

## L'INJECTION DES POLYMERES THERMOPLASTIQUES

### 1) PRINCIPE ET TERMINOLOGIE

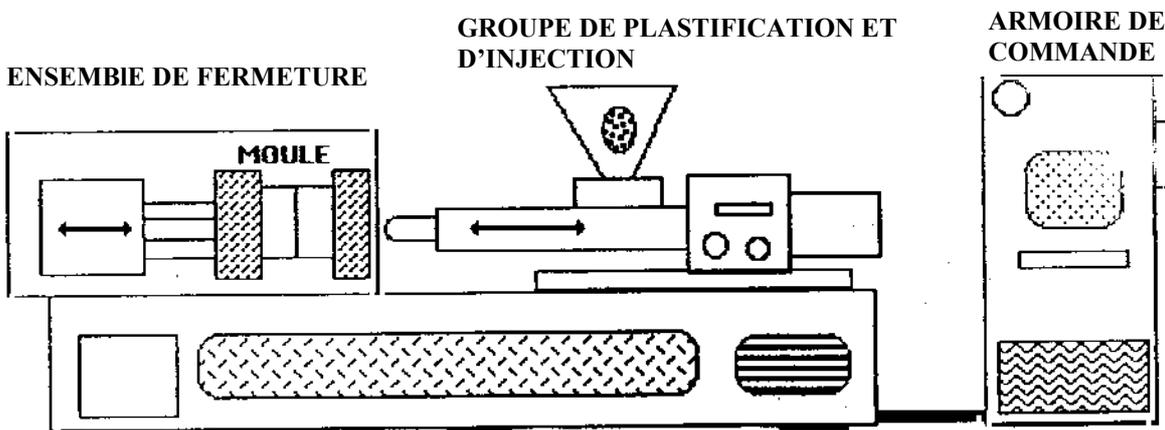
Le procédé d'injection sous haute pression des résines thermoplastiques est important : il intéresse en valeur, plus de 40% de l'industrie de transformation des matières plastiques. Les presses d'injection représente 60% du parc-machine des transformateurs.

L injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en grande série, suivant un principe simple de fonctionnement.

En effet, le polymère utilisé est chauffé afin de lui donner la consistance d'un liquide visqueux. Ce liquide est ensuite injecté dans un moule, réalisé en plusieurs parties. Le polymère se refroidit jusqu'à l'état solide à la suite de quoi la pièce est extraite après ouverture de l'outillage. Une nouvelle injection est réalisée quand l'outillage est à nouveau fermé.

Une machine d'injection présente toujours l'allure qui suit (fig.1)

### PRESSE A INJECTER LES POLYMERES THERMOPLASTIQUES



le groupe de fermeture qui supporte le moule  
le groupe d'injection—plastification  
l'ensemble de commande de la machine

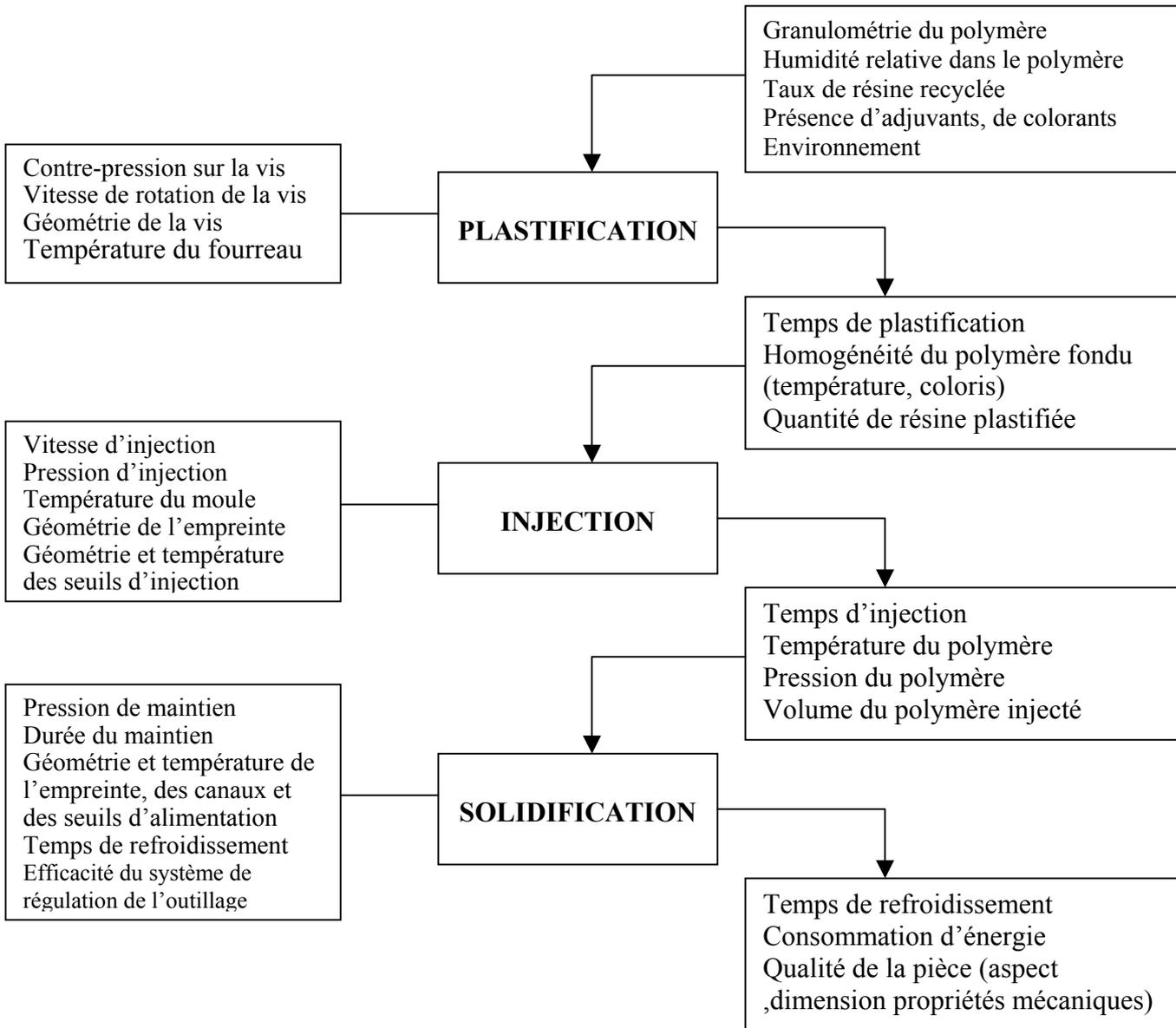
Nous décrivons plus loin le rôle des deux premiers sous-ensembles. Nous nous intéresserons de manière plus marquée au groupe d'injection.

L'armoire de commande gère l'ensemble des paramètres de réglage de la machine. De même, elle assure le séquençement des différentes opérations et le contrôle des sécurités qui sont installées sur la machine.

Le processus d'injection est un procédé de transformation discontinu et complexe faisant intervenir trois phénomènes physiques

- la plastification du polymère elle est effectuée avec un système vis-fourreau. Ce dernier provoque la fusion du polymère en lui apportant les calories nécessaires par chauffage électrique du fourreau d'une part et par malaxage et cisaillement d'autre part. Le groupe de plastification prépare la dose de polymère qui est ensuite injectée
- l'injection du polymère la vis de l'ensemble de plastification joue le rôle du piston d'une seringue. le polymère fondu est injecté sous un débit élevé et une pression très importante dans le moule
- la solidification du polymère l'outillage présente une température faible par rapport à celle du polymère qu'il reçoit pendant son remplissage. Le polymère se refroidit alors pour retrouver un état solide et former la pièce.

Ces différentes phases forment un système en cascade représenté comme suit



Ce schéma montre la multiplicité des grandeurs d'entrée du processus d'injection. Une presse d'injection est une machine dont les réglages sont complexes. La difficulté essentielle provient de l'interdépendance de certaines grandeurs d'entrée

La modification de certains paramètres de réglage entraîne des phénomènes complexes. Un exemple connu concerne l'influence de la vitesse d'injection sur la pression d'injection. En effet, une injection à vitesse lente favorise les échanges thermiques entre le polymère et l'outillage. Le polymère se refroidit vite. Il faut développer une pression élevée pour remplir l'outillage. Pour limiter ce niveau de pression, nous pouvons augmenter la vitesse d'injection, Cette modification provoque deux effets

- une augmentation du débit de polymère entraîne des pertes de charges à l'écoulement qui sont croissantes. Elles produisent une élévation de la pression d'injection
- le passage au travers des seuils d'injection provoque un échauffement du polymère par dissipation visqueuse. Un débit de polymère élevé entraîne un échauffement important qui fait chuter la viscosité du polymère donc la pression d'injection.

Par ailleurs, ces modifications de réglage en fonctionnement peuvent avoir des conséquences secondaires. En effet, les phénomènes d'auto échauffement qui affectent le polymère, contrarient l'état d'équilibre thermique de

l'outillage. La température de ce dernier évolue lentement vers un point de fonctionnement différent du régime Permanent si le système de refroidissement est mal adapté.

**Un réglage de machine peut donc être fiable de manière instantanée et incorrect à plus long terme.**

## 2. DESCRIPTION DU GROUPE DE FERMETURE/VERROUILLAGE D'UNE PRESSE A INJECTER LES THERMOPLASTIQUES

Le principe de fonctionnement de cette partie de machine est simple. En effet, deux objectifs sont à atteindre

- d'une part la fermeture/ouverture de l'outillage
- d'autre part le verrouillage de ce dernier.

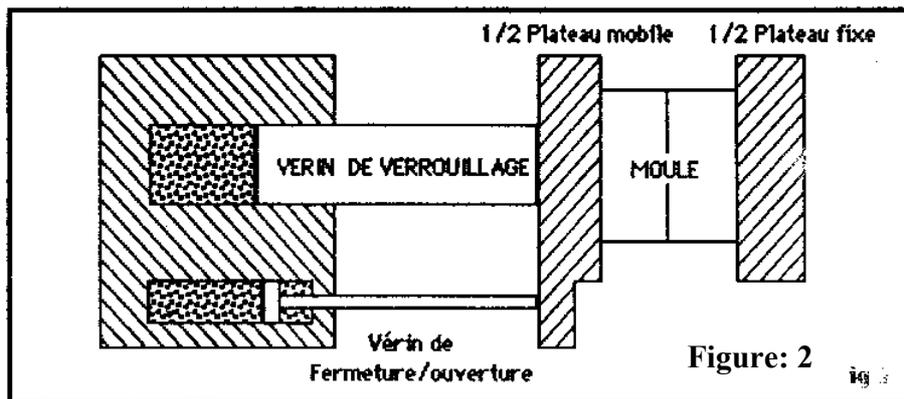
La fermeture/ouverture du moule est un mouvement de grande amplitude. Il est fait à grande vitesse avec des forces faibles. A l'inverse, le verrouillage est un mouvement de faible amplitude mais de puissance élevée, la capacité d'un système de fermeture est définie à l'aide de trois paramètres

- la force de verrouillage disponible (de 1 à 10000 tonnes)
- les dimensions du plateau porte-moule (surface comprise entre 1dm<sup>2</sup> et 6 m<sup>2</sup>)
- La course d'ouverture et l'épaisseur moule maxi et mini

Les différents dispositifs de verrouillage se distinguent par la technologie employée. De manière générale trois catégories d'unité de fermeture sont définies; (figures 2, 3 et 4).

### a) L'unité de fermeture hydraulique :

les mouvements de fermeture, ouverture et le verrouillage sont exécutés uniquement avec un actionneur hydraulique (vérin)(fig. 2)



Avantages : - contrôle direct et très bonne stabilité de la force de verrouillage  
 - effort de verrouillage central qui entraîne une bonne répartition des pressions  
 - faible coût du système de fermeture

inconvénients : - taille importante des pièces en mouvement  
 - volumes d'huile déplacés importants  
 - mouvements de fermeture/ouverture lents (amortissement difficile en fin de course)

b) L'unité de fermeture mixte (fermeture/ouverture par genouillère, verrouillage hydraulique) :

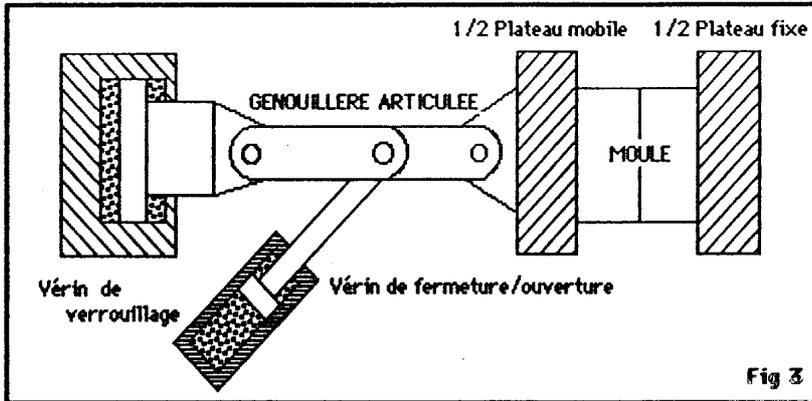


Fig3

avantages : - vitesse de fermeture/ouverture élevée (application en grande série)

- faible consommation d'huile
- effort de verrouillage central
- contrôle direct de la force de verrouillage

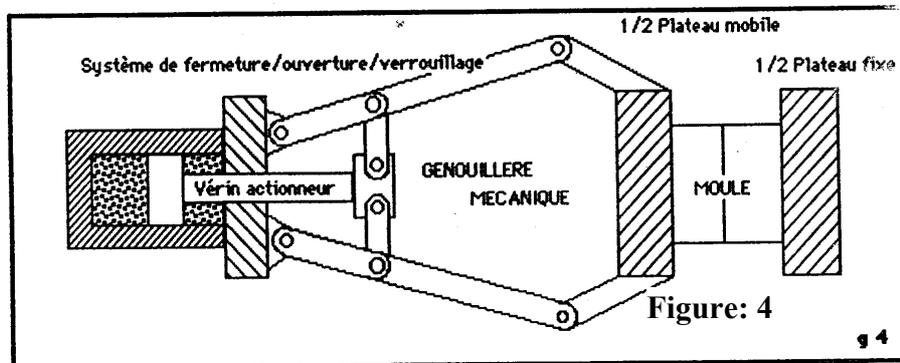
inconvénients- au delà de 600 tonnes le dimensionnement de la genouillère se traduit par un encombrement élevé .

- coût élevé
- faible fiabilité due à la complexité du mécanisme et de la commande

Figure: 3

c) L'unité de fermeture mécanique :

(f ig.4)



Avantage : -vitesse de fermeture/ouverture relevée (application en grande série)

- déformations axiales faibles
- fiabilité importante

Inconvénients - contrôle difficile de la force de verrouillage

- chocs sur le plan de joint
- fatigue mécanique des articulations
- flexion du plateau mobile

Le système de fermeture à genouillère est celui qui offre le plus d'avantages

Remarque :

- Depuis 1995 des systèmes de fermeture sont animés par des vérins électriques (vis à billes). L'utilisation d' actionneurs électrique permet d'économiser de l'énergie d'abaisser le niveau sonore de la machine.
- Actuellement toutes les fermeture sont équipé de système de « protection outillage » pour que la force de verrouillage s'applique uniquement si le moule est correctement fermé (pas de

pièces bloquées ni de problème de grippage ....).

Le groupe de fermeture/ouverture joue un rôle passif en regard de la notion de qualité en injection. Son rôle essentiel consiste à supporter l'outillage d'une part et interdire l'ouverture de ce dernier d'autre part.

Le dernier point est essentiel. En effet, le remplissage de l'empreinte du moule définit un régime de pression. Ce dernier est rapporté à la surface du plan de joint de l'outillage. Une force minimale de verrouillage est nécessaire pour maintenir le moule fermé lors de l'injection.

Les presses d'injection représentent des investissements importants (1 millions d'euro pour une presse de 3000 tonnes de force de fermeture). Les outillages coûtent aussi très chers (0.5 millions d'euro pour un moule de pare-choc) . Il est intéressant d'adapter au mieux un moule et une machine d'injection.

Cela explique l'apparition de logiciels qui simulent les écoulements du polymère dans les outillages. Le calcul des champs de pression qui apparaissent dans le moule, permet d'optimiser le réseau d'alimentation de l'empreinte et de choisir une machine adaptée à la production.

De la même manière, la cadence de production et la géométrie de l'outillage permettent de définir les capacités minimales du groupe de plastification. Ces derniers peuvent plastifier et injecter, selon leur taille, de quelques grammes à cent kilogrammes de polymère. La pression de ce dernier peut s'élever jusqu'à 2500 bars.

---

### 3). LE GROUPE DE PLASTIFICATION - INJECTION

Le groupe de plastification - injection permet de fluidifier le polymère puis de l'injecter. La qualité de la plastification est liée, d'une part à la stabilité de la température du polymère fondu cycle après cycle, d'autre part à l'homogénéité de la masse fondue.

Le principe de la mise en fusion du polymère est identique à celui qui est utilisé dans la technique de transformation par extrusion. Nous nous inspireront des états de la recherche dans ce dernier domaine principalement afin d'explicitier le phénomène de plastification.

L'étude du groupe de plastification - injection est décomposée en deux parties

- la phase de plastification
- la phase d'injection.

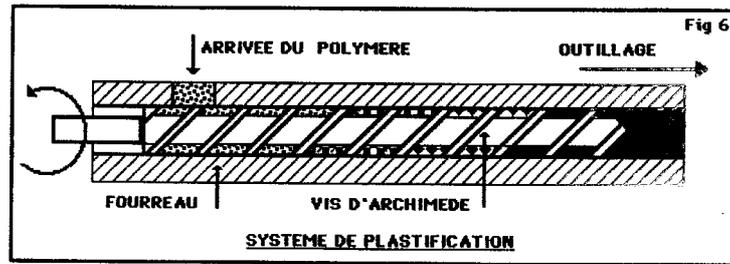
#### **31) Fonctionnement du groupe de plastification injection pendant la phase de plastification**

Le groupe de plastification est composé de deux parties essentielles

- le groupe de motorisation (moteur et réducteur)
- le système vis-fourreau (vis d'Archimède)

Le groupe de motorisation entraîne la vis de plastification dans son mouvement de rotation. Cette vis assure le débit de polymère fondu vers l'avant du groupe de plastification.

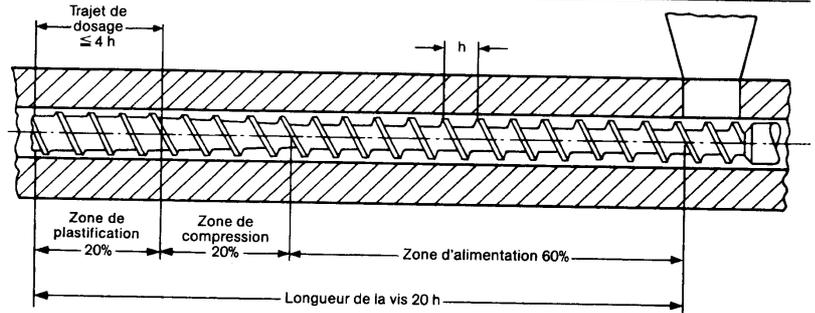
Le système de plastification est constitué d'une part d'un fourreau métallique dont la température est requière, et d'autre part d'une vis d'Archimède de géométrie singulière ; celle-ci est mobile en rotation et en translation. Elle est placée à l'intérieur de ce fourreau. L'ensemble prend l'allure qui suit (fig.6)



Le fourreau du système de plastification présente souvent une géométrie simple. La vis est par contre très sophistiquée. Elle peut être constituée d'éléments de forme très variée. Néanmoins, nous pouvons généralement distinguer trois zones successives. Chaque zone a une longueur définie par un nombre donné de diamètres.

Les désignations usuelles des trois zones sont

- zone d'alimentation [1]
- zone de compression [2]
- zone de pompage [3]



exemple de vis pour matière cristalline ( $h \approx \varnothing$  de vis)

### 311) La zone d'alimentation

Elle est également appelée zone solide. Le polymère est mis au contact de la vis par gravité à partir d'une trémie d'alimentation ou en force à l'aide d'un dispositif de gavage.

La rotation de la vis assure la mise en pression des granules ou de la poudre de polymère. Celui-ci reste en grande partie à l'état solide jusqu'à son approche vers la zone de compression. En effet, la température du fourreau est relativement faible à cet endroit et le temps de séjour du polymère dans cette zone reste court. Il ne favorise pas l'amorçage de la fusion de la résine.

Les difficultés qui sont rencontrées dans cette zone concernent l'adhérence du polymère sur la vis de plastification et la face intérieur du fourreau. Les deux exemples qui suivent, concernent des cas extrêmes afin de mieux appréhender les difficultés du problème.

premier cas le coefficient de frottement entre le polymère et la vis est élevé ; le coefficient de frottement entre le polymère et le fourreau est faible.

Dans son mouvement de rotation, la vis entraîne le polymère qui glisse sur le fourreau. La résine et la vis sont solidaires. Le débit de l'unité de plastification est donc compromis.

second cas il est opposé au premier cas.

Le coefficient de frottement entre le polymère et la vis est faible.

Le coefficient de frottement entre le polymère et le fourreau est élevé.

Le système "vis-matière" se comporte comme un semble "vis-écrou". Le polymère est donc entraîné en masse vers l'avant du groupe de plastification. Ces hypothèses de travail assurent un débit de plastification important. Néanmoins, elles peuvent provoquer un couple résistant trop élevé sur la vis. Ce phénomène peut entraîner la rupture de cette dernière.

La solution technologique adoptée est mitigée. Elle entraîne la réalisation de vis de plastification dont l'état de la surface est de grande qualité.

La pérennité de la qualité de surface est obtenue à l'aide de traitements de surface divers traitement thermique, métallisation, etc.

L'intérieur des fourreaux peut parfois présenter des usinages particuliers (rainurage) afin d'améliorer de manière artificielle le rendement de la machine. Cette solution technologique est rare dans le domaine de l'injection

A ce stade de notre analyse, le polymère est peu fondu. Il est entraîné et transporté vers la zone de plastification

encore appelée zone de compression.

### 312) La zone de plastification /compression

La fusion du polymère est réalisée le long de cette zone. Plusieurs observations en laboratoire ont mis évidence différents processus de plastification.

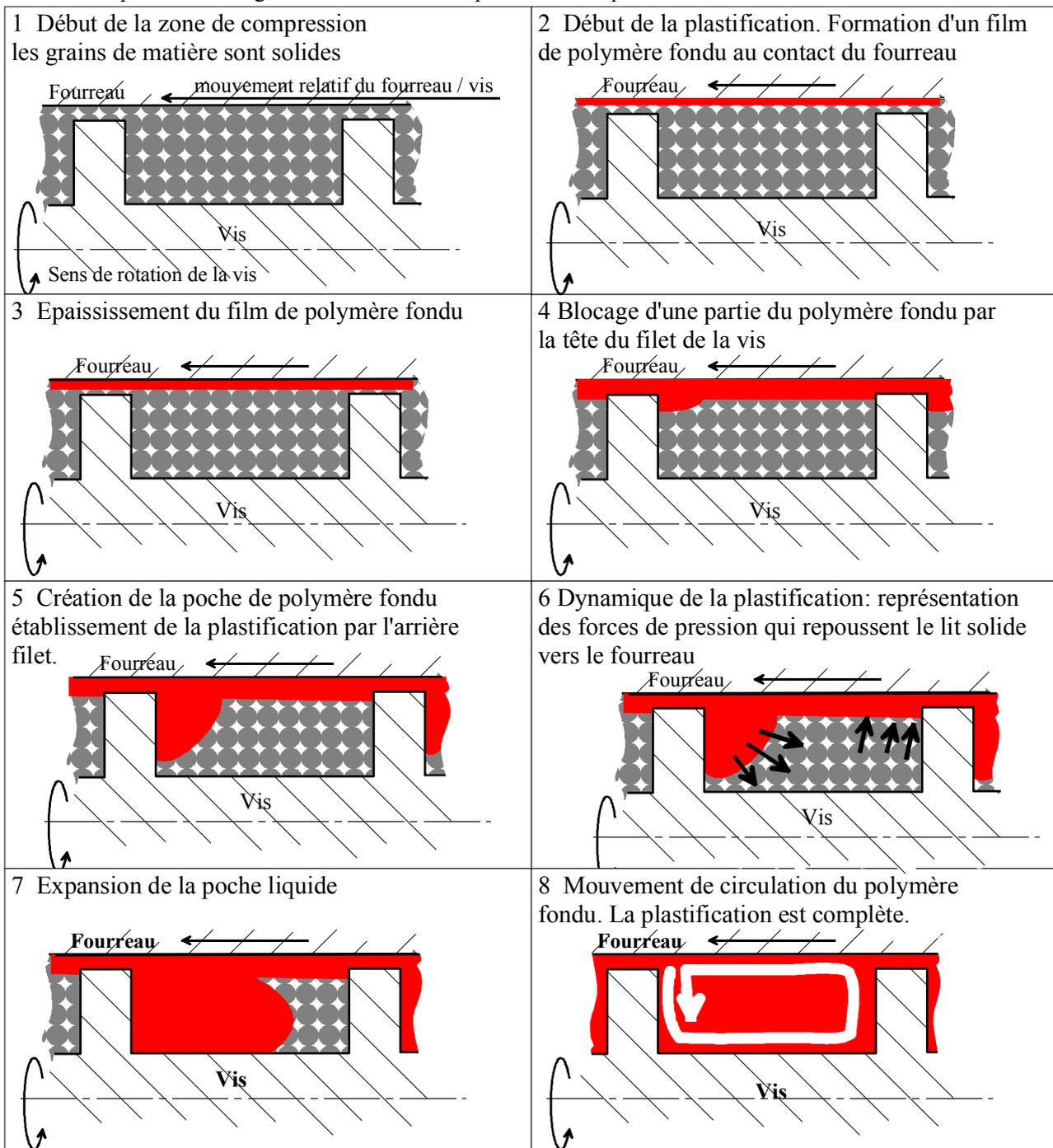
Trois processus de plastification peuvent être observés

- la plastification par l'arrière du filet
- la plastification par l'avant du filet
- la plastification mixte (à la fois par l'avant et l'arrière du filet)

La plastification par l'arrière du filet, correspond phénomène le plus souvent généré avec un groupe de plastification en bon état. Ce phénomène est fréquent jeu faible entre vis et fourreau qui autorise des débits de plastification"élevés (8).

## PRINCIPE DE LA PLASTIFICATION PAR L'ARRIERE DU FILET

Le parcours des figures numérotées correspond à des coupes successives vers l'avant de l'extrudeuse



Certains auteurs ont bien étudié la plastification par l'arrière du filet. La figure 8 décrit de manière simple l'apparition et la progression des phases en présences (polymère fondu à l'état liquide/polymère solide)

Au cours de la plastification par l'arrière du filet, les phénomènes de mise en pression de la poche liquide sont très importants. En effet, la présence de la pression va autoriser ou non le processus de plastification. Elle doit pour cela avoir une valeur suffisante afin de déformer le lit solide. Ce dernier est alors plaqué contre le fourreau qui entraîne sa fusion.

Le niveau de pression obtenu est corrélé à la hauteur du jeu mécanique qui existe entre la vis et le fourreau. Un jeu trop important interdit la déformation du lit solide. Il remet en cause le principe de la plastification par l'arrière du filet.

### 313) La zone de pompage :

Cette zone terminale met en pression le polymère. Le mouvement relatif de la vis et du fourreau permet augmenter la pression du polymère. Il assure l'écoulement de la résine vers l'avant du système vis-fourreau. Le débit de polymère provient de la superposition d'un écoulement de Poiseuille de refoulement d'une part et d'un écoulement de cisaillement d'autre part.

L'ensemble de plastification d'une presse d'injection travaille de manière discontinue. En effet, le groupe d'injection remplit deux rôles

- la préparation d'une quantité de matière plastifiée encore appelée phase de dosage ou de plastification
- le transfert du polymère dans l'outillage c'est à dire la phase d'injection.

### 32) Fonctionnement du système vis-fourreau au cours du dosage

La vis d'injection est mobile en translation. Cette mobilité permet de libérer un espace de stockage à l'avant de la vis. Ainsi, le polymère plastifié s'accumule dans cette zone.

Le débit de plastification est contrôlé grâce à deux paramètres de réglage

- la contre-pression
- la vitesse de rotation

La contre-pression correspond à une pression hydraulique qui s'oppose au mouvement de recul de la vis.

Ce paramètre de réglage permet d'améliorer deux choses l'homogénéité du matériau plastifié d'une part et le contrôle de l'échauffement du polymère par dissipation visqueuse d'autre part.

En effet, une contre-pression élevée augmente la durée totale de la phase de dosage. Si la vitesse de rotation de la vis est constante, cette dernière effectue un nombre de tours plus important.

La contre-pression hydraulique est parfois réglée par paliers pendant le recul de la vis d'injection. Le polymère qui est devant la vis, peut atteindre des pressions de 400 bars lors de la phase de dosage.

La vitesse de rotation est aussi réglée en fonction de la position de la vis. Certaines presses d'injection autorisent des vitesses de rotation de 250 tours par minute.

La rotation de la vis rend homogène le produit transformé. Ce paramètre représente la principale source d'échauffement par cisaillement du polymère. Par conséquent, une vitesse de rotation élevée risque d'entraîner la dégradation thermique par échauffement local trop important. Nous avons montré comment limiter ce phénomène sans remettre en cause l'efficacité du malaxage de la résine. En effet, la contre-pression est utile dans ce cas.

Nous pouvons donc conclure que les deux paramètres de réglage de la phase de plastification sont

complémentaires. Un polymère qui s'échauffe facilement par dissipation visqueuse, nécessite un dosage sous vitesse de rotation faible et contre-pression élevée. Dans le cas contraire, la rotation rapide de la vis de plastification assure un malaxage acceptable et permet de limiter la valeur de la contre-pression.

L'intérêt des profils de contre-pression d'une part, et des vitesses de rotation d'autre part est justifié de manière simple. En effet, au fur et à mesure du recul de la vis, les conditions de plastification sont modifiées. La partie utile de la vis devient de plus en plus courte. Néanmoins, l'expérience définit un critère qui limite l'effet de ce phénomène sur la qualité du dosage. La longueur maximale de dosage ne doit pas excéder 3 à 4 fois le diamètre de la vis de plastification.

La durée de la phase de plastification ne présente pas un inconvénient majeur. En effet, ce travail est effectué en temps masqué pendant la phase de refroidissement de la pièce injectée.

Néanmoins, pour les pièces à paroi mince réalisées avec des cadences élevées, la phase de refroidissement est inexistante ou très courte. Les machines sont équipées de groupes de plastification rapides.

Cette possibilité est offerte avec des actionneurs électriques. Ces moteurs sont montés sur des presses dont la force de fermeture est inférieure à 100 tonnes. Ces machines sont rares. Les machines d'injection sont en effet, en majorité, équipées de moteur hydraulique.

Ces moteurs hydrauliques présentent deux avantages essentiels

- un rapport puissance/encombrement limité
- une connexion directe sur le groupe hydraulique qui fournit déjà la puissance du système de fermeture- verrouillage.

Cependant, les moteurs hydrauliques offrent des phases transitoires de démarrage fort longues. Ces phénomènes sont inévitables. Ils altèrent l'efficacité du contrôle de la phase de plastification. Nous décrivons plus loin les répercussions de ces difficultés sur la stabilité de la qualité des pièces.

L'optimisation de la plastification concerne aussi le profil géométrique de la vis .

En effet, il est techniquement possible d'adapter une vis de plastification à une résine. Des besoins particuliers de malaxage peuvent aussi être pris en considération. Néanmoins, ces vis spécialisées sont réservées à des productions importantes réalisées avec le même produit.

Cette situation n'est pas compatible avec la notion de flexibilité de production qui sous-entend l'emploi de résines différentes afin de réaliser des pièces variées. Parfois, le changement de coloris, par adjonction de mélanges maîtres, entraîne, seul, des modifications de comportement du polymère non négligeables. Ces perturbations remettent vite en cause l'optimisation d'un profil de vis qui reste une opération coûteuse. - Elle est illustrée par la complexité d'usinage des exemples qui apparaissent sur la figure 10.

### ***Dessin de vis spéciales***

La phase de plastification se termine quand la quantité de polymère se trouve devant la vis est suffisant pour remplir l'empreinte et exercer le maintien.

### **33) Fonctionnement du groupe de plastification injection au cours de l'injection dynamique**

Dans le domaine de la transformation des résines thermoplastiques, il n'existe plus de machines d'injection pour lesquelles les fonctions de plastification et d'injection sont dissociées mécaniquement.

En effet, les machines qui alimentent en matière plastifiée un cylindre ou un pot de transfert grâce à l'ensemble vis-fourreau et, qui mettent en action cet ensemble de transfert pour réaliser le remplissage du moule, sont réservées à des - applications très particulières (pièces de masse élevée). Ainsi, le système vis-fourreau classique permet le remplissage du moule grâce à l'application d'une poussée sur la vis d'injection. Cette

dernière se déplace en translation et joue le rôle du piston d'une seringue (le fourreau) qui entraîne l'écoulement du polymère dans l'outillage.

La phase d'injection du polymère se décompose en deux sous-phases :

- la phase dynamique d'injection ou phase de remplissage -compactage
- la phase quasi-statique d'injection encore appelée phase de post-remplissage, phase de maintien en pression ou seconde phase.

### 331) La phase dynamique d'injection :

La vis-piston est mise en mouvement de translation. Elle met en pression le polymère qui a été plastifié auparavant. Deux problèmes se posent lorsque ce travail est réalisé :

- le contrôle du mouvement de la vis-piston
- la minimisation des fuites de polymère vers l'arrière de la vis.

Le contrôle du mouvement de la vis-piston

Afin de mieux comprendre l'importance de la phase de remplissage, nous devons rappeler qu'il s'agit de l'écoulement à une température de 250°C à 350°C du polymère fondu, fluide visqueux (100 à 10000 Pa.s), non newtonien dans un outillage relativement froid (10°C à 120°C). Ainsi, le moule est le siège d'échanges thermiques importants.

L'écoulement est fort affecté par le refroidissement du polymère. Ce dernier est très rapide lors de son initialisation. Il est ensuite amorti par la faible conductibilité thermique de la couche de polymère qui constitue la peau de la pièce injectée

Par ailleurs, le caractère pseudo plastique voire viscoélastique du polymère entraîne des difficultés. En effet une modification peu sensible des paramètres d'écoulement (par exemple le débit volumique) est à l'origine de variations importantes des pertes de charge créées au cours du remplissage du moule.

Dans ces conditions, il est nécessaire de contrôler le mieux possible la phase d'injection ou d'assurer la répétitivité de cette opération, cycle après cycle. Les fabricants de machines d'injection proposent quatre types d'injection dynamique

- injection à pression hydraulique constante imposée sur le piston support de vis (avec ou sans asservissement en boucle fermée)
  - injection à pression hydraulique constante par paliers (2 à 5 paliers) (avec ou sans asservissement en boucle fermée)
  - injection à vitesse de translation constante et unique de la vis piston (avec ou sans asservissement en boucle fermée)
  - injection à vitesse de translation de la vis—piston constante par paliers (2 à 15 paliers) (avec ou sans asservissement en boucle fermée)

Le dernier modèle cité permet d'atteindre une bonne reproductibilité s'il est associé à une régulation en boucle fermée. En effet, il est capable d'absorber plusieurs classes de perturbation

- perturbation sur les températures matière, outillage
- perturbation sur la viscosité du polymère.

L'utilisation de plusieurs paliers d'injection dynamique est très appréciée. En effet, les outillages d'injection présentent des empreintes dont la géométrie est souvent défavorable à l'avancée régulière d'un front de matière. Nous pouvons citer l'importante réduction de la section d'écoulement quand le réseau d'alimentation passe à l'empreinte proprement dite de l'outillage.

Ainsi, la diminution du débit d'injection, à ce moment, permet la suppression de deux phénomènes

- d'une part, éviter la surpression hydraulique, réaction du système d'asservissement face à la perte de

charge qui est vite créée

- d'autre part, éliminer les phénomènes de jet libre qui sont dus à l'accélération brutale de la vitesse d'avancée du front de polymère dans le moule ce "jetting" entraîne un affaiblissement mécanique de l'objet fini et d'importants défauts sur la surface de la pièce injectée).

Enfin, certains travaux récents permettent de corrélérer l'orientation des fibres de verre courtes (dans les composites à matrice thermoplastique) avec les conditions d'écoulement du produit lors de son injection. La maîtrise du débit de polymère dans un outillage permettra de contrôler l'anisotropie des caractéristiques mécaniques des pièces.

Néanmoins, il faut plusieurs conditions pour garantir un débit volumique du polymère constant lors de la phase dynamique d'injection. En effet, le refoulement du polymère vers la partie arrière de la vis piston doit être évité.

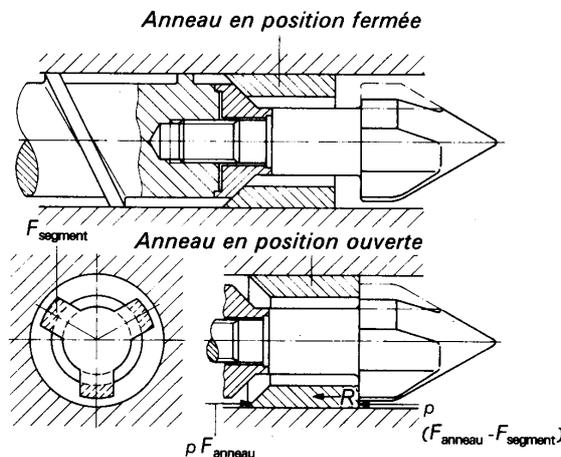
#### La minimisation des fuites de du polymère vers l'arrière de la vis

Les fuites du polymère plastifié sont, a priori, inévitables. En effet, lors de la plastification, le polymère qui est mis sous pression, parcourt le fond de filet de la vis pour s'accumuler à l'avant du système vis-fourreau. L'avancée rapide de la vis piston vers l'avant met à nouveau le polymère sous pression. Ce dernier peut donc reprendre le chemin du filet de la vis et se diriger vers la trémie.

Néanmoins, la fuite est limitée et n'empêche pas l'injection. Mais, le refoulement du polymère est incontrôlable cycle après cycle. Ce phénomène entraîne des variations de débit d'injection aléatoires, donc néfastes à l'obtention d'une qualité de production constante.

De nos jours, la seule solution à ce problème est mécanique. Elle consiste à équiper l'extrémité de la vis de plastification d'un clapet anti-retour. Le fonctionnement de ce dispositif apparaît sur la figure 11.

Figure 11 : Fonctionnement du clapet anti-retour de vis



Cependant cette technologie présente de grands inconvénients. En effet, le clapet anti-retour est une pièce d'usure qui est soumise à des contraintes thermiques et mécaniques très sévères. C'est un dispositif dont la forme est vite altérée. Cela entraîne des points de stagnation du polymère dans une zone à température élevée. Ainsi, les dépôts de polymère qui atteignent les limites de stabilité thermique, se dégradent. Ils provoquent l'apparition des défauts sur les objets finis. Ces défauts ont un aspect qui est du type "point noir". La fréquence d'entraînement du polymère qui est dégradé, est aléatoire. Ce phénomène ne facilite pas le diagnostic sur Le manque de qualité.

D'autre part, le clapet de vis coulisse dans le fourreau au cours de l'injection. Un jeu mécanique est nécessaire entre ces deux pièces. Ce système ne peut en aucun cas éliminer tous les reflux de résine.

L'influence de la phase dynamique d'injection sur les caractéristiques finales du produit fabriqué, est très

importante, nous y reviendrons.

Au cours de la phase dynamique, l'outillage se remplit de polymère. Quand le moule est rempli, la machine passe en mode d'injection quasi-statique. L'unité d'injection entretient alors la pression du polymère dans l'empreinte.

### 332) La phase quasi-statique d'injection

Au cours du remplissage de l'empreinte, le polymère qui circule dans le moule, est soumis aux lois de la mécanique des fluides. Afin d'assurer le débit de matière, il est donc nécessaire de vaincre les pertes de charge qui sont subies par la résine. Des champs de pression naissent le long du trajet du polymère. Ils peuvent prendre l'allure de la figure 12, en fonction de la géométrie parcourue:

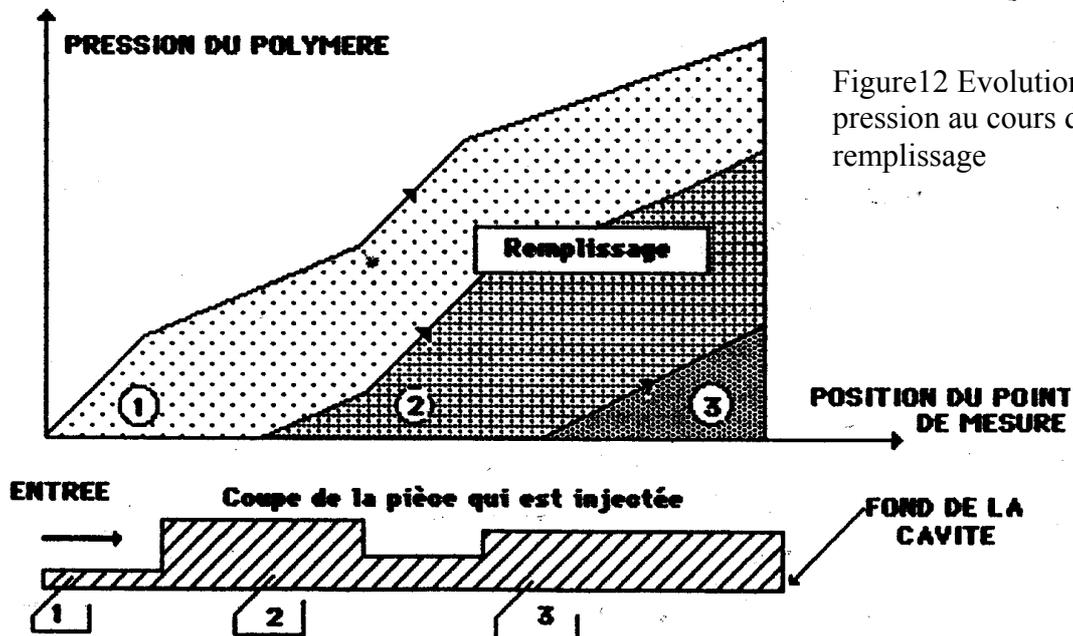


Figure12 Evolution de la pression au cours du remplissage

Ainsi, l'ensemble du polymère présent dans la cavité est sous pression (quelques centaines d'atmosphères).

Lors du remplissage, le polymère est, dans un premier temps, mis au contact des parois du moule. Il est ainsi refroidi. Mais la couche solidifiée reste faible par rapport à l'épaisseur de la pièce (cependant, il existe une exception : les pièces à parois minces dont l'épaisseur est inférieure à quelques dixièmes de mm). En effet, le cœur de cette pièce reste à l'état fondu.

Nous pouvons donc assimiler la pièce en cours de réalisation à un véritable ballon qui est constitué d'une peau de polymère solidifié et d'une âme gonflée de polymère liquide sous pression. La phase de maintien en pression est appliquée à partir de cet état initial :

- dans un premier temps, le maintien en pression entretient et équilibre les niveaux de pression développés au cours de la phase de remplissage
- dans un second temps, la phase de maintien limite les effets du refroidissement caractérisés par un retrait volumique du matériau.

La phase de maintien en pression est définie sur les machines modernes à l'aide de deux paramètres

- le niveau de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection
- la durée d'application de cette pression

### Rôle du niveau de la pression hydraulique appliquée sur la vis d'injection lors de la phase quasi-statique

La pression hydraulique appliquée sur le piston d'injection (support de la vis), est transmise à la cavité du

moule grâce au matelas de matière plastique liquide correspondant à l'excès de volume plastifié. Le niveau idéal de pression hydraulique doit maintenir la pression du polymère en fin d'injection. En effet, la résine thermoplastique étant compressible à l'état liquide, une décompression du polymère entraîne un flux sortant de résine du moule vers l'avant du système d'injection.

Une pression de maintien faible est nuisible pour deux raisons :

- d'un point de vue énergétique car la résine qui vient d'être transférée avec difficulté dans l'outillage, quitte aussitôt et en partie le moule
- pour une raison de qualité géométrique de la pièce car le flux sortant du polymère peut créer des retassures à la surface de la pièce -

Une pression de maintien trop élevée présente deux inconvénients :

- un risque d'ouverture de moule. Le polymère liquide s'écoule alors dans le plan de joint de l'outillage et la pièce présente des bavures : c'est une pièce "toilée"
- un apport de résine trop important au cœur de la pièce. Celui-ci crée donc des contraintes internes qui diminuent la résistance au choc des pièces.

Le réglage du niveau de pression hydraulique est donc important. La difficulté majeure réside dans le manque de corrélation entre cette pression et la pression du polymère dans l'empreinte. Nous développerons cette difficulté plus loin.

Par ailleurs, le rapport entre ces pressions évolue dans le temps. La durée de la phase quasi-statique est alors primordiale.

Rôle de la durée de la phase quasi-statique

Au cours de la phase de maintien, des phénomènes thermiques sont en jeu. En effet, le polymère injecté se refroidit. Sa densité augmente. Il faut donc compenser le retrait volumétrique du polymère. Dans ce cas, le matelas de matière présent devant la vis d'injection, est utilisé.

En effet, la couche de polymère solidifiée au contact des parois du moule, s'épaissit et la résine densifiée libère du volume. Le moule est alors alimenté de façon continue en polymère liquide grâce à la pression appliquée sur le matelas.

Le faible débit de compensation du retrait s'effectue jusqu'à solidification d'une section d'alimentation du moule et de ses canaux, à partir de quoi la pression de maintien n'a plus d'action.

Deux cas peuvent être envisagés

- un temps de maintien en pression trop court entraîne une compensation du retrait incomplète. Des défauts importants sont créés sur les pièces. En effet, les retassures à cœur provoquent l'apparition de vacuoles ou bulles. Ces dernières sont visibles si le polymère utilisé est transparent. Ces manques de matière affectent les caractéristiques mécaniques des pièces injectées. Les pièces transparentes cumulent ce défaut mécanique avec un défaut d'aspect.
- un temps de maintien trop long est à l'origine d'un coût énergétique élevé. En effet, il correspond à l'application d'une pression hydraulique qui reste sans conséquence sur la qualité de la pièce injectée.

Conséquence des différents réglages des paramètres qui définissent la phase de maintien

	Trop faible/court	Trop élevé/long
Niveau de pression	<ul style="list-style-type: none"> <li>• flux sortant de résine retassures</li> <li>• déformation des pièces</li> <li>• contraintes résiduelles de compression en surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pièce toilée sur le plan de joint</li> <li>• contraintes résiduelles de traction en surface</li> <li>• difficulté de démoulage</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût élevé de production</li> </ul>
Temps de maintien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retassures</li> <li>• Déformation des pièces</li> <li>• Vacuoles au cœur de la pièce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ralentissement des cadences de production</li> <li>• coût énergétique supplémentaire</li> </ul>

Description et comparaison des différents modes de passage en pression de maintien

Nous avons considéré la phase de remplissage d'une part et la phase de maintien en pression d'autre part. Nous abordons ci-dessous le problème du passage de la première à la seconde phase. Nous comparons les différentes solutions technologiques disponibles pour réaliser ce changement de commande.

Elles sont au nombre de 4 (13) :

- commutation par le temps :  
passage de la première phase a la seconde après une durée donnée d'injection dynamique (la machine travaille avec un temps d'injection constant)
- commutation par la course :  
passage de la première phase a la seconde après le passage de la vis d'injection sur une position géométrique donnée
- commutation par la pression hydraulique :  
passage de la première phase a la seconde en définissant un seuil haut de déclenchement sur la valeur de la pression hydraulique dans le vérin d'injection
- commutation par pression dans le moule :  
passage de la première phase & la seconde en définissant un seuil haut de déclenchement sur la valeur de la pression du polymère dans l'outillage.

Les quatre modes de déclenchement de la phase de maintien présentent des caractéristiques techniques différentes.

Comparaison des quatre solutions

Technologies nécessaires et difficultés de mise en oeuvre

Type de passage en maintien	Technologies nécessaires	Difficultés de mise en oeuvre
A partir d'un temps d'injection dynamique	Technologie très simple	Aucune difficulté système monté en série coût négligeable
A partir d'une position de la vis d'injection	Capteur de position monté sur le système d'injection	Système simple et robuste monté en série
A partir d'un seuil de pression hydraulique dans le circuit d'injection 0-300 bar maxi	Capteur de pression piézo-résistif Amplitude de mesure dans le circuit	- capteurs fragiles mais peu exposes - position du capteur hydraulique coût 130 euro
A partir d'un seuil de pression du polymère dans l'outillage	Capteur de pression piézo-électrique Temps de réponse faible Amplitude de mesure 0-2000 bar maxi	- capteurs très fragiles - définition de la position du capteur dans l'empreinte - durée vie limitée du capteur coût 2000 euro

Ce tableau permet d'appréhender l'efficacité relative de ces différents systèmes. En effet, la mesure de la pression dans le moule est sans doute la solution idéale. car elle prend directement en compte l'état du polymère dans l'outillage.

Les autres solutions sont basées sur des critères indépendants de l'état du polymère dans le moule, au moins pour les deux premiers.