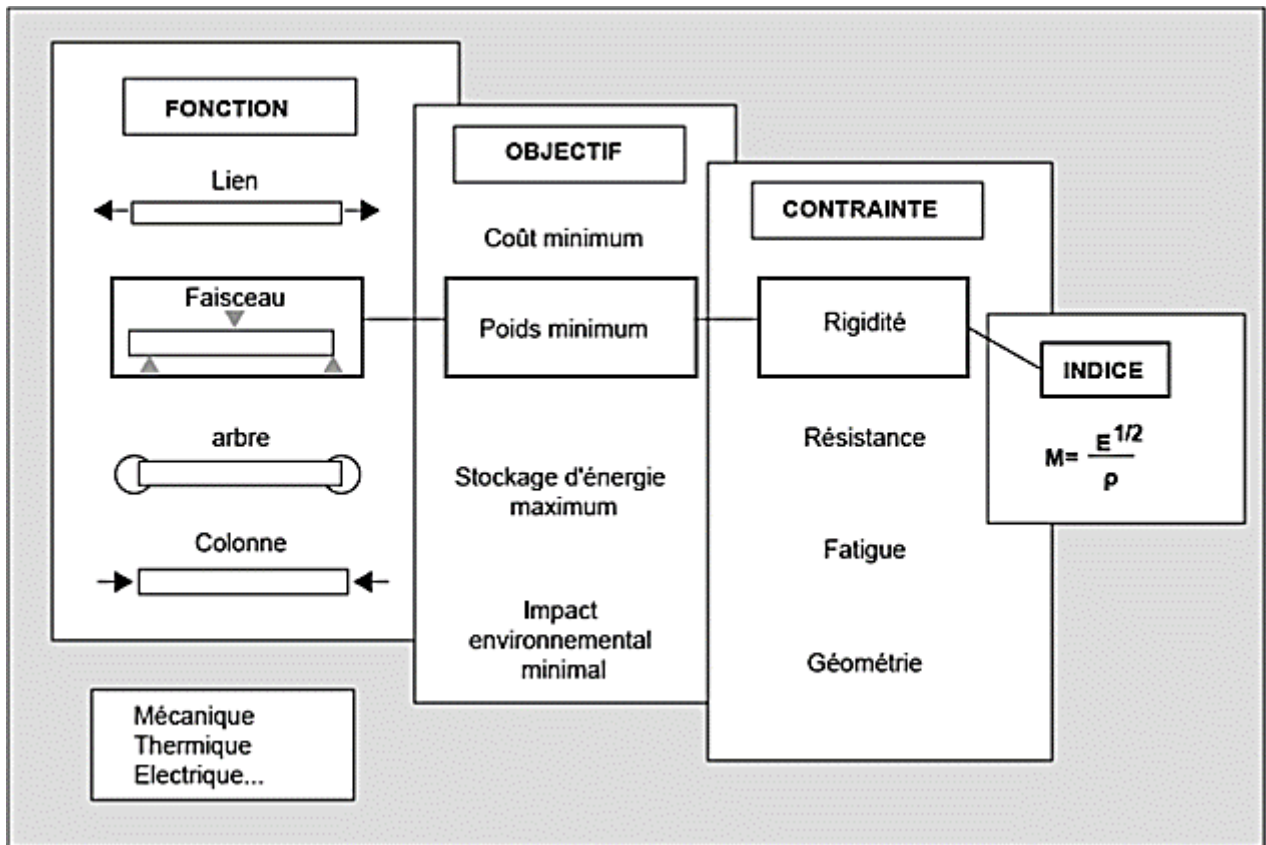


Figure 5. Analyse d'un matériau

Indices de performance pour les matériaux

La performance, P, d'un composant est mesurée par l'équation de la performance. L'équation de la performance contient des groupes de propriétés des matériaux. Ces groupes ont des indices du matériau. Parfois, le «groupe» est une propriété unique. Ainsi, si le rendement de la raideur de la poutre est mesuré par la rigidité, l'équation de performance contient seulement une propriété, le module élastique E.

Le module élastique E est l'indice de matériau à ce problème. Le plus souvent l'équation de la performance contient un groupe de deux ou plusieurs propriétés.

Les indices de performance pour les matériaux peuvent être estimés pour une gamme large des cas :

Rigidité limitée à masse minimale (coût, énergie, impact sur l'environnement)

FONCTION ET CONTRAINTES		MAXIMISER	MINIMISER	
Tige de liaison		raideur, longueur spécifiée, section.	E / ρ	ρ / E

E = module de Young

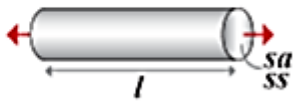
ρ = densité.

Afin de minimiser les coûts, utilisez le critère ci-dessus pour la masse minimale, en remplaçant la densité ρ avec $Cm\rho$, où Cm est le coût matériel par kg.

Afin de minimiser le contenu d'énergie emmagasinée ou le CO2 emmagasinée utilisez le critère ci-dessus pour la masse minimale en remplacez la densité ρ par $Hm\rho$ ou $CO_2\rho$, où Hm est la teneur en embodied energy content par kg et CO_2 est le poids de CO_2 par kg.

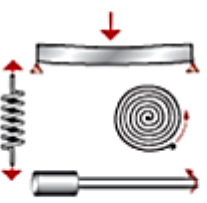
Afin de minimiser l'impact environnemental, remplacer la densité ρ par Iep , où Ie est la valeur éco-indicateur pour le matériau.

Résistance limitée à la masse minimale (coût, énergie, impact sur l'environnement)

FONCTION ET CONTRAINTES		MAXIMISER	MINIMISER	
Tige de liaison		raideur, longueur spécifiée, section.	σ_y / ρ	ρ / σ_y

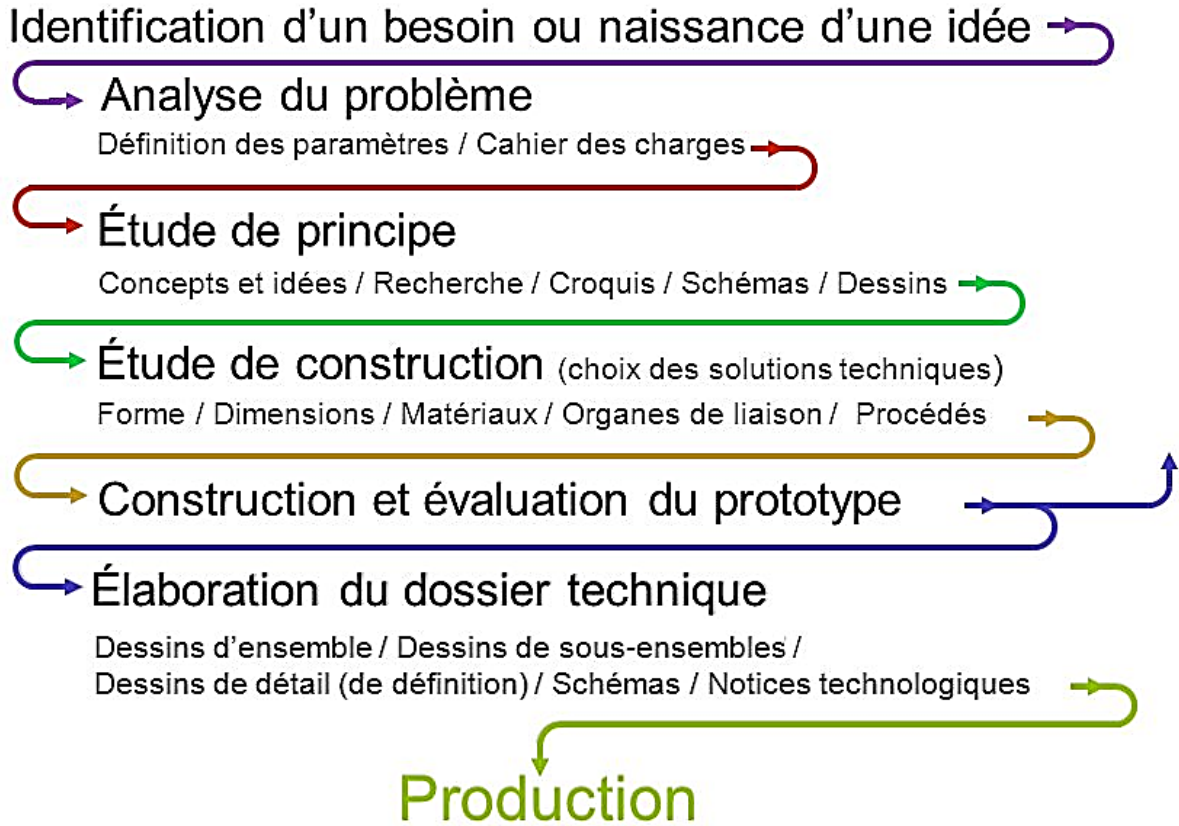
σ_y = résistance à la rupture (la limite d'élasticité pour les métaux et les polymères ductiles, la résistance à la traction pour des matériaux céramique, des verres et des polymères cassants chargés en traction, la résistance à la flexion ou la limite à la rupture pour les matériaux chargés en flexion)

Calcul de la limite de résistance pour la performance maximale des ressorts

FONCTION ET CONTRAINTES		MAXIMISER	MINIMISER	
Ressorts		maximum d'énergie élastique stockée par unité de volume; aucune défaillance	σ_y^2 / E	E / σ_y^2
		maximum d'énergie élastique stockée par unité de masse; aucune défaillance	$\sigma_y^2 / E \rho$	$E \rho / \sigma_y^2$

I.7. Etapes du processus de fabrication des matériaux

ÉTAPES DE LA DÉMARCHE DE CONCEPTION



CHAPITRE II. TYPOLOGIE DES PROCÉDES

Les procédés de mise ayant une incidence directe sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces, il est nécessaire de connaître les principes physiques et technologiques de ceux-ci afin de concevoir efficacement nos produits.

Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques produit. En effet, chaque procédé dépend d'une famille de matériaux et impose ses règles de tracé. De la même manière, les caractéristiques pièces peuvent imposer un procédé.

Exemple :

Le procédé de forgeage est retenu pour la fabrication d'essieu de camion car il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau.

Le procédé d'injection plastique est retenu pour la fabrication de coque de téléphone portable car il permet de grande cadence de production à faible coût.

On peut classer les procédés en trois catégories suivant le degré de finition de la pièce :

II.1. Primaire : Mise en forme à partir d'un semi-produit. Parmi ces procédés primaires, l'un des plus anciens est la Fonderie. A l'origine, ce procédé de mise en forme s'appliquait aux *métaux* et notamment à la fonte (d'où l'origine du nom). Par la suite, des matériaux apparus plus récemment comme les polymères ou les composites ont été mis en forme avec des procédés assez similaires à la fonderie comme *l'injection*. La fonderie des *métaux* est un procédé industriel qui consiste à couler un alliage en fusion dans un moule (empreinte) constitué de deux châssis ou coquilles. Il existe deux types de moules :

les moules *non permanents*, qui sont détruits après chaque coulée (par exemple en sable),

les moules *permanents*, dont les coquilles sont en acier allié comprenant 0,35% de carbone, ainsi que du chrome, du silicium et du vanadium (ils permettent le moulage d'un grand nombre de pièces ; de 100 000 à 150 000).

Dans le cas d'une grande série, pour le moulage sable à *modèle permanent*, on pourra utiliser une plaque modèle qui permet une automatisation du procédé.

Forme de la pièce moulée

La pièce, à l'issue de son refroidissement, doit pouvoir être démoulée. Dans le cas de pièces complexes, il est possible de réaliser des moules en plusieurs parties, avec des noyaux permettant d'obtenir des volumes creux dans la pièce moulée.

II. 2. Secondaire : Mise en forme de surface fonctionnelle : Un objet technique est constitué d'un ensemble de pièces. Pour chaque pièce de cet ensemble, on distingue : Les surfaces fonctionnelles qui ont un rôle primordial dans le fonctionnement de l'objet technique. On peut les repérer en couleurs sur le dessin d'ensemble.

Les surfaces non-fonctionnelles définissant les formes secondaires.

L'objectif de la méthode est d'allouer la tolérance la plus grande possible à chaque spécification, pour limiter les coûts de fabrication et de contrôle. L'ensemble de ces procédés est caractérisé par deux mouvements : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance.

A ces mouvements sont associés :

- la vitesse de coupe (V_c) définie comme la vitesse tangentielle de la matière par rapport à l'arête tranchante de l'outil,
- la vitesse d'avance (V_f) définie comme vitesse de déplacement de l'outil pendant l'opération d'usinage.

Les paramètres qui influencent l'usinage sont :

- la vitesse de coupe,
- la vitesse d'avance,
- la profondeur de passe.

Les conditions d'usinage influent également sur la qualité du résultat (respect des dimensions de la pièce, états de surface satisfaisant, etc.). Ces conditions sont liées à :

- la lubrification,
- la nature de l'outil,
- sa géométrie,
- le type d'opération d'usinage réalisée.

Les principales techniques d'usinage sont :

- le tournage,
- le fraisage,
- le perçage,
- la rectification,
- l'UGV (procédés précédents mais à grande vitesse).

II.3. Tertiaire : Augmente la qualité pièce (polissage) : le polissage de finition est effectué par voie mécanique, chimique ou électrochimique. On doit obtenir un poli spéculaire (rugosité inférieur à $0.1 \mu\text{m}$) sur lequel on ne distingue au microscope optique aucune rayure et réduire la zone perturbée à une épaisseur suffisamment faible.

Tous les procédés tertiaires interviennent après qu'un ou plusieurs procédés primaires et éventuellement secondaires aient donné la forme générale de la pièce. Ils sont destinés à modifier les propriétés d'emploi des objets. Parmi les procédés tertiaires, on peut distinguer les traitements qui modifient les propriétés *uniquement en surface* :

- dépôt d'un revêtement ou d'une peinture,
- galvanisation,
- grenailage ou sablage,

De ceux qui modifient à la fois les propriétés de la surface et celles du volume, comme la plupart des traitements thermiques. On peut s'interroger à cette occasion sur ce qu'on appelle surface : à partir de quelle profondeur est-on dans le volume ?

CHAPITRE III: CLASSIFICATION DES PROCÉDES DE MISE EN FORME

Il existe une multitude de procédés de mise en forme des matériaux. Les exposer de manière exhaustive est très difficile (et dépasse largement le cadre de ce cours). Cependant, on peut tenter de distinguer quelques familles de procédés et d'en exposer les grands principes.

III.1. Par enlèvement de matière : Ces procédés comme le montre la figure 6 consistent à obtenir la forme finale d'une pièce par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux). Elles nécessitent un outil de coupe. C'est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées.

Différents outils permettent d'enlever de la matière à un brut.

- usinage par outil coupant : fraisage, tournage, perçage
- rectification par enlèvement de matière à l'aide de grains abrasifs d'une meule
- électroérosion par désintégration de la matière à l'aide d'une électrode

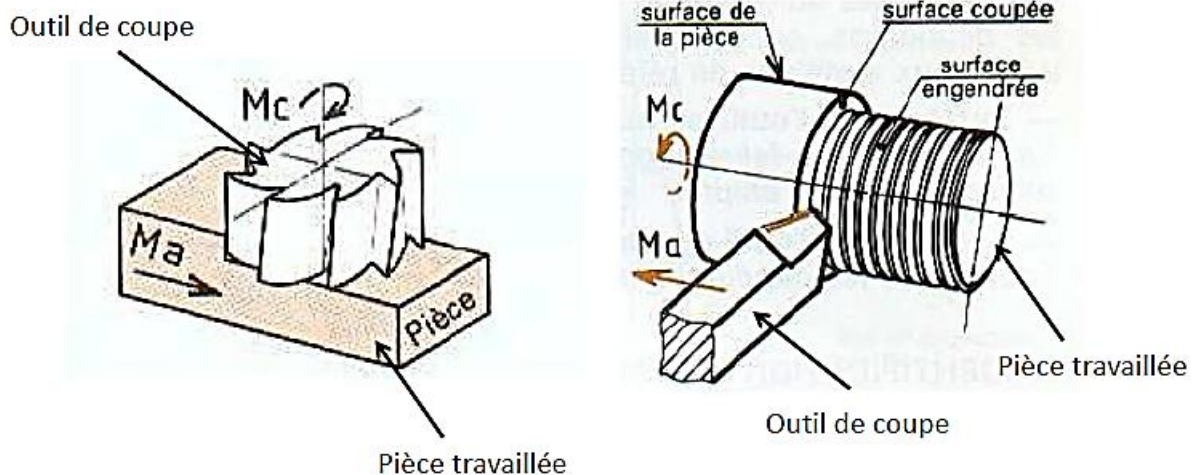


Figure 6. Procédés de fabrication par enlèvement de matière

III.2. Par déformation : à chaud ou à froid

- emboutissage : permet l'obtention de corps creux à partir d'une tôle
- forgeage : un lopin métallique est déformé entre des matrices portant des gravures correspondant aux formes à obtenir
- mais aussi : estampage, matriçage, emboutissage, laminage, cintrage, formage, repoussage, fluotournage, etc...

Les principaux procédés de mise en forme par enlèvement de matière sont :

- Tournage
- Fraisage

- Perçage

III.3. Par moulage : on coule un matériau à l'état liquide dans un moule pour obtenir des formes complexes. On trouve de nombreuses techniques de moulage, dont : le moulage au sable, en coquille, à la cire perdue, par injection, rotomoulage, etc...

III.4. Techniques de pointes : ces dernières années, quelques procédés prometteurs ont été mis au point, dont : • le prototypage rapide par dépôt de fil (FDM) : on fait fondre un filament de matière synthétique (ABS ou PLA) pour créer le prototype couche par couche. • la stéréolithographie (SLA) : technique de prototypage rapide par couches successives à partir de résines photosensibles polymérisées sous l'action d'un laser. • le frittage sélectif au laser (FSL) : de la poudre métallique est solidifiée localement par un laser.

CHAPITRE IV. PROCÉDES DE MISE EN FORME DES MATÉRIAUX METALLIQUES

IV.1. Préparation des matières premières

Matières Minérales

Généralement tous les métaux ne se trouvent pas à l'état natif (état pur) dans la nature, mais sous forme de roche, terre appelée minerai, seuls quelques métaux (Au, Ag, Hg) peuvent se trouver à l'état pur.

Le minerai est une combinaison d'un métal ou de plusieurs métaux avec d'autres éléments tels que O₂, C, N₂, P, S etc... en plus il contient de l'eau d'hydratation.

Le minerai est une substance minérale qui baigne dans une substance stérile appelée gangue. Les minerais qu'on rencontre dans la nature sont sous forme d'oxydes (Fe₂O₃), carbonates (CaCO₃), sulfures (PbS) ou silicates (Al₄(SiO₄)).

La possibilité d'exploitation économique d'un minerai dépend de la teneur du métal de base, de l'abondance ou de la rareté du métal.

Industriellement on qualifie de minerai tout produit minéral dont on peut extraire un métal ou un alliage à un prix de revient convenable. Le mot minerai est donc un terme économique et non minéralogique, la teneur minimale des minerais exploitables dépend essentiellement de la valeur du métal. Ainsi un quartz aurifère contenant 20g d'or à la tonne est considéré comme un minerai riche alors qu'une roche à 20% de fer (teneur 10.000 fois plus grande) n'est pas exploitée en général.

Avant l'extraction du métal de son minerai, ce dernier subit une préparation au préalable qui consiste au :

- a) **Concassage** des gros morceaux à l'aide de concasseur rotatif, à mâchoires ou à marteaux.
- b) **Broyage** pour obtenir du minerai encore plus fin.
- c) **Triage, lavage** du minerai par flottation (enrichissement).

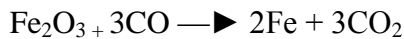
Extraction des métaux (élaboration des métaux)

Pour extraire les métaux des minerais, on applique des opérations de traitements thermiques ou chimiques l'utilisation de l'une ou de l'autre dépend de la composition chimique du minerai et de la nature de sa gangue.

En général les traitements se font dans des fours portés à haute température. L'opération consiste à assurer d'une part la fusion du minerai et d'autre part l'élimination des éléments non désirés grâce au contact avec des agents ajoutés volontairement.

Les périodes les plus importantes lors de ses opérations sont

a) La réduction appliquée au minerais du type oxydes, sous l'effet de la chaleur, le carbone et l'oxyde se combinent en libérant le métal et le gaz carbonique, par exemple dans le cas du fer :



b) Le grillage : consiste à chauffer à Pair les minerais de type sulfures. Par cette opération, les sulfures se transforment en oxydes.

c) La calcination consiste à chauffer à l'abri de l'air les minerais de types carbonates. Par cette opération les carbonates se transforment en oxydes, par exemple :



Les oxydes obtenus par les méthodes de grillage et de calcination sont ensuite traités par la méthode de réduction afin d'extraire le métal. Certains métaux élaborés ne sont pas pur et doivent subir des opérations de raffinage chimique ou électrochimique. Les métaux obtenus sont ensuite préparés sous diverses formes commerciales par les procédés suivants : déformation plastique, laminage, étirage et moulage.

IV.2. Processus de fusion des composés métalliques

Consiste à rendre liquide un matériau afin qu'il prenne la forme d'un moule. Avantages : - Peu de gaspillage de matière première ; - Permet d'obtenir des formes pouvant être très complexes. Inconvénients : - Nécessite un outillage important et coûteux (surtout pour les moules métalliques) ; - La pièce à obtenir doit posséder des épaisseurs approximativement constantes ou variant faiblement, ne pas posséder d'arêtes vives (congés et arrondis vivement conseillés), et avoir des surfaces de dépouilles ; - L'état de surface (rugosité) obtenu est moyen ; - La précision obtenue est moyenne (retraits de matière et déformation en refroidissant) ; - Ces deux derniers inconvénients obligent souvent à ajouter des usinages au niveau des surfaces fonctionnelles de la pièce ; Il existe principalement deux techniques de moulage : en sable ou métallique.

IV.3. Forgeage

Le forgeage est l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un morceau de métal, à froid ou à chaud, afin de la contraindre à épouser la forme voulue. Le forgeage implique un dispositif de frappe (marteau, masse, martinet ou marteau-pilon) et un support (enclume ou matrice). L'état plastique de la matière première employée distingue la forge des autres technologies d'obtention des pièces en métal comme la fonderie où c'est le métal liquide à 1450°C (fondu) qui est utilisé.

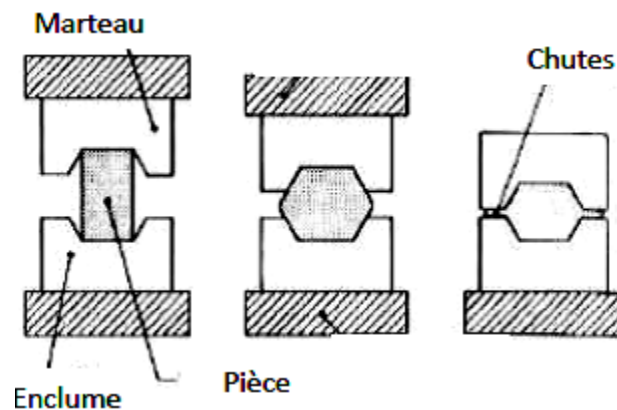


Figure 7. Principe du forgeage

Avantages du forgeage

Homogénéité:

Sous l'effet du choc ou de la pression, le métal est écrasé et s'écoule entre les outils dans une direction perpendiculaire à celle de l'effort exercé. Il y a homogénéisation et orientation de la structure dans cette direction privilégiée.

La forge est très utile pour des pièces de sécurité comme par exemple les crochets de manutention.

Elle permet, en réduisant les dimensions des pièces, de supporter les mêmes efforts. En conséquence, poids des pièces, efforts d'inertie, et vibrations s'en trouvent réduits.

Caractéristiques :

Certaines caractéristiques mécaniques sont améliorées (en particulier l'allongement à la rupture).

IV.3. Fonderie : Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production. C'est, tout à la fois, un art et un métier dont les origines remontent à plusieurs millénaires avant notre ère, utilisant et mettant en œuvre des techniques aussi diverses que variées, comme le

moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée des métaux et alliages métalliques, les traitements thermiques, la finition, le parachèvement des pièces, etc.

La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano-soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie.

La fonderie a pu améliorer constamment ses performances grâce aux progrès de toutes ses composantes techniques, tant en précision, qu'en fiabilité, lui permettant de concurrencer, voire de remplacer, dans des emplois très sévères ou de sécurité, des pièces habituellement fabriquées par d'autres techniques (forgeage par exemple) comme des vilebrequins de moteurs ou des bras de suspension pour les véhicules automobiles. Toutes ces évolutions et tous ces avantages expliquent la très grande diffusion des pièces de fonderie dans toutes les branches de l'industrie, et les capacités de progrès de cette technique laissent entrevoir de plus larges applications dans l'avenir

Rôle et possibilités de la fonderie

L'industrie de la fonderie, utilisatrice de matières premières (fonte, ferraille, coke), fournit des pièces finies ou semi-finies à l'ensemble de l'industrie. Elle est à ce titre une industrie de base.

On s'adresse à elle soit pour la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, soit pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples, soit encore pour profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés, soit enfin pour couler des alliages non corrosifs ou difficilement usinables.

Moulage

L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, généralement en matériaux réfractaires, qui porte l'empreinte en négatif de la pièce, cette empreinte étant obtenue à partir d'un modèle reproduisant la pièce à fabriquer

Classement des procédés de moulage

L'opération de moulage est une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et

leur précision, ses états de surface, son refroidissement, et joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur sa qualité. C'est aussi, avec le noyautage, l'opération qui entraîne les coûts les plus élevés dans les différentes opérations de fabrication. À titre d'exemple, dans des productions de grandes séries, les opérations de moulage-noyautage représentent fréquemment 40 % environ des prix de revient hors matière (moulage 30 %, noyautage 10 %).

Il convient donc que le choix d'un procédé de moulage soit fait avec le maximum de précaution pour ne pas pénaliser les productions futures, tant en qualité qu'en prix de revient.

De très nombreux procédés de moulage existent, en châssis, en mottes, en fosse pour les très grosses pièces, au trousseau pour des pièces circulaires par exemple, en modèle perdu (polystyrène), en cire perdue pour des pièces de précision ou des œuvres d'art, en coquille métallique par gravité, sous-pression pour les non ferreux, en coquille centrifugée pour des tuyaux notamment, etc., que nous présenterons dans les paragraphes suivants.

Cette très grande variété des procédés impose de les classer pour permettre leur présentation. Nous avons choisi de les classer en fonction des modes de moulage et de durcissement des matériaux utilisés au moment de la fabrication du moule ou des noyaux et de la nature des modèles qui doivent être compatibles avec les procédés employés :

- modèles permanents (bois, métal, résine, etc.);
- modèles perdus (polystyrène, cire, etc.);
- moules métalliques ;
- Procédés spéciaux.

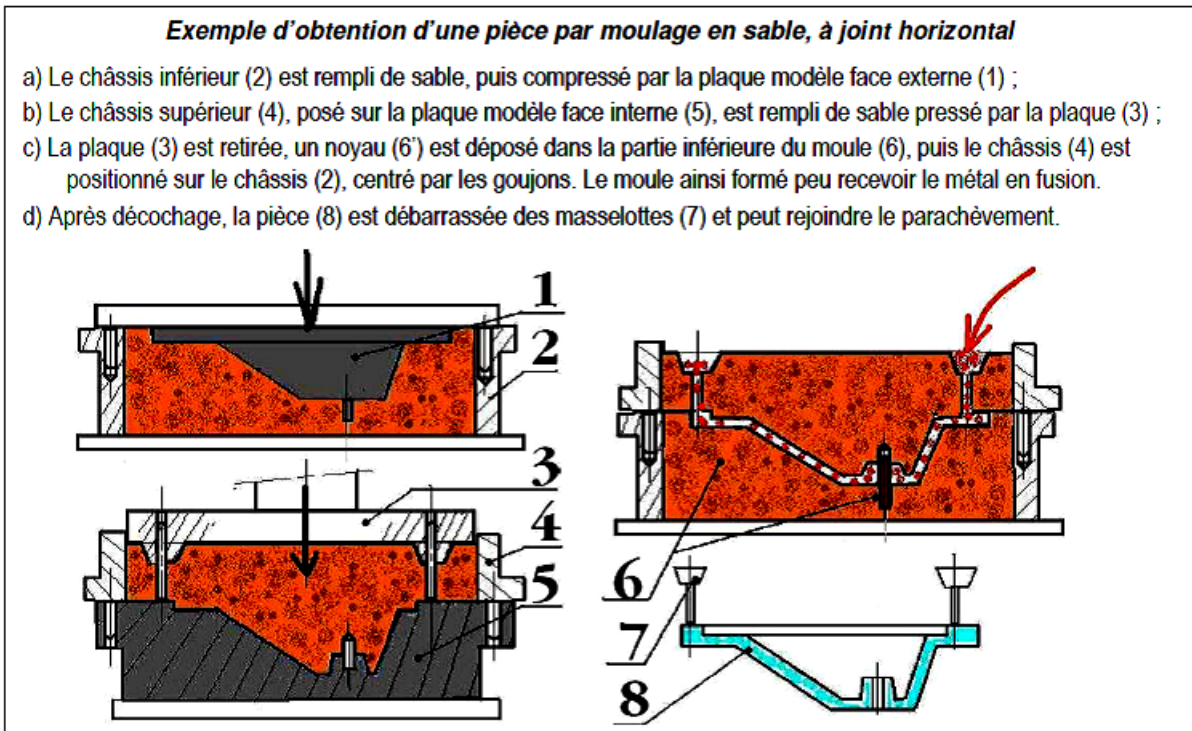


Figure 8. Principe du procédé de moulage en sable

IV.4. Emboutissage

Principe : L'emboutissage est la déformation à froid d'une tôle plane en une forme creuse non développable (cf. pliage). La tôle est déformée entre un poinçon mobile et une matrice fixe, le serre-flan évitant la formation des plis. L'opération ne doit pas entraîner de variation sensible de l'épaisseur de la tôle. L'outillage est spécifique à la forme de la pièce à obtenir, et le seuil de rentabilité exige donc une production en série.



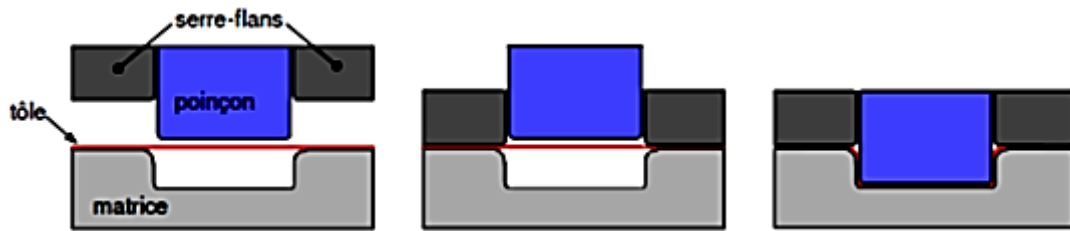


Figure 9. Principe de l'emboutissage

IV.5. Frittage

Principe : Une poudre (ou un mélange de poudre), généralement métallique, est comprimée dans un moule, puis chauffée dans un four à vide (ou à atmosphère contrôlée) à une température inférieure à la température de fusion du principal constituant. Avantages : - Faible prix de revient pour de grandes séries de pièces complexes, précises et saines, qui peuvent être utilisées à l'état brut ; - La porosité naturelle des pièces frittées permet la fabrication de filtres et de coussinets autolubrifiants ; - Autorise l'obtention de nouveaux alliages (encore appelés dans ce cas « pseudoalliages »). Inconvénients : - La porosité naturelle peut devenir un inconvénient dans le cas de problèmes d'étanchéité par exemple ; - Le principe de la compression conduit à des pièces non homogènes (porosité plus élevée au milieu), et dont les qualités de résistance mécanique sont faibles pour les métaux frittés.



Cuivre

Alu

Bronze

Laiton

Poudres métalliques



Coussinets frittés



Diverses pièces frittées

CHAPITRE V. PROCÉDES DE MISE EN FORME DES POLYMERES ET DES COMPOSITES (MISE EN FORME DES COMPOSITES A MATRICE THERMODURCISSABLE)

V.1. Rhéologie des polymères

Les polymères peuvent être mis en œuvre à partir de poudres (revêtements), de solutions ou d'émulsions (peintures, colles et adhésifs, fibres Kevlar), de l'état fondu ou caoutchoutique, et de l'état solide (usinage de pièces mécaniques ou de prothèses articulaires). Compte tenu de l'importance économique des thermoplastiques de grande diffusion (PE, PP, PS, PVC), auxquels on peut ajouter les thermoplastiques techniques (polyamides, par exemple), c'est la mise en œuvre à partir de l'état fondu qui joue un rôle prépondérant.

Caractéristiques de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques.

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général de la Figure 10. 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 la microstructure du polymère, et donc ses propriétés.

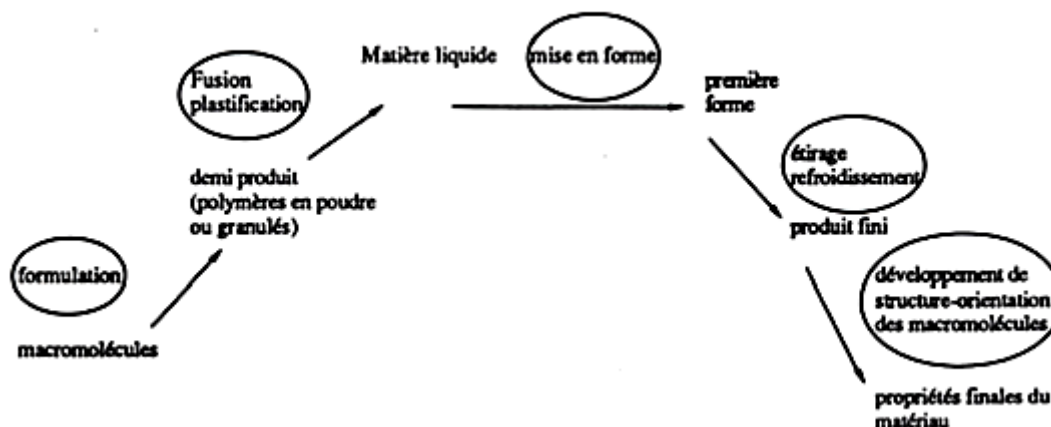


Figure 10. Schéma générale de la mise en œuvre des polymères

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 pseudoplastique et viscoélastique. En outre, si les chaînes sont régulières, elles ont la possibilité de contribuer à la formation de cristaux.

Très forte viscosité des polymères fondus En dessous d'une masse molaire critique M_c , correspondant à l'apparition des enchevêtrements, la viscosité des polymères varie presque proportionnellement à la masse molaire. Au-dessus de M_c , elle augmente comme une puissance 3,4 de la masse molaire. Compte tenu des valeurs élevées des masses molaires, on obtient classiquement pour les polymères fondus des viscosités à faible taux de cisaillement de l'ordre de 10^3 Pa.s, soit 10^6 fois plus élevées que celle de l'eau et 10^8 fois plus élevées que celle de l'air. Cette valeur très élevée de la viscosité a des conséquences originales :

- Les termes d'inertie sont très généralement négligeables devant les termes de viscosité. Il ne pourra donc jamais être question d'écoulement de polymère turbulent, et ce n'est que dans certaines conditions extrêmes (filage textile à haute vitesse) que l'on sera amené à tenir compte des termes d'inertie dans les équations mécaniques.
- Les forces de masse sont également le plus souvent négligeables. Tant que la hauteur de l'écoulement reste inférieure au mètre, les forces de masse pourront être négligées. C'est le cas de la plupart des machines de transformation horizontales. Ce ne sera plus le cas dans certains procédés verticaux : soufflage de gaine, filage textile, etc.
- La puissance dissipée dans l'écoulement est considérable. Le polymère fondu va s'échauffer. Cet échauffement sera intéressant car il contribuera à la fusion ou à la plastification du polymère. Il sera pénalisant dans la mesure où il pourra élever le polymère jusqu'à sa température de dégradation.
- Cette valeur élevée de la viscosité explique enfin les dimensions des outillages de mise en œuvre, les forces de fermeture nécessaires sur les presses à injecter, l'importance des moteurs des extrudeuses.

Comportement pseudo plastique Il est caractérisé par une évolution non linéaire de la contrainte en fonction de la vitesse de déformation. Il est possible de définir une viscosité équivalente pour chaque valeur de la vitesse de déformation (Figure 11) : celle-ci est le rapport de la contrainte à la vitesse de déformation. A faible vitesse de déformation, la viscosité reste constante : on parle alors de plateau newtonien. A vitesse de déformation plus

élevée, la viscosité décroît très significativement, ce qui correspond à une diminution de la densité des enchevêtrements entre les chaînes macromoléculaires. On comprend aisément que la pseudoplasticité sera d'autant plus marquée que la masse molaire du polymère sera élevée. Il est habituel de rendre compte de la décroissance de la viscosité en fonction du taux de cisaillement à l'aide d'une loi puissance de viscosité ou loi d'Ostwald :

$$\eta = K\dot{\gamma}^{m-1}$$

où K est la consistance du polymère. L'indice de pseudoplasticité m est généralement compris entre 0,2 et 0,5. La loi puissance rend compte correctement de la décroissance linéaire de la viscosité en fonction du taux de cisaillement en coordonnées bilogarithmiques. En revanche, elle ne rend pas compte de l'existence d'un plateau newtonien à faible vitesse de déformation. C'est pour cette raison que d'autres lois ont été proposées. Le comportement pseudoplastique, ou rhéofluidifiant, a des implications très importantes dans les procédés : les couples d'entraînement des moteurs, les pressions dans les outillages évolueront modérément en fonction du débit, de la vitesse de rotation, etc. Les machines de mise en œuvre des polymères auront ainsi une plage de fonctionnement étendue.

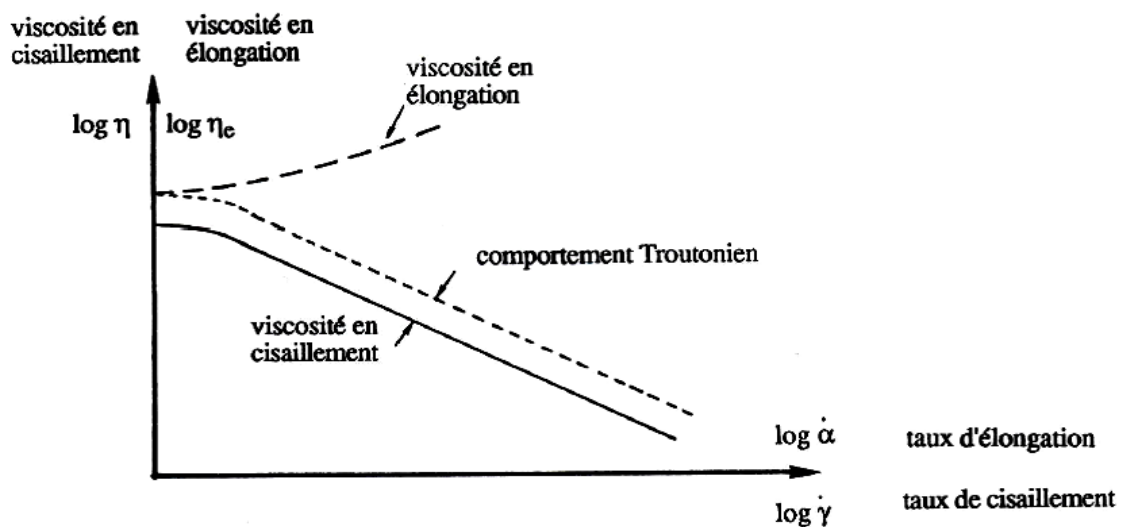


Figure 11. Courbes typiques de viscosité d'un polymère fondu en cisaillement et en élongation

Comportement viscoélastique Le comportement viscoélastique recouvre une large classe de phénomènes :

- des phénomènes transitoires, comme le retard à l'établissement ou la relaxation de la contrainte en cisaillement simple (Figure 12), qui révèlent l'existence d'un ou de plusieurs temps caractéristiques pour le polymère ;

- l'existence de différences de contraintes normales en cisaillement simple. L'un des effets les plus spectaculaires est l'apparition d'une importante force d'écartement quand on cisaille un polymère entre un disque fixe et un disque en rotation ;
- l'augmentation de la viscosité élongationnelle avec le taux d'élongation. Ceci est en contradiction avec la loi de Trouton, qui prédit que la viscosité en élongation est égale à trois fois la viscosité en cisaillement, donc décroissante avec le taux d'élongation (cf. Figure 11). Ces différents phénomènes viscoélastiques ont une incidence très importante sur les procédés de mise en forme des polymères. Ils sont responsables du gonflement du polymère en sortie de filière qui rend par exemple délicate la mise au point de la fabrication de profilés. Ils sont à l'origine des « défauts d'extrusion » observés à haut débit. L'augmentation de la viscosité élongationnelle avec le taux d'élongation permet de stabiliser les étirages et autorise la fabrication de fibres et de films à taux d'étirage élevé.

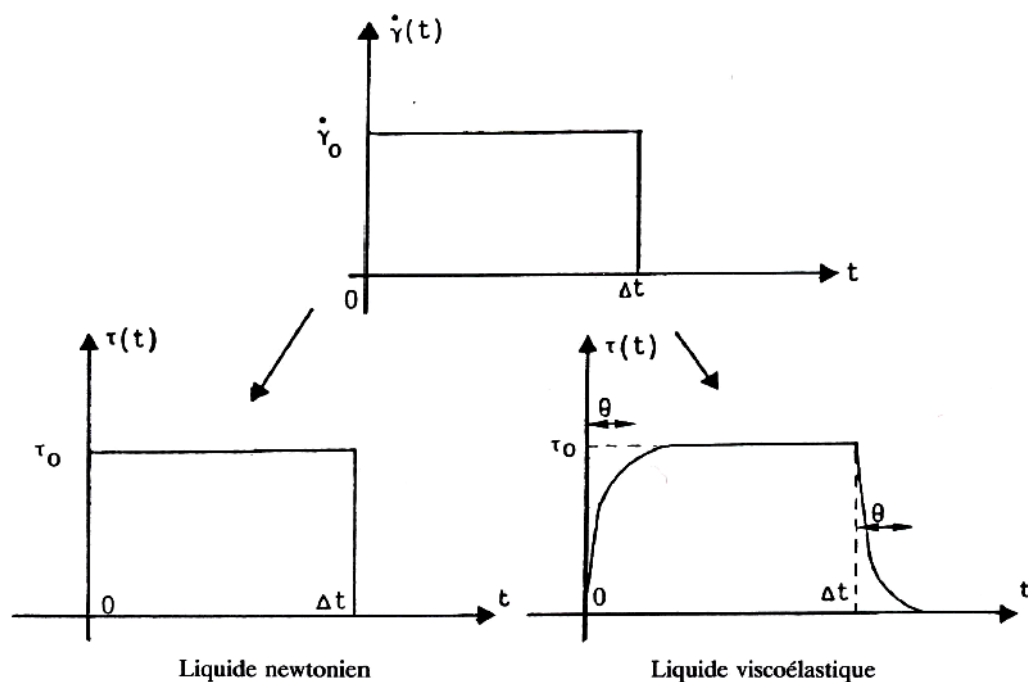


Figure 12. Contrainte engendrée par un créneau de vitesse de déformation. Comparaison entre un fluide newtonien et un fluide viscoélastique

Ce sont les enchevêtrements entre chaînes moléculaires qui sont à l'origine du comportement viscoélastique. Quand le temps caractéristique de la déformation est faible devant le temps caractéristique du polymère (temps de relaxation), les enchevêtrements pourront être considérés comme les nœuds d'un réseau tridimensionnel, ce qui donnera naissance à un

comportement de type élastique. Quand, au contraire, le temps caractéristique de la déformation est élevé devant le temps caractéristique du polymère, les enchevêtrements pourront se déplacer et le matériau présentera un comportement de type visqueux.

Aspects phénoménologiques de l'élasticité

La théorie de l'élasticité étudie la relation entre les déformations subies par un objet et les Forces qui lui sont appliquées.

Pour les petites déformations, l'analyse du comportement élastique d'un matériau se ramène à l'étude d'un certain type de déformations simples et à la détermination des constantes élastiques correspondantes.

Types de déformations	Constantes élastiques
Extension uniaxiale	E (Module de Young)
Cisaillement simple	G (Module de Cisaillement)
Compression uniforme	K (Module de compressibilité volumique)

Extension uniaxiale

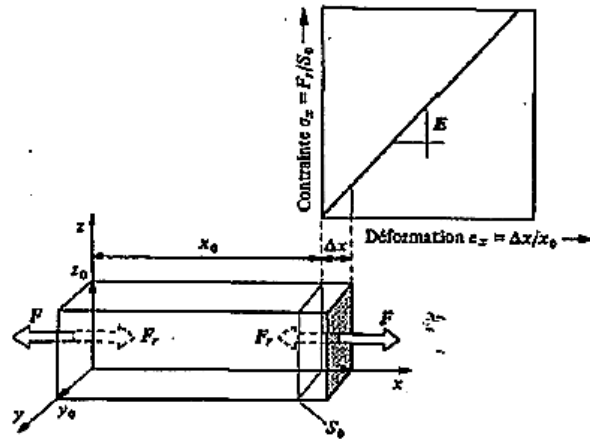
Si on applique une force de traction F ($F = \sigma * S_0$) sur une éprouvette prismatique donc l'allongement de l'éprouvette proportionnellement à sa longueur initiale x_0 s'écrit

$$\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_0}$$

Apparition d'une force de rétraction F_r qui est égale en valeur de sens opposée à la force appliquée

$$F : F + F_r = 0$$

E (Module de Young ou d'élasticité) caractérise la résistance du solide à la déformation uniaxiale.



Contraction latérale et coefficient de Poisson

Allongement x de l'éprouvette dans le sens de la traction engendre une augmentation de son volume. Si déformation élastique à compensation partielle de cette augmentation de volume par contraction latérale de l'éprouvette (Δy et Δz) suivant les directions perpendiculaires à la traction.

La déformation relative dans les directions y et z s'écrit :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta z}{z_0}$$

On définit aussi le coefficient de Poisson comme étant :

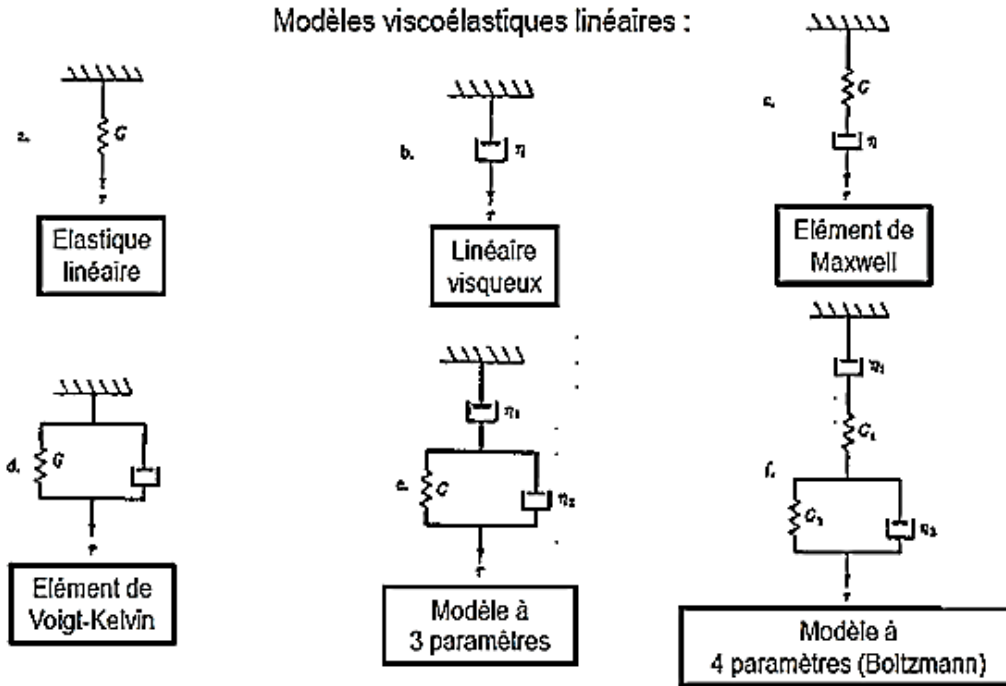
$$\nu = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = - \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$$

Viscoélasticité linéaire

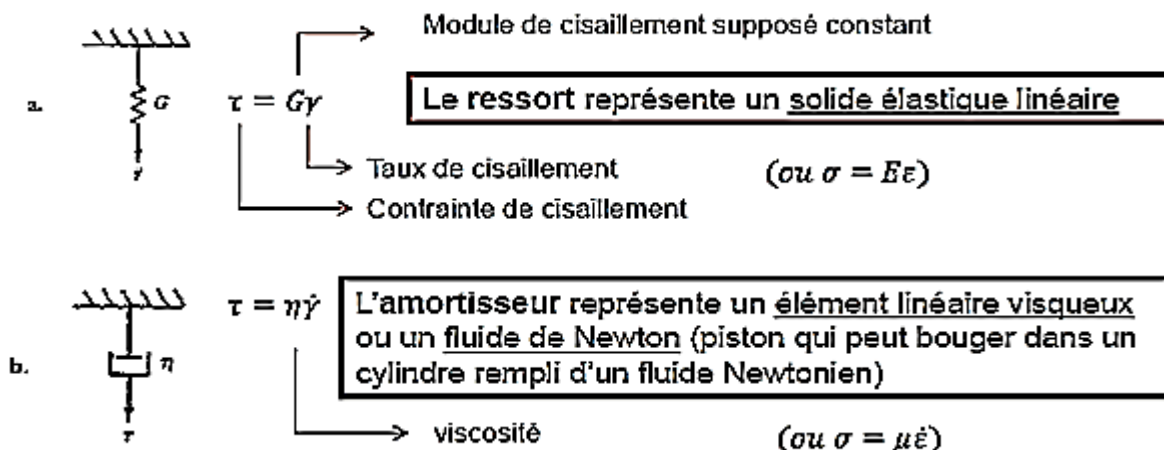
Les matériaux traditionnels (eau, air, acier, béton) rentrent, avec une assez bonne approximation dans la catégorie fluide visqueuse et solides élastiques, mais pas totalement les polymères.

Réponse des modèles mécaniques à viscoélasticité linéaire

Modèles viscoélastiques linéaires :

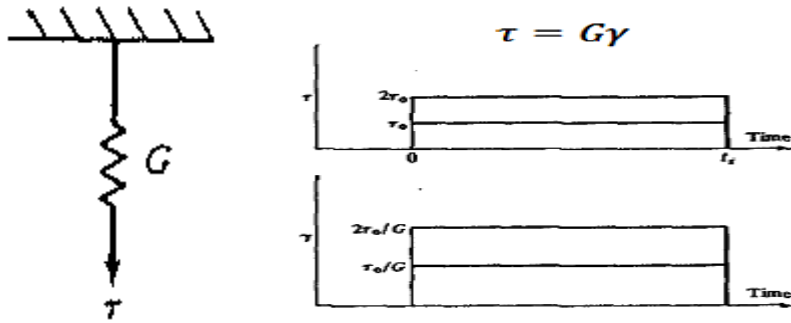


Il existe des modèles mécaniques linéaires (ressort et amortisseur) permettant de représenter des cas extrêmes de réponses viscoélastiques.



La déformation est représentée par l'allongement du système

Ressort de Hooke : Si on applique une contrainte τ_0 on atteint l'équilibre γ instantanément et le maintient la déformation tant que τ_0 est maintenue. Si on relâche spontanément les contraintes, Retour instantané du ressort dans son état initial et pas d'effet d'inertie dans le modèle de Hooke.



b. Amortisseur:

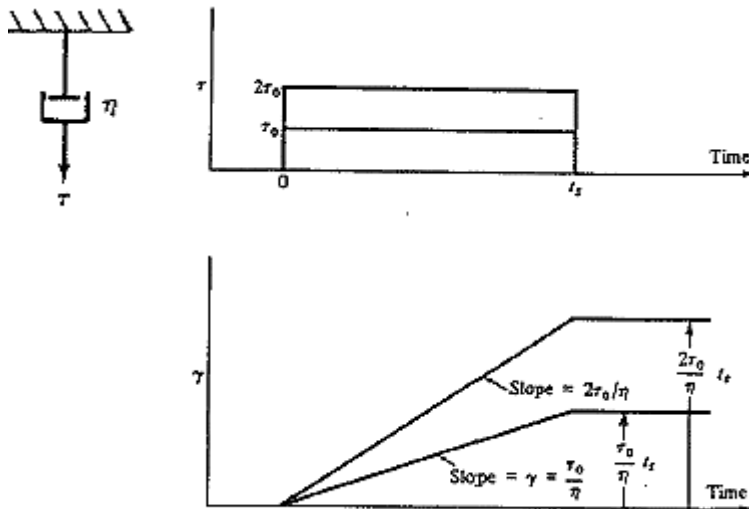
Si on applique une contrainte brutale τ_0 :

La déformation γ augmente avec le temps (on considère une déformation initiale nulle)

Si on double la contrainte τ_0

On double la pente de la courbe de graphique déformation-temps (γ -t)

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \rightarrow \quad \gamma = \left(\frac{\tau_0}{\eta} \right) t$$



V.2. Procédés industriels de transformation et fabrication des polymères

Techniquement, les réactions de polymérisation peuvent être effectuées de différentes manières suivant la nature du monomère et l'utilisation qui doit être faite du polymère. On distingue quatre techniques de polycondensation : La polycondensation en masse ; la polycondensation en solution ; La polycondensation en suspension et à l'état solide ; la polycondensation interfaciale.

Le principe de la réaction inclut la réaction d'un monomère avec deux groupements fonctionnels réactifs différents ou la combinaison de deux monomères bifonctionnels formant un polymère et générant un sous-produit qui est, dans de nombreux cas, de l'eau. Une vue schématique de la réaction est représentée à la Figure 14.

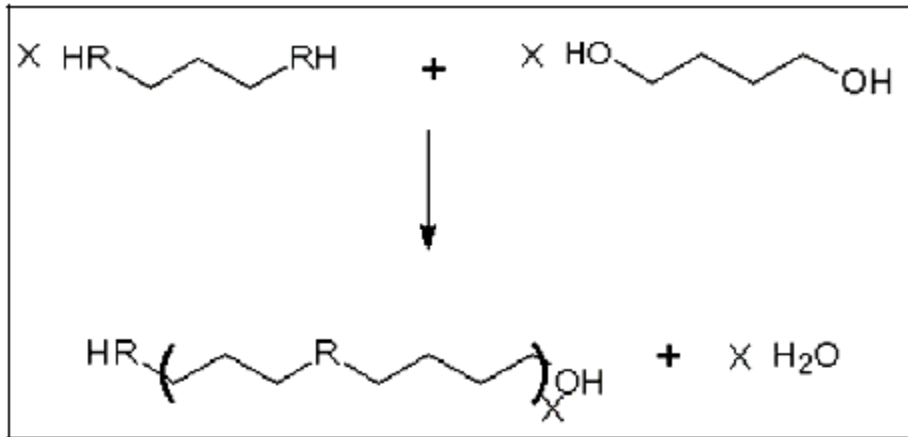


Figure 14 : Vue schématique d'une réaction de polycondensation

Les groupements réactifs peuvent être par exemple :

- l'alcool plus l'acide pour les polyesters
- l'amine plus l'acide pour les polyamides.

Polymérisation en suspension

Dans la polymérisation en suspension, la réaction chimique est réalisée dans des gouttes en suspension dans le solvant. La polymérisation en suspension est caractérisée, d'une part, par un transfert satisfaisant de la chaleur de réaction, par une faible viscosité de dispersion, par des faibles coûts de séparation et, d'autre part, par le caractère discontinu du procédé, par une quantité relativement élevée d'eaux usées, par un phénomène important d'encrassement des parois du réacteur et par des résidus d'agents de suspension dans le produit fini et dans les flux de déchets.

Les types de produits générés par les procédés en suspension sont :

- le chlorure de polyvinyle
- le polyméthacrylate de méthyle
- le polystyrène (HIPS et PSE)
- le polytétrafluoréthylène
- les polyoléfines comme boues liquides dans les composants du pétrole

La polymérisation en suspension produit des particules de latex allant de 1 à 1000 μm . Ce procédé comprend le monomère, l'initiateur, le solvant (généralement l'eau) et l'agent de surface. Le monomère et l'initiateur sont tous les deux insolubles dans le solvant (eau), le styrène et le peroxyde benzoylé par exemple. Par conséquent, le monomère est précipité sous forme de gouttes (comme dans la polymérisation en émulsion) mais l'initiateur est présent dans ces gouttes (et non pas dans la phase aqueuse). L'agent de surface a le seul rôle de stabiliser ces gouttes.

Il n'y a pas de micelles dans la phase aqueuse. Le foyer de la polymérisation est maintenant totalement à l'intérieur des gouttes de monomères. Par conséquent, la polymérisation est semblable à la polymérisation en masse (micro) mais elle est limitée à chaque goutte de monomère séparément.

Les problèmes de transfert de chaleur sont fortement diminués, comparé à un procédé de polymérisation en masse réel, du fait que la phase aqueuse peut évacuer la chaleur générée presque en totalité. La distribution moléculaire des particules finales devrait être presque identique à celle des gouttes de monomère en émulsion initiales (à condition que la coalescence soit évitée).

Polymérisation en masse

Dans la polymérisation en masse, le polymère est produit dans un réacteur, dans lequel il n'y a que le monomère avec une faible quantité d'initiateur. Les procédés de polymérisation en masse sont caractérisés par un degré de pureté du produit très élevé, par des performances du réacteur élevées, par des faibles coûts de séparation ainsi que par un taux élevé de viscosité dans les réacteurs. Les procédés en masse peuvent provoquer un encrassement du réacteur et, en cas de produits de polycondensation, ils doivent utiliser un système à vide très poussé.

Les types de produits générés par les procédés en masse sont :

- les polyoléfines
- le polystyrène
- le chlorure de polyvinyle
- le polyméthacrylate de méthyle
- les polyamides
- les polyesters

Il s'agit là de la méthode habituelle pour la polymérisation (condensation) de croissance par étapes.

La réaction est souvent réalisée à températures élevées, mais il n'existe aucun problème réel avec le transfert de chaleur à l'extérieur de la cuve de réaction (c'est-à-dire l'intensification de la température). Le degré de polymérisation augmente de façon linéaire avec la durée, de sorte que la

viscosité du mélange réactif n'augmente que très faiblement. Cette réaction permet aux gaz (la vapeur d'eau par exemple) d'être transférés par bulles hors du système.

Cette méthode peut être utilisée dans le cas d'une polymérisation de croissance en chaîne mais seulement à petite échelle et préférentiellement à basse température. La chaleur et le transfert par bulles peuvent causer des problèmes car le degré de polymérisation (et par conséquent aussi la viscosité du mélange réactif) augmente très rapidement dès l'amorçage de la réaction. Pour certains monomères (le chlorure de vinyle par exemple), le polymère est insoluble dans son propre monomère (au-delà d'une certaine masse molaire critique). Pour cette raison, dans ces cas là, le polymère précipite (sous forme de particules agrégées et gonflées) du monomère après un certain temps. Eventuellement, le monomère est intégralement converti en polymère.

Polymérisation en émulsion

Dans la polymérisation en émulsion, la réaction chimique est réalisée dans des gouttes en suspension dans un solvant, comme il en est le cas pour la polymérisation en suspension, mais aussi dans des structures en émulsion appelées micelles ainsi que dans le solvant. Les procédés en émulsion présentent généralement une faible viscosité de dispersion, un transfert de chaleur satisfaisant, des vitesses de conversion élevées et ils conviennent à la fabrication de polymères ayant une masse molaire élevée. Ils sont aussi caractérisés par des coûts de séparation élevés, par un encrassement des parois du réacteur et par des résidus d'émulsifiants dans le produit et dans les flux de déchets.

Les types de produits générés par les procédés en émulsion sont :

- ABS
- le chlorure de polyvinyle
- PTFE
- CSB
- NBR
- PVA
- PMMA

- les polyacrylates pour les peintures.

La polymérisation en émulsion produit des particules de latex d'une taille de 0,03 à 0,1 μm . Le procédé inclut le monomère, l'initiateur, le solvant (en général l'eau) et l'agent de surface (en général anionique comme le sodium dodécyle sulfate par exemple).

Le monomère ne possède qu'un très faible (mais fini) coefficient de solubilité dans le solvant (styrène dans l'eau par exemple). La majeure partie de ce monomère est présent initialement dans les gouttes dispersées (d'où le terme de polymérisation en émulsion). Un des rôles de l'agent de surface (anionique) est de contribuer à la stabilisation de ces gouttes par adsorption à l'interface goutte/eau. Toutefois, certains monomères sont présents dans la phase aqueuse.

La plus grande partie de l'agent de surface est à nouveau présent dans la phase aqueuse sous forme de micelles et certains monomères seront solubilisés dans les micelles.

Les chaînes de croissance oligomères par radical libre co-micellent avec les micelles existantes de l'agent de surface anionique ajouté. Le lieu primaire de la polymérisation se déplace maintenant vers les micelles, où le monomère solubilisé peut, à ce stade, amorcer la polymérisation. Alors que la polymérisation (dans les micelles) se poursuit, les particules et la distribution du monomère sont progressivement poussées vers la droite. Ce phénomène est identique à celui de la polymérisation en suspension. Le processus de polymérisation continue dans les particules de croissance, jusqu'à ce que le monomère présent dans les gouttes et la solution libre soient totalement évacués. La taille des particules finales est contrôlée par le nombre de micelles présentes (c'est-à-dire la concentration de l'agent de surface initial).

Polymérisation en phase gazeuse

Dans la polymérisation en phase gazeuse, le monomère est introduit dans la phase gazeuse et mis en contact avec un catalyseur déposé sur une structure solide. Les procédés de phase gazeuse permettent une élimination facile de la chaleur de réaction ; ils génèrent peu d'émissions et de déchets et ils ne nécessitent aucun solvant supplémentaire. Les procédés en phase gazeuse ne sont pas applicables à tous les produits finaux et les coûts d'investissement sont relativement élevés, du fait, en partie, que la plupart de ces procédés utilisent des équipements spécifiques à haute pression.

Habituellement, les procédés en phase gazeuse ne s'appliquent qu'aux polyoléfines :

- polyéthylène
- polypropylène

Ce procédé est souvent utilisé, notamment dans les polymérisations d'éthylène et de propylène de type Ziegler-Natta, lorsque le catalyseur est installé sur des particules de

silicium inertes et, ainsi, la réaction se déroule en surface. Cela permet de contrôler la stéréochimie (plus particulièrement pour le polypropylène isotactique).

Polymérisation en solution

Dans la polymérisation en solution, la réaction chimique est réalisée dans une solution de monomère dans un solvant. Les procédés de polymérisation en solution sont caractérisés par un transfert satisfaisant de la chaleur de réaction, par des coûts de séparation élevés, par une utilisation régulière de solvants toxiques et/ou inflammables ainsi que par des traces de solvant contaminant le produit final.

Les types de produits générés par les procédés en solution sont :

- le polyacrylonitrile
- l'alcool polyvinylique
- CSB
- BR
- EPDM
- le polyéthylène

La polymérisation en solution inclut le monomère, l'initiateur et le solvant. Elle est la méthode préférée à adopter pour la polymérisation de croissance en chaîne. Le solvant permet de disperser la chaleur et de réduire l'intensification rapide de la viscosité dans le mélange réactif.

Le polymère peut soluble ou non dans le solvant ; dans ce dernier cas de figure, (styrène + méthanol, par exemple), le polymère est précipité dans la solution (au-delà d'une certaine masse molaire critique).

V.3. Solidification et mise en forme des polymères

Extrusion

L'extrusion est de loin le plus important des procédés de mise en forme des polymères. Le principe de base de l'extrusion monovis est l'utilisation d'une vis sans fin, qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique. Procédé continu, l'extrusion est utilisée pour fabriquer des produits finis ou des semi-produits de section constante (films, plaques, tubes, profilés...) par passage au travers d'un outillage appelé filière. Dans ce cas, les fonctions principales du procédé sont d'assurer la fusion du polymère solide, puis la mise en pression et le mélange du polymère fondu, afin d'alimenter dans de bonnes conditions la filière, qui donnera sa forme au produit fabriqué. L'extrusion est aussi utilisée, en dehors de la mise en forme, pour des

étapes de granulation, de compoundage ou de polymérisation. L'extrusion arrive en tête devant l'injection et les autres procédés de transformation avec environ 1,7 million de tonnes de matières consommées par an (France, chiffres 1999).

Le principe même de l'extrusion est très ancien, si on le fait remonter à la vis d'Archimède, et a été largement utilisé depuis fort longtemps, en particulier dans le domaine alimentaire (fabrication de saucisses ou de pâtes alimentaires). Dans le cas des matériaux synthétiques, le procédé a été appliqué dès le début du XXe siècle au domaine du caoutchouc, puis s'est largement développé depuis dans celui des matières thermoplastiques.

Extrusion monovis

Présentation générale

Description générale et principe de fonctionnement

Le schéma de principe d'une extrudeuse monovis est présenté figure 13. Celle-ci comporte une vis sans fin qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique F, régulé en température par des systèmes de chauffe et de refroidissement. Le polymère sous forme solide (granulés, poudre) est introduit dans la trémie T située à une extrémité de la machine.

La principale fonction de l'extrudeuse est de convoier le polymère, de le fondre et de le mettre en pression, pour qu'il puisse franchir la filière placée à son extrémité. D'un point de vue industriel, on cherche à obtenir à la sortie de la machine un débit régulier, avec un matériau homogène, à la température contrôlée, et des conditions de production satisfaisantes (débit maximal, consommation énergétique limitée). Pour cela, la compréhension des mécanismes mis en jeu, ainsi que leur modélisation sont un point capital.

D'après les observations qui ont été faites sur l'état du polymère dans la machine, on peut distinguer trois zones phénoménologiques :

- la zone de convoyage solide, dans laquelle le polymère est entièrement solide ;
- la zone de fusion, dans laquelle coexistent du polymère encore solide et du polymère déjà fondu ;
- la zone de pompage, dans laquelle le polymère est totalement fondu.

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, 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 :

$$\mathbf{Br} = \frac{\eta V_F^2}{\lambda(T_F - T)}$$

Avec : η (Pa · s) viscosité,

V_F ($m \cdot s^{-1}$) vitesse linéaire de la vis au sommet du filet,

λ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$) conductivité thermique du polymère,

T_F ($^\circ C$) température du fourreau,

T ($^\circ C$) température moyenne du polymère.

Ce nombre de Brinkman est généralement très supérieur à 1 dans le cas de l'extrusion monovis, ce qui montre que l'apport d'énergie mécanique est prépondérant devant celui d'énergie thermique.

Cela est bien sûr lié à la très forte viscosité des polymères fondus (10^3 à 10^5 Pa · s) et à leur faible conductivité thermique ($0,1$ à $0,3$ $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$).

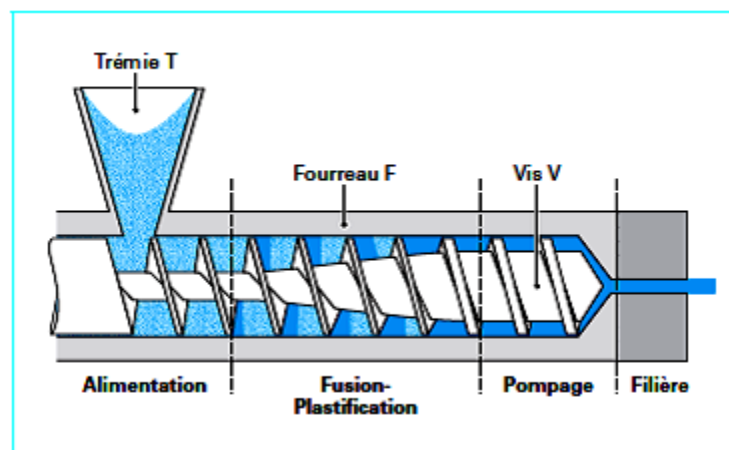


Figure 13. Schéma de l'extrudeuse monovis

Géométrie du système vis/fourreau

La géométrie de la vis est définie pour permettre au procédé de travailler dans des conditions optimales en fonction du polymère utilisé. Le diamètre du corps de la vis augmente généralement de l'arrière à l'avant de la machine, soit sur toute la longueur, soit sur une partie seulement de la longueur. Dans ce dernier cas, qui est le plus courant, on peut distinguer trois zones géométriques (figure 13) :

- la zone d'alimentation, où la profondeur du chenal est constante ;
- la zone de compression, où la profondeur du chenal diminue progressivement ;

— la zone de pompage, où la profondeur du chenal est à nouveau constante, mais plus faible qu'en alimentation. On trouve parfois dans cette zone de pompage des éléments de mélange. Ces vis sont conçues pour que la zone de compression s'identifie à la zone de fusion, mais ceci n'est en général pas vérifié pour toutes les conditions opératoires.

Les éléments géométriques essentiels de ce système vis-fourreau sont indiqués sur la figure 14. Quatre paramètres suffisent à définir cette géométrie :

- le diamètre intérieur du fourreau : D ;
- le diamètre du corps, ou diamètre interne, de la vis : d ;
- le pas de la vis : B ;
- l'épaisseur du filet : e .

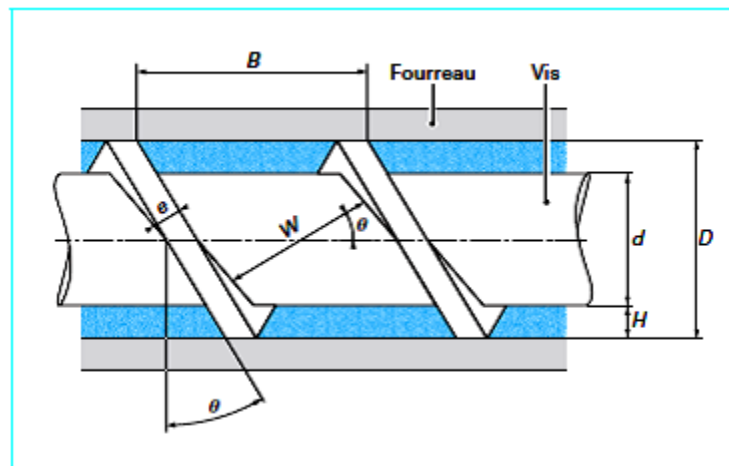
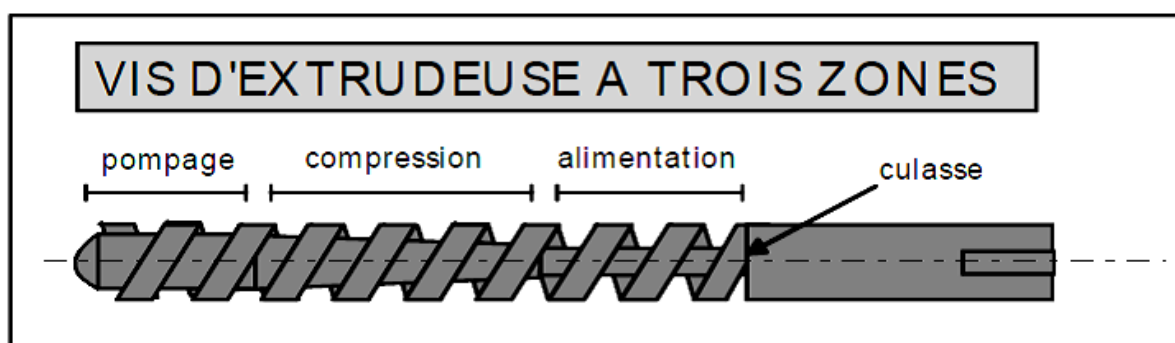


Figure 14 – Géométrie du système vis-fourreau



Les deux premiers permettent de calculer la profondeur du chenal H

$$H = \frac{D - d}{2}$$

Le pas détermine l'angle θ que fait le filet avec un plan perpendiculaire à l'axe de la vis. En fait, cet angle θ varie avec la distance à l'axe de la vis, mais si la profondeur du chenal est faible par rapport au diamètre de la vis (ce qui est généralement le cas), on se contente d'une valeur unique, prise au niveau du fourreau :

$$\tan \theta = \frac{B}{\pi D}$$

La largeur du chenal peut être décrite par :

$$W = B \cos \theta - e$$

La longueur déroulée d'un tour d'hélice s'écrit :

$$Z = \frac{\pi D}{\cos \theta} = \frac{B}{\sin \theta}$$

Zone de fusion

La zone de fusion est une zone clé du procédé. C'est là en effet que se fait le passage de l'état solide à l'état fondu. Le contrôle du mécanisme de fusion permettra d'obtenir un produit sans infondés, homogène et exempt de dégradation

Mécanisme de fusion

On pourrait penser que la fusion du polymère dans l'extrudeuse s'effectue de façon désordonnée. Des expériences, consistant à arrêter l'extrusion en régime permanent, à refroidir la machine, puis à prélever le polymère contenu entre la vis et le fourreau, montrent au contraire que la fusion se développe le plus souvent de manière ordonnée.

On observe généralement les faits suivants :

- le polymère fond en premier au contact du fourreau, formant un film liquide au-dessus du solide ;
- le film ainsi formé s'épaissit progressivement, puis il se forme une poche liquide à l'arrière du chenal (figure **15**), qui s'élargit ensuite lorsque l'on progresse de l'arrière vers l'avant de la machine. Le solide forme corrélativement, à l'avant du chenal, un lit continu qui rétrécit de l'arrière à l'avant.

Plus précisément, l'expérience met en évidence deux mécanismes successifs (figure **15a**) :

- la zone dite de « **retard à la fusion** », correspondant à la formation et à la croissance d'une couche de polymère liquide au contact du fourreau,

— la zone de **fusion proprement dite**, correspondant à l'accumulation progressive du polymère fondu le long du filet arrière.

La fusion du polymère débute à l'interface entre le polymère solide et le fourreau, du fait de l'énergie dissipée par frottement, même si le fourreau est refroidi. De toute façon, dès que le polymère solide atteint la zone où le fourreau est chauffé au-delà de la température de fusion (ou de transition vitreuse), il se produit une fusion à la surface en contact avec le fourreau. À partir de là, il se forme un film liquide entre le polymère solide et le fourreau, plus ou moins rapidement selon que le polymère fondu mouille plus ou moins bien le métal du fourreau. Tant que l'épaisseur de la couche de polymère fondu δ reste inférieure au jeu δ_f existant entre l'arête de filet et le fourreau, le polymère fondu peut passer librement au-dessus des filets et les mécanismes de convoyage du polymère solide sont toujours valables. Par contre, quand cette couche de polymère fondu devient plus importante que le jeu entre l'arête de filet et le fourreau, elle se met en pression le long du filet arrière selon un mécanisme de patin hydrodynamique (figure **15b**). Cette pression peut alors être suffisante pour déformer le polymère encore solide et former une poche de polymère liquide le long du filet arrière. Le mécanisme se poursuit alors de la façon suivante (figure **15c**) :

— la poche de polymère liquide est sous pression et repousse le solide vers le filet avant et le fourreau ; la section du lit solide reste pratiquement rectangulaire, de largeur décroissante ;

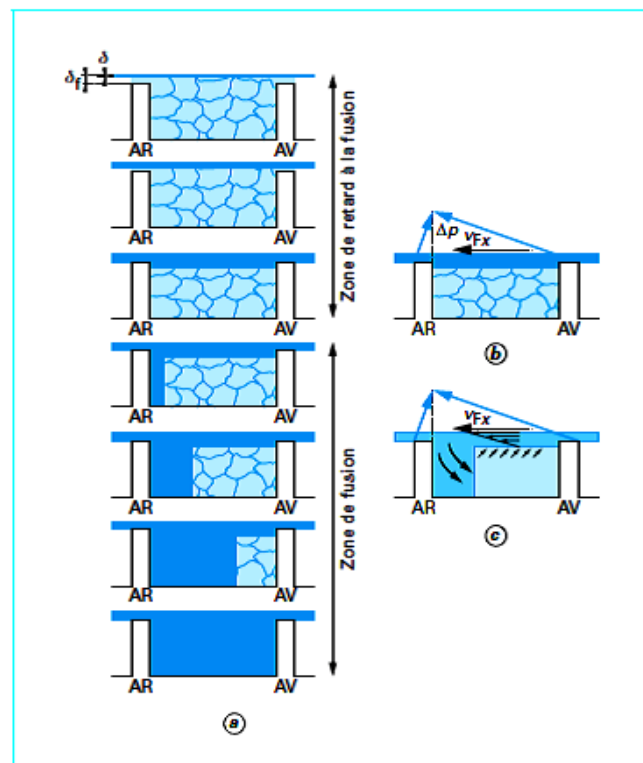


Figure 15 – Mécanisme de plastification

- le solide fond par conduction et cisaillement à sa partie supérieure, au contact du fourreau, formant un film liquide de faible épaisseur (inférieure au millimètre) ;
- ce film est entraîné vers l'arrière par le mouvement relatif du fourreau et vient enrichir la poche de polymère fondu.

En fait, ce mécanisme de fusion, même s'il est très fréquemment rencontré, n'est pas unique et d'autres modes ont pu être observés expérimentalement.

Zone de pompage

Description de la zone de pompage

La zone de pompage sert à porter le polymère à la pression nécessaire pour assurer l'écoulement dans la filière au débit voulu.

Si l'on déroule le chenal de la vis et que l'on fait l'hypothèse du fourreau tournant, on obtient un écoulement de cisaillement dans une cavité parallélépipédique de longueur Z_p , de largeur W et de hauteur H_p . La direction du cisaillement fait un angle θ avec l'axe du chenal de la vis. (figure 16). Dans cette géométrie, on considérera que l'écoulement peut se décomposer en deux écoulements indépendants (ce n'est vrai en toute rigueur que pour des fluides newtoniens) :

- un écoulement transversal, dans un plan perpendiculaire au chenal de la vis ;
- un écoulement longitudinal, le long du chenal, en direction de la filière.

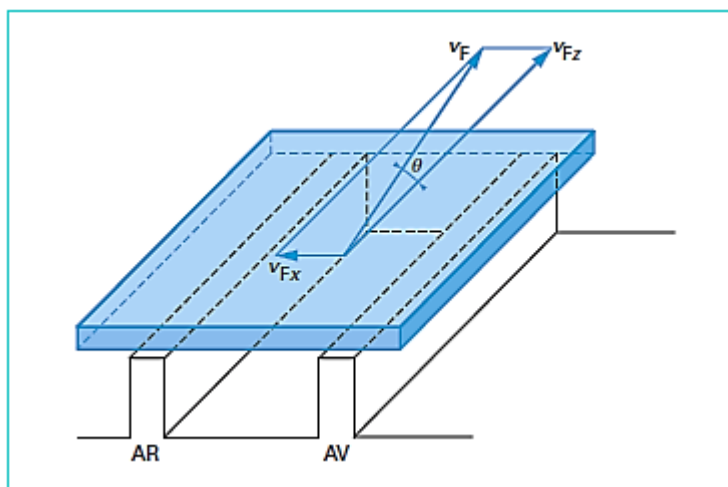


Figure 16. Représentation locale déroulée du système vis-fourreau

Extrusion bivis

Description générale

Dans une extrudeuse bivis, on trouve assemblées sur un châssis unique les parties suivantes (figure 17) :

- l'ensemble vis-fourreau avec ses accessoires de chauffage et de refroidissement (A) ;
- le groupe d'entraînement (ensemble du réducteur, du diviseur de couple et du limiteur) (B) ;
- le moteur principal (C) ;
- des dispositifs pour l'alimentation en matière (doseurs, D) ou pour son traitement (par exemple, dispositif de dégazage) ;
- un dispositif de coupe ou de mise en forme de la matière extrudée (filière), s'il y a lieu (E) ;
- pour la conduite de l'extrudeuse, une armoire de pilotage (F) qui réunit les variateurs des moteurs, les organes de démarrage et de sécurité, les dispositifs de régulation, de commande, d'affichage et de mesure.

Le châssis peut être un simple support des organes ci-dessus mais il peut également comporter un dispositif d'ouverture du fourreau, manuel ou assisté, permettant ainsi d'avoir facilement accès aux vis pour nettoyage, inspection ou maintenance. Le système d'ouverture le plus utilisé est constitué d'une glissière assurant le coulissement du fourreau par rapport aux vis, mais on trouve également des systèmes à ouverture en « portefeuille », où le fourreau est articulé autour d'une charnière latérale.

L'ensemble vis-fourreau constitue la partie active et assure le traitement de la matière. Le fourreau en constitue l'enveloppe extérieure. Les matières à traiter, ainsi que les éventuelles charges et additifs, y sont introduites par un orifice d'alimentation principal et éventuellement des orifices secondaires, grâce à des dispositifs doseurs pour les solides ou grâce à des pompes pour les liquides. Le fourreau est régulé en température par l'association d'un chauffage, en général électrique, piloté par des sondes de contrôle de température, avec un dispositif de refroidissement, la plupart du temps à circulation d'eau. À l'intérieur du fourreau tournent les deux vis qui avalent la matière et la font progresser.

La matière traitée sort de l'extrudeuse par son extrémité aval à travers une filière, elle-même fixée sur la pièce d'obturation de l'extrémité du fourreau appelée « plaque avant ». La filière peut être munie d'un couteau granulateur pour couper le produit directement à sa sortie et fabriquer des granulés ou des produits courts.

D'autres dispositifs de mise en forme peuvent aussi être utilisés.

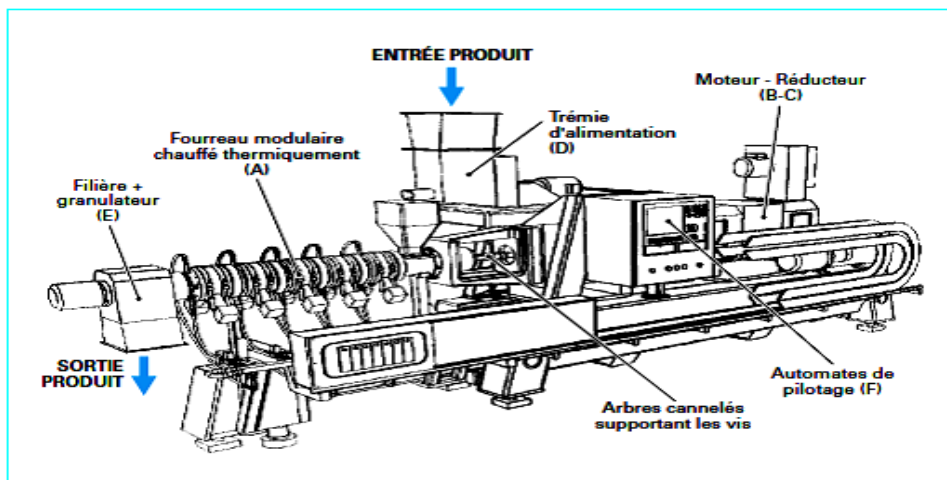


Figure 17 – Schéma d'une extrudeuse bavis

Les différents types d'extrudeuses bavis

Les deux critères principaux permettant de classer les différents systèmes bavis sont explicités à la figure 18:

- le sens de rotation : les vis sont dites corotatives si elles tournent dans le même sens et contrarotatives si elles tournent en sens inverse l'une de l'autre. Bien entendu, cela a une importance capitale sur les conditions d'écoulement, comme on le verra par la suite ;
- l'interpénétration : les vis sont dites interpénétrées lorsque le filet de l'une pénètre plus ou moins profondément dans le chenal de la vis voisine. On parlera alors de vis partiellement ou totalement interpénétrées. Dans le cas contraire, on aura affaire à des vis tangentes ou non interpénétrées.

D'autres différences peuvent exister, mais celles-ci jouent un rôle moins important que les deux critères précédents. On peut ainsi trouver :

- des profils conjugués ou non : on parle de profils conjugués (ou autonettoyants) lorsque la surface de l'une des vis épouse parfaitement la surface de l'autre. Dans ce cas, la matière peut éventuellement passer d'une vis à l'autre à travers la zone d'interpénétration, mais pas d'un côté à l'autre d'un plan passant par les axes des deux vis ;
- des vis parallèles ou coniques (uniquement dans les systèmes contrarotatifs) ;
- des profils de vis monofilets ou multifilets (nombre de filets hélicoïdaux dans une section perpendiculaire à l'axe des vis). En pratique, on trouve des éléments à un, deux ou trois filets. Pour les systèmes corotatifs, les vis à deux filets sont les plus fréquentes ;

— des vis modulaires ou non : une vis modulaire est constituée d'éléments indépendants que l'on peut agencer comme l'on veut le long des axes de vis pour constituer un profil, suivant les fonctionnalités que l'on désire obtenir.

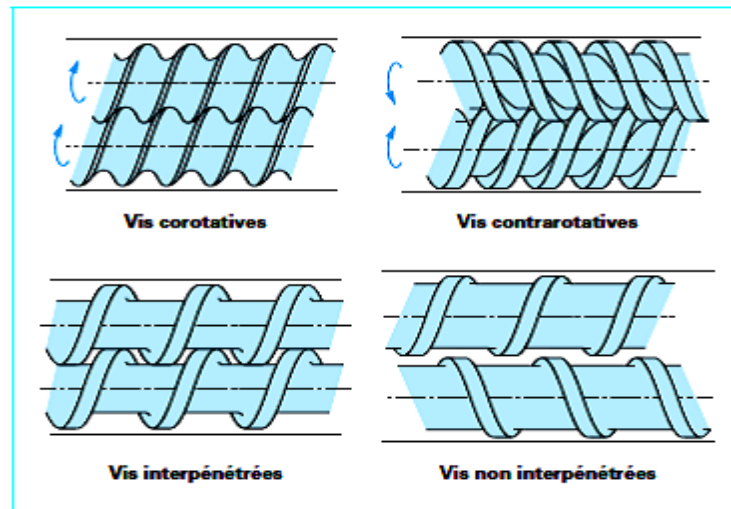


Figure 18 – Les principales configurations d'extrudeuses bavis

En fonction de l'application recherchée, on va donc choisir tel ou tel type d'extrudeuse bavis. Par exemple, les systèmes contrarotatifs interpénétrés sont très utilisés pour l'extrusion de compounds PVC (réalisation de tubes ou de profilés), alors que les systèmes corotatifs interpénétrés sont plutôt recherchés pour des applications de compoundage, de dispersion de charges ou de modifications chimiques.

Les systèmes non interpénétrés sont plus rares. Ils sont le plus souvent employés pour des opérations de mélangeage, le développement de réactions chimiques ou la dévolatilisation (enlèvement des substances volatiles). De manière générale, on peut indiquer que l'extrusion bavis a connu des développements importants dans tous les cas où, en raison de fonctionnalités que n'autorise pas l'extrusion monovis, elle a permis de passer d'un système de production de type batch à un système de type continu, plus performant d'un point de vue économique.

De la classification présentée à la figure 18 découlent des propriétés géométriques des chenaux de vis et donc des types caractéristiques d'écoulements que l'on va rencontrer dans ces différents systèmes. Comme on peut le voir sur la figure 19, le passage d'une vis sur l'autre dans la zone d'interpénétration est plus ou moins ouvert et aisé suivant la configuration. Pour des vis contrarotatives (figure 19a), ce passage est très limité. La matière occupe sur chacune des vis un espace en forme de C, au sein duquel elle recircule, avec très peu d'échange avec les chambres en C voisines. Le matériau progresse de l'amont vers l'aval

grâce à la rotation des vis, qui jouent ici le rôle de pompe volumétrique. Pour des vis corotatives autonettoyantes à deux filets (figure 3b), ce passage est au contraire très ouvert et la matière passe très facilement d'une vis sur l'autre, en suivant une trajectoire hélicoïdale en forme de huit. On a ici un écoulement de type « chenal continu », très semblable à celui que l'on pourrait observer sur une extrudeuse monovis. Entre ces deux situations extrêmes, on peut bien sûr imaginer tous les cas intermédiaires, où la zone d'interpénétration, bien que permettant le passage d'une vis sur l'autre, puisse le restreindre de manière importante (figure 19c). Pour les systèmes partiellement interpénétrés ou non interpénétrés, la situation est encore différente et sera évoquée plus loin.

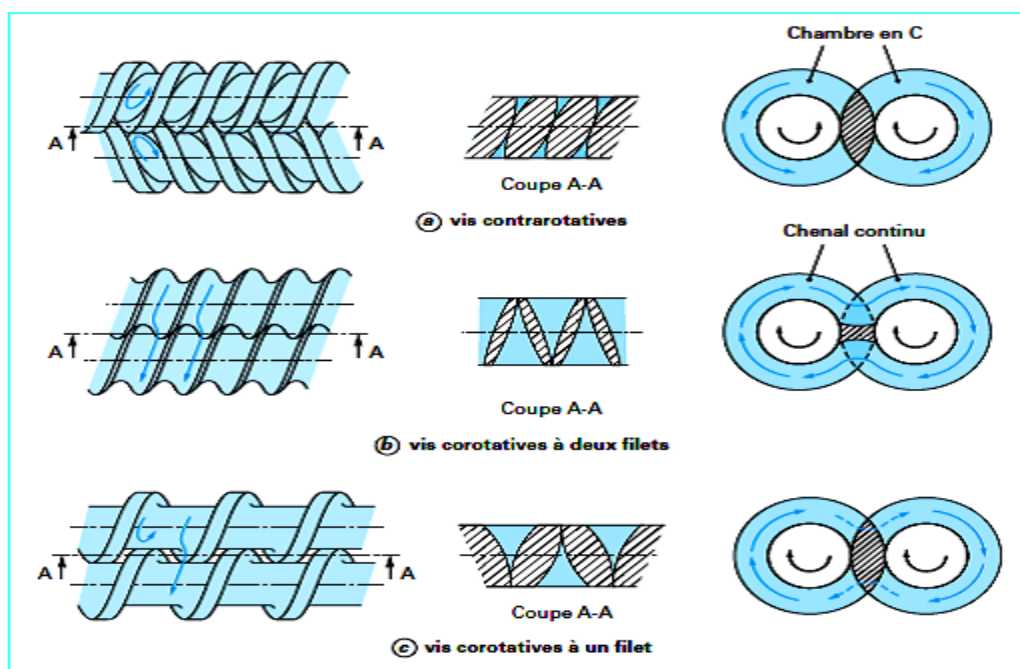


Figure 19 – Géométrie, coupe transversale de la zone d'interpénétration et mode d'écoulement pour trois types de vis

Extrusion-soufflage

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

Pour l'obtention des corps creux par extrusion-soufflage à partir d'un polymère plastifié, on produit une « paraison » tubulaire en forçant la matière à passer dans l'entrefer circulaire avant de s'écouler à l'air libre, puis on procède à l'emprisonnement de cette paraison encore chaude pour qu'elle prenne les formes du moule (figure20).

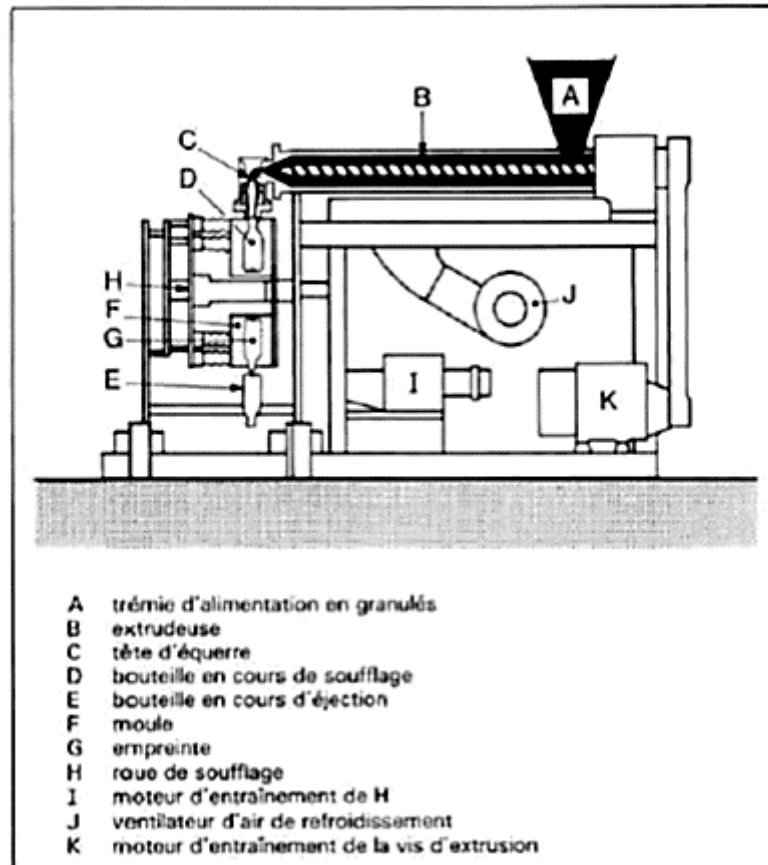


Figure 20. Procédé d'extrusion soufflage

L'extrusion-soufflage possède de nombreux avantages. Elle permet :

- d'utiliser des moyens automatiques ;
- de réaliser des pièces de formes complexes et de grandes dimensions ;
- d'utiliser des moules présentant un coût raisonnable ;

Extrusion gonflage

La technique de production de film par extrusion-gonflage consiste à extruder une mince gaine qui, momentanément pincée, est gonflée avec de l'air (figure 21). L'air qui remplit la gaine est introduit par l'axe de la tête-filière annulaire utilisée pour cette production. Le dispositif de refroidissement placé au niveau de la gaine déjà gonflée arrête l'étirage du film. Ce phénomène est provoqué par la solidification de la matière refroidie qui supporte alors les

contraintes provenant du gonflage. Le film, en forme de bulle, est ensuite aplati par un dispositif appelé "foulard" composé de deux panneaux convergeant vers les rouleaux pinceurs. L'étirage en direction transversale est obtenu par la surpression de l'air dans la gaine extrudée et pincée par deux rouleaux-tireurs (un rouleau est recouvert de caoutchouc et l'autre est en acier). L'étirage en direction longitudinale résulte du rapport de la vitesse de l'étirage et de la vitesse d'extrusion. Les rouleaux-pinceurs jouent le rôle d'un bouchon qui reste fixe quand le film se déplace. Les petites fuites entre les rouleaux ou par les petits trous sont compensées par une soupape automatique très sensible de soufflage d'air. La pression d'air emprisonné dans la gaine varie de 0,01 à 0,02 MPa. On applique l'extrusion-gonflage vers le haut pour les PEbd, PEhd et leurs copolymères. L'extrusion vers le bas, avec le refroidissement dans un bain d'eau se pratique pour le PP, ce qui donne une excellente transparence au film. L'extrusion horizontale, assez délicate à réaliser, est utilisée dans le cas du PVC, ce qui supprime la tête d'équerre dans laquelle la matière risque de brûler.

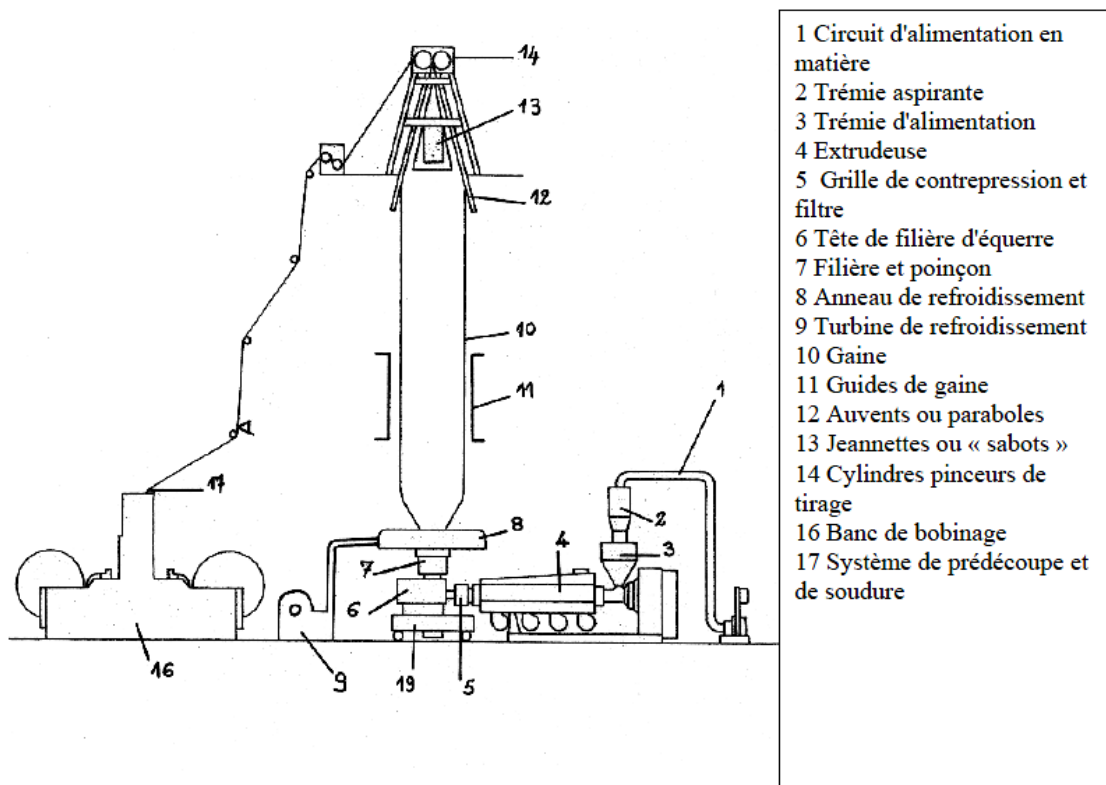


Figure 21. Principe de l'extrusion gonflage

Filage des textiles

Le filage est utilisé pour la fabrication des fils chimiques (artificiels ou synthétiques). Le principe est, à partir d'une matière à l'état fondu ou en solution, de l'extruder au travers d'une filière constituée d'un certain nombre d'orifices (de quelques unités à plusieurs milliers).

Procédé par voie fondue

Le procédé par voie fondue est le plus utilisé (figure 22). Il s'applique aux polymères ayant un point de fusion bien défini. C'est le cas des matières synthétiques les plus courantes telles que : – polyamide, – polyoléfine, – polyester, et des matières artificielles suivantes : – fils de verre, – fibres céramiques.

Avec cette technique, le polymère est fondu et envoyé sous pression au travers de la filière. En sortie de filière, les filaments sont refroidis, étirés et bobinés.

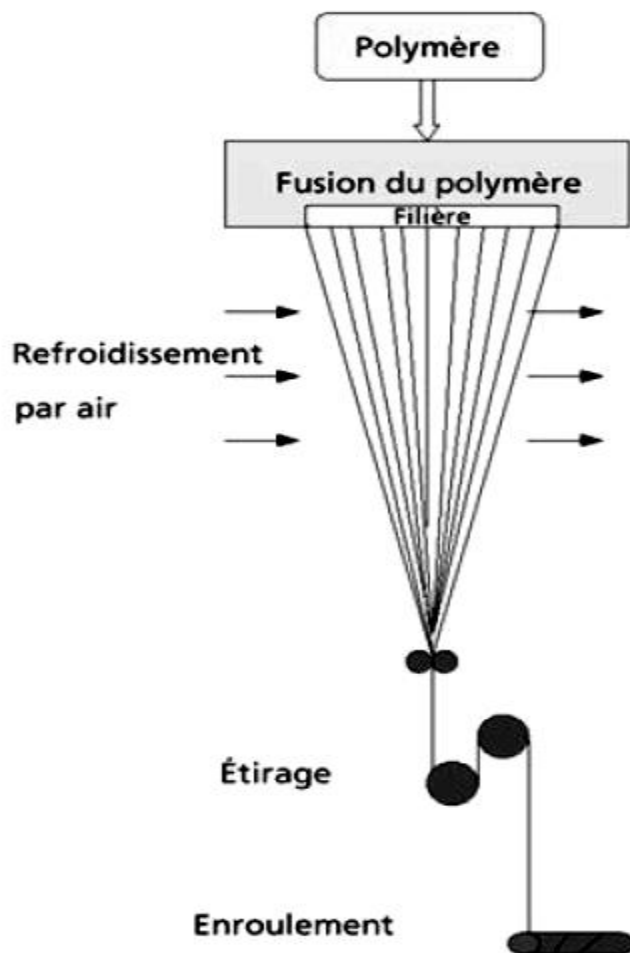


Figure 22– Filage par fusion.

Procédé en solution

Le principe du procédé en solution est de dissoudre le polymère dans un solvant, de le filer puis de régénérer le polymère en éliminant le solvant après filage. On distingue deux types de procédés avec solvant en fonction de l'étape de régénération après filage :

- *régénération dans un bain de coagulation* dite par « voie humide » (figure 23a) : cas de l'acrylique, de la viscosse, des polyuréthanes ;
- *régénération par séchage* du solvant dite par « voie sèche » (figure 23b) : cas du polychlorure de vinyle.

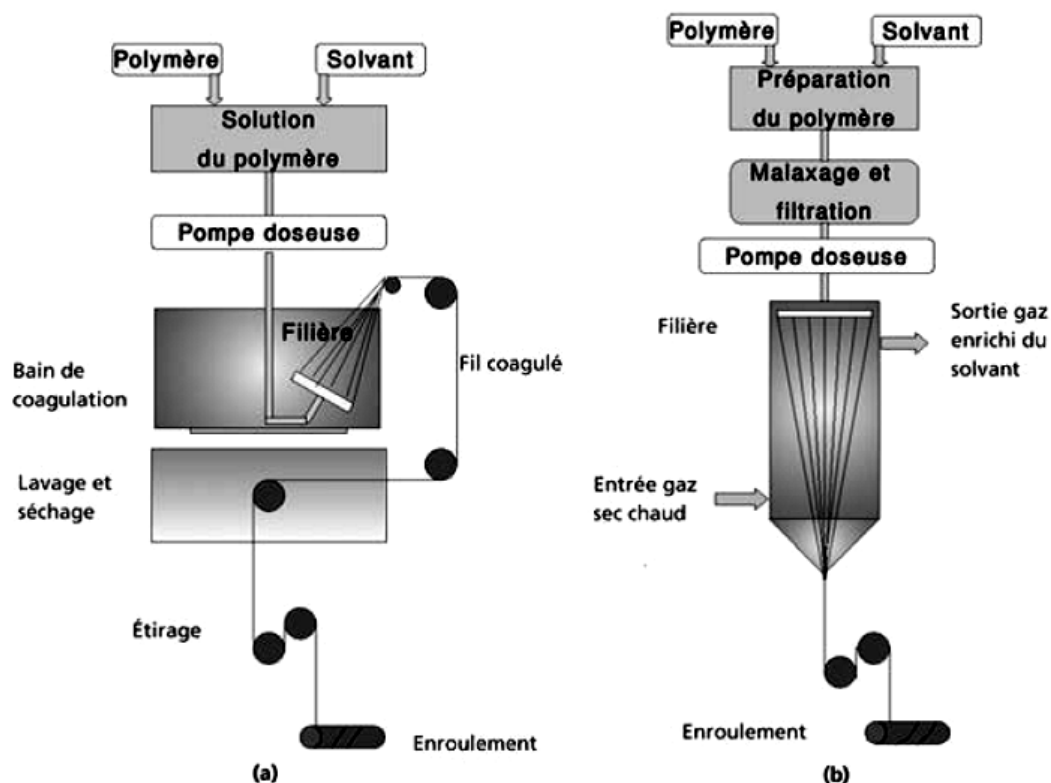


Figure 23– Filage en solution : a) « voie humide » ; b) « voie sèche ».

Le filage permet d'obtenir un mono filament ou des multi filaments ou des câbles (plusieurs centaines à plusieurs milliers de filaments). Le filage est toujours complété par un étirage, qui permet d'aligner les macromolécules de la matière, ce qui assure de meilleures propriétés mécaniques aux filaments obtenus.

Calandrage

Le calandrage est une technique de fabrication de feuilles, de plaques ou de films par laminage d'une matière thermoplastique entre plusieurs cylindres parallèles constituant la

machine appelée : calandre (figure 24). Cette dénomination est accordée à toutes les machines équipées de cylindres indépendamment du procédé auquel elles sont prédestinées. On peut les ranger en trois groupes : - les calendres utilisées pour la fabrication de feuilles, de films et de plaques souples à partir d'un mélange d'une résine thermoplastique avec les différents additifs. Ce sont les machines lourdes à plusieurs cylindres (4-6) de grand diamètre (- 800 mm) chauffés, consommant beaucoup d'énergie (entraînement, chauffage, refroidissement) et accompagnées d'un équipement auxiliaire important (dispositifs d'alimentation, de contrôle, de réception). Ce sont les calendres de production ; - les calendres destinées à la finition de feuilles ou de plaques extrudées ou co-extrudées par la filière plate. Les cylindres de diamètre 600 mm ont une longueur jusqu'à 850 mm et sont refroidis. Les calendres sont placées en aval de l'extrudeuse équipée d'une tête plate qui les alimentent. Les cylindres donnent la brillance de la surface ou un aspect décoratif (par exemple le grainage) et règlent l'épaisseur de plaques. Leur nombre varie entre 2 et 5. Ces machines présentent une partie constituante de la chaîne d'extrusion de plaques. On les appelle les calendres de lissage ; - les calendres auxiliaires utilisées par plusieurs techniques de finition, telles que : complexage, plaxage, enduction, contre-collage et grainage. Ces machines sont plus légères, les cylindres sont de dimensions moins importantes, chauffés ou refroidis. On peut les appeler les calendres légères. Comme plusieurs éléments de ces machines et leur fonctionnement sont identiques, on les présente ensemble.

Principe du procédé

Le fonctionnement d'une chaîne de calendrage est présenté sur la figure 21a et 21b. La matière à calandrer passe d'abord par le malaxage et le préchauffage. Dans le cas du PVC la matière passe d'abord par un mélangeur interne (1) et ensuite par un mélangeur à cylindres (2), d'où elle sort sous forme d'un ruban gélifié ou de morceaux de crêpe qui alimente, par un convoyeur (3), la calandre. Un séparateur magnétique détecte les éventuelles impuretés métalliques (4) qui peuvent endommager gravement les cylindres de la machine (5). Le mélange passe ensuite par un ensemble de cylindres chauds pour en sortir (6) sous forme d'une large feuille refroidie sur les tambours (8). Ce passage par passes successives entre les cylindres est indispensable pour chasser toutes les bulles d'air emprisonnées dans le film. Pendant cette opération, les bords de la feuille sont cisailés des deux côtés par un dispositif à couteau rotatif. Un appareil de contrôle d'épaisseur (9) vérifie en continu le film qui est dirigé vers l'enrouleur de produit fini (10). Si on donne à la surface un dessin spécial, la feuille encore chaude passe entre le cylindre graveur et le cylindre presseur (7). Pour alimenter la calandre, on utilise de plus en plus les extrudeuses et les extrudeuses-mélangeuses

(paragraphe précédent) qui exercent toutes ces actions dans une seule opération en continu et qui extrudent directement par la filière plate la matière plastifiée entre les cylindres de la calandre.

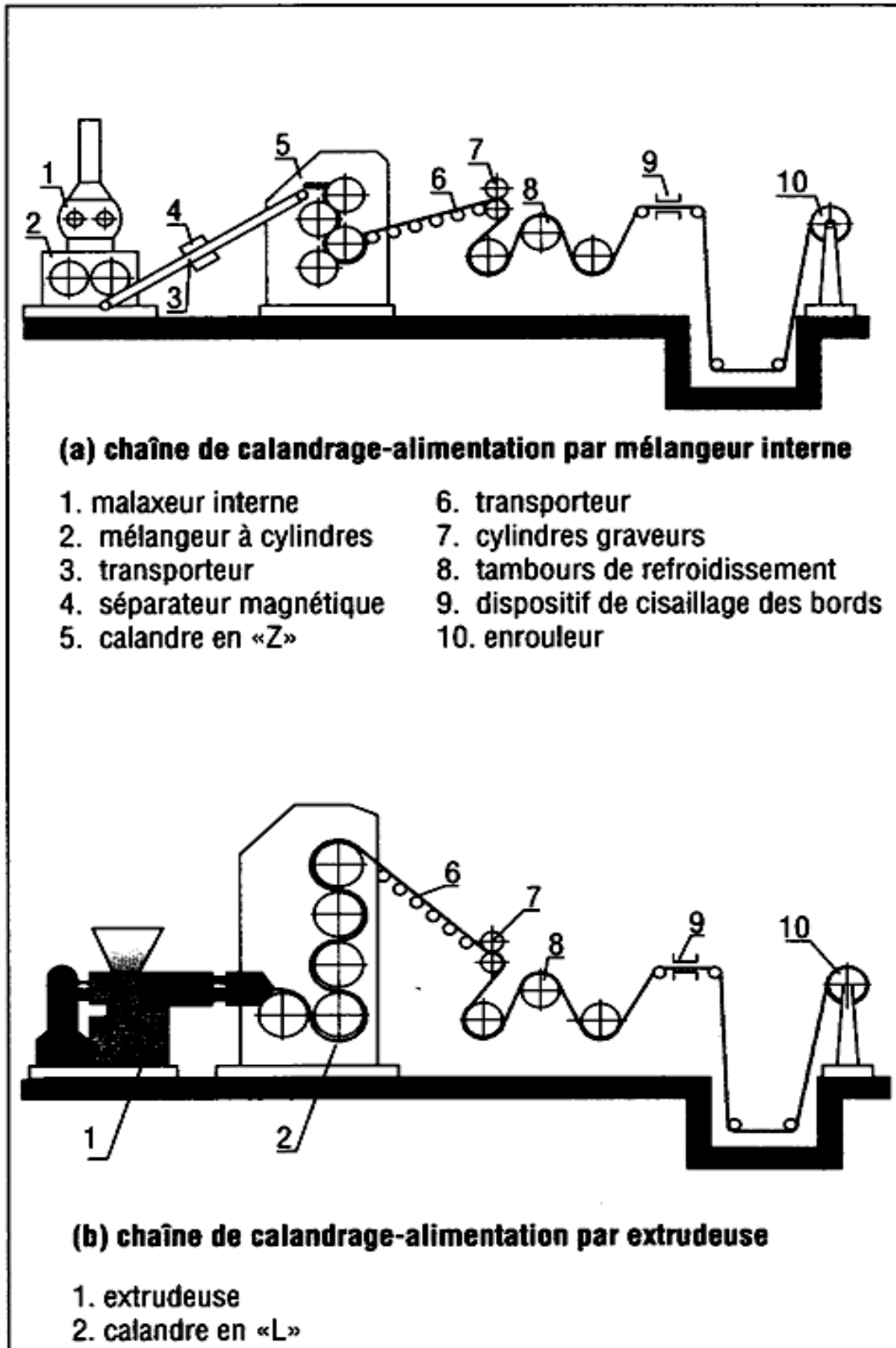


Figure 24. Chaines de calendrage

Thermoformage

La technique de thermoformage utilise les matériaux semi-ouvrés tels que les plaques ou feuilles rigides en matière thermoplastique pour les transformer en objets tridimensionnels avec une épaisseur de paroi proche de l'épaisseur du matériau de départ. L'utilisation de cette technique est possible grâce au comportement des matières thermoplastiques (plus marqué pour les amorphes) qui prennent une consistance caoutchouteuse au-dessus de leur température de transition vitreuse et peuvent donc être aisément formées et figées dans cet état par refroidissement.

Matières thermoformées et exemples

Les matières thermoplastiques qui se transforment par thermoformage sont : les produits vinyliques (PVC et ses copolymères), les styréniques et leurs copolymères, les méthacryliques, les celluloses, les polycarbonates.

Il faut noter que les thermoplastiques amorphes se thermoforment mieux que les cristallins. La possibilité d'utilisation de la matière transparente ou translucide offre des possibilités très avantageuses par rapport à celles données par les matériaux classiques pour les luminaires.

Exemples d'application

ABS : carrosseries, bateaux, planches à voile, carénage de motos ou de machines diverses, etc.

PMMA ou PC : cockpits d'avions et de planeurs, vitres blindées, vasques de luminaires, panneaux publicitaires.

PS-choc, PVC : emballages de produits alimentaires et d'articles de consommation.

Technique du thermoformage

Le cycle de thermoformage classique se compose de cinq étapes (figure 25) :

fixation d'une plaque ou d'une feuille rigide sur un cadre,

chauffage de la plaque au-dessus de la température de transition vitreuse du polymère (chauffage au four ou par IR et fixation ou glissement sur un cadre) (figure 25.1 et figure 25.2),
formage par aspiration et maintien de la déformation de la feuille jusqu'à la fin du refroidissement (figure 25.3),

refroidissement de l'objet à la température ambiante (figure 25.4),

-démoulage et découpage des bords s'il est nécessaire (figure 25.5).

Bien que la méthode soit relativement simple, l'industrie utilise dans la plupart des cas des machines spéciales pour ce type de mise en œuvre.

Il existe plusieurs techniques de formage que l'on peut classer en trois groupes qui se distinguent par l'obtention de pièces d'épaisseurs différentes :

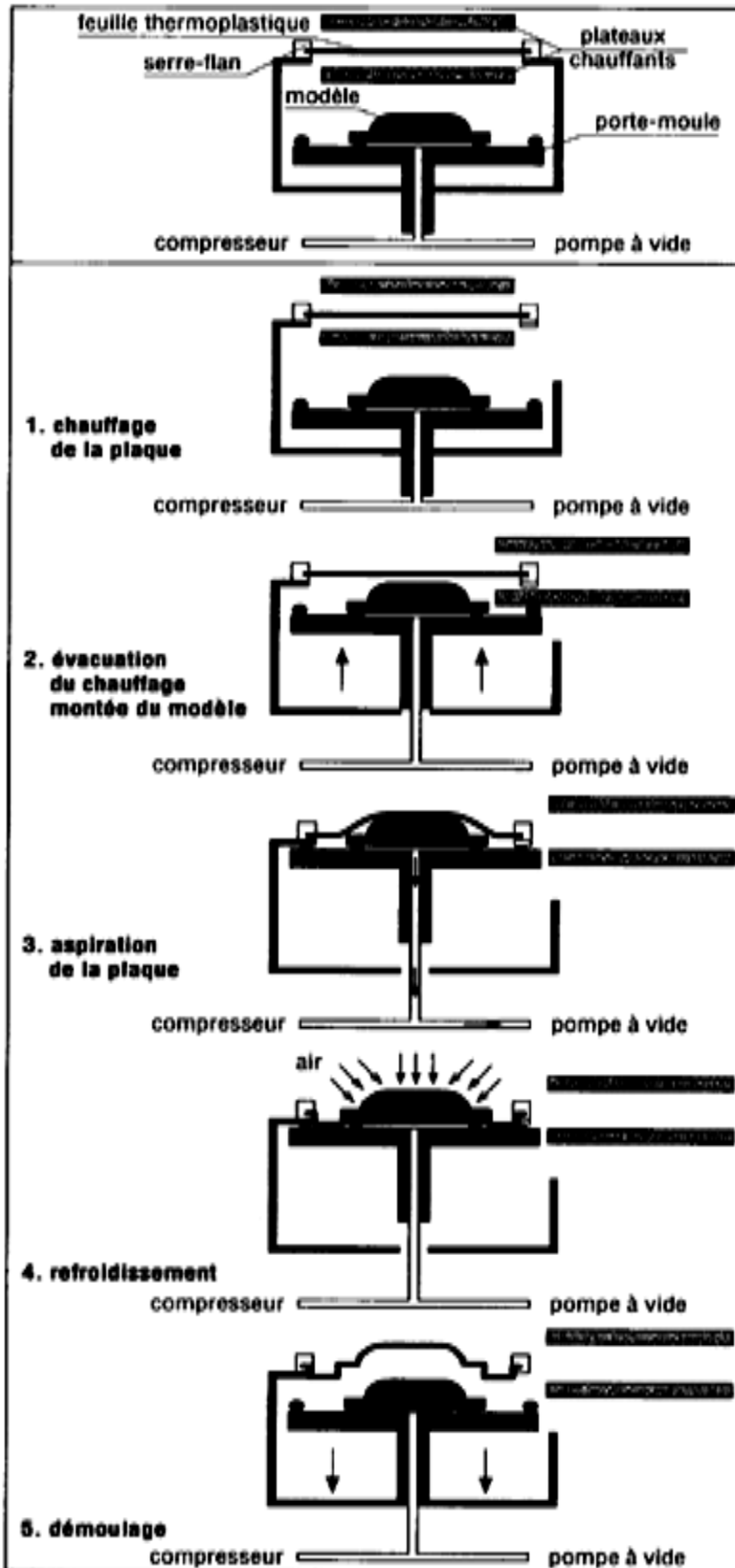


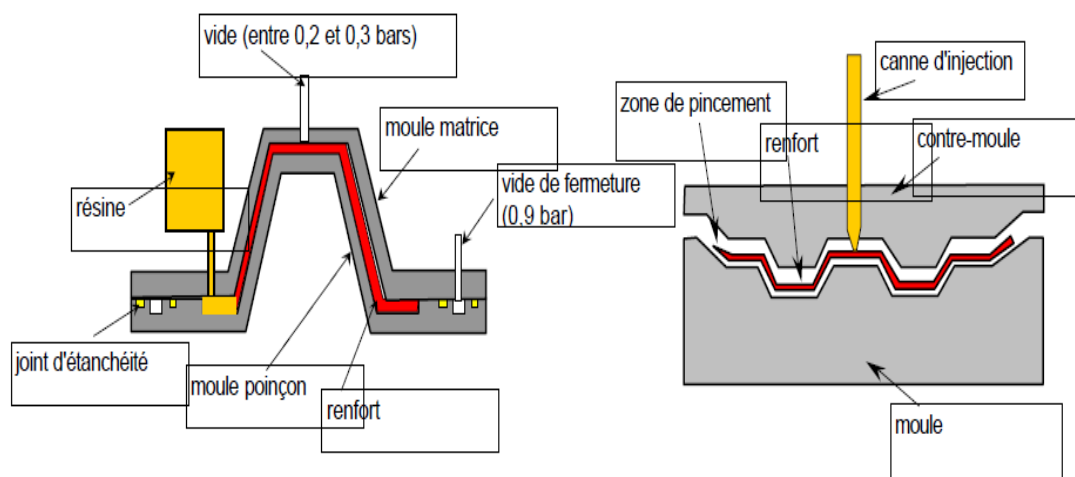
Figure 25. Principe du thermoformage

V.4. Procédés de moulage

Ce procédé d'obtention permet de produire très rapidement (en une seule opération) des objets de qualité en grande quantité, même si les formes sont complexes, dans des gammes de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes. On utilise l'injection plastique dans de très nombreux domaines : l'automobile, le jouet, l'électronique, la robotique, l'aéronautique, l'aérospatial, le médical... Téléphones, seringues, pare chocs, capots, carters, boîtes...

Moulage par injection base pression de résine liquide (RTM)

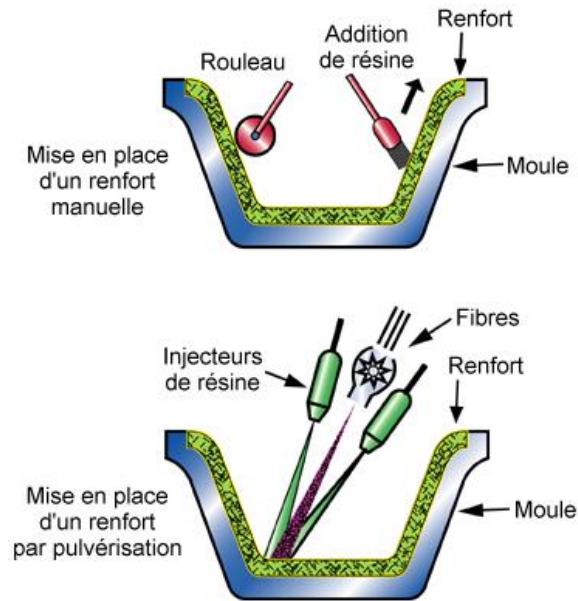
Le moulage par injection de résine liquide RTM (Résine Transfert Molding) s'effectue entre moule et contre-moule rigides. Le renfort (mats, préforme, éventuellement tissus) est disposé dans l'entrefer du moule. Une fois celui-ci solidement fermé, la résine, accélérée et catalysée, est injectée sous faible pression (1.5 à 4 bars) à travers le renfort jusqu'au remplissage complet de l'empreinte. Après durcissement de la résine, le moule est ouvert et la pièce démoulée.



Moulage au contact (mise en œuvre manuelle)

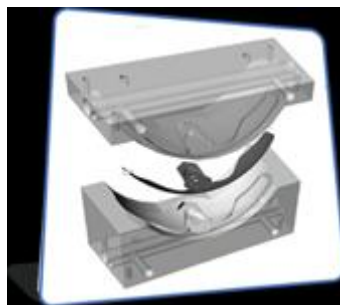
Dans les méthodes de mise en œuvre manuelle, (hand lay-up), on enduit avec une résine un moule ouvert (fait en polymère renforcé de fibres de verre, en bois, en plâtre, en ciment ou en alliage métallique léger) pour donner au moulage une peau superficielle lisse. Lorsque celle-ci a réticulé, on dépose à la main une couche de renfort (des fibres de verre ou de carbone tissées ou tricotées), on applique la résine avec une brosse ou un pistolet vaporisateur, on lamine ensuite la couche pour distribuer complètement la résine à travers les fibres. On répète cette opération couche après couche jusqu'à ce que l'on atteigne l'épaisseur désirée. Dans le pistorage (spray-up) on mélange une résine avec des fibres coupées que l'on pistole dans un

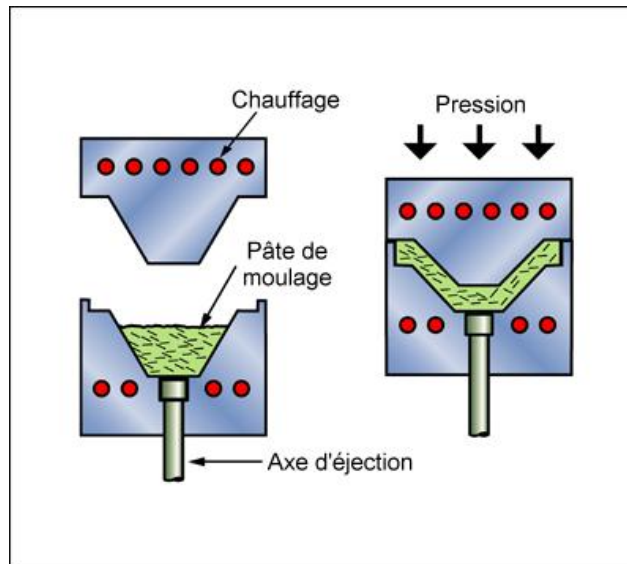
moule; on utilise cette technique pour de grandes pièces pour lesquelles le pourcentage de renfort doit être important.



Moulage par compression

Le moulage de compounds pré-impregnés en masse (BMC) est un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. Dans ce procédé, on place une préforme de compound de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré-mélangés dans des proportions optimales) dans la cavité d'un moule chauffé, et ensuite on la presse aux dimensions finales. On utilise des pressions qui vont de 0,5 à 15 MPa.





Moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S-RIM)

Il s'agit d'un moulage entre moule et contre-moule. Le renfort sous forme de mats ou de tissus (20 à 60 % pondéral) est disposé préalablement dans le moule chauffé (100 - 150 °C). Le système de résine à deux composants très réactifs est injecté sous pression (20 - 30 bars). Après durcissement (1 à 3 min), la pièce peut être démoulée.

Bibliographie

1. M. Grout et P. Salaün, instrumentation industrielle. Spécification et installation des capteurs et vannes de régulation, 4e édition, l'usine nouvelle, Dunod, 2015.
2. D. Lepadatu, Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse, thèse de doctorat, école doctorale d'angers, p. 1, 2006.
3. A.f. Gourgues lorenzon et J.M. Haudin matériaux pour l'ingénieur, Mines paris.
4. B. Vergnes, M. Chapet, Extrusion – Procédés d'extrusion bivis, Techniques de l'Ingénieur, 2001.
5. B. VERGNES, Stéphan Puissant, Extrusion – Extrusion monovis (partie 1), Techniques de l'Ingénieur, 2002.
6. S. Degallaix et B. Iischer, traité des matériaux 2, presses polytechnique universitaires normandes 2007.
7. M. Kontopoulou Queen's, University Kingston, Ontario, Canada applied polymer rheology Polymeric Fluids with Industrial Applications, John Wiley & Sons, 2012.

8. D. Weidmann, Aide-mémoire, Textiles Techniques, Dunod.
9. M. Melas, état de l'art concernant les grands procédés de mise en œuvre des matières plastiques issues de Processus de régénération de déchets Efficacité économique des filières de recyclage Des plastiques, rapport final Janvier 2003.
10. J.P. Mercier, E.Marechal, Chimie des polymères 13-chimie des polymères : Synthèse réaction de dégradation, 1^{ère} édition, Presse polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, , pp16, 330,393-395, 1993.
11. E. Marechal , Polycondensation et polyaddition, Technique de l'Ingénieur ,Paris, ,vol M 3041, 14-15, 1989.
12. M. S. Bhatnagar, A text book of polymers (Chemistry and Technology of Polymers) », 1st Edition, S. Chand &company LTD, India, , pp 5,131, 1984.
13. MP/EIPPCB/POL_BREF_FINAL Fabrication des polymères, Août 2007.
14. D. Ali, Cours Techniques de Fabrication Mécanique Conventiionnelles et Avancée, M1 Construction mécanique, Université de M'sila.
15. J. F. Agassant, P. Avenas, J. P. Sergent, B. Vergnes, M. Vincent, Mise en forme Approche thermomécanique de la plasturgie des polymères, 4e édition, 1995.
16. L. Picart-Palmade, Rhéologie, Document pédagogique, Ecole polytechnique de Montpellier, 2014.
17. J. Lecomte-Beckers, physique des matériaux: partie polymères, Chapitre 6 : Rhéologie des matériaux polymères.